

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **Дихи Олександра Володимировича**,
завідувача кафедри зносостійкості і надійності машин Хмельницького
національного 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.

Дисертаційна робота Мікосянчик О.О. є науково-дослідною роботою,
яка представлена у вигляді рукопису та містить анотацію, вступ, сім розділів,
висновки, список використаних джерел із 465 найменувань та додатків на 31
сторінці. Дисертаційна робота викладена на 298 сторінках машинописного
тексту із 107 рисунками і 23 таблицями. Загальний обсяг роботи 416
сторінок.

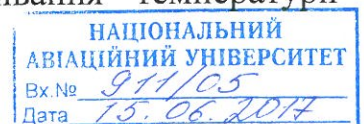
Актуальність обраної теми досліджень та зв'язок її з науковими програмами

Для створення високонадійних машин і механізмів велике значення
мають адекватні розрахункові методи прогнозування довговічності деталей
машин, що використовуються на етапі проектування машин і механізмів. Це
потребує розробки фізичних і математичних еволюційних моделей
самоорганізаційних структур в поверхневих шарах матеріалів при їх терті та
зношуванні.

Внаслідок накопичення в тонких поверхневих шарах дефектів,
обумовлених впливом навантажувальних, швидкісних і температурних
факторів, а також мастильного матеріалу і режимів експлуатації, відбувається
їх руйнування і зниження ресурсу. На сучасному етапі розвитку трибології
ще недостатньо розроблені питання, що відображають мікромеханіку
руйнування твердих тіл в парах тертя. Процеси накопичення і розвитку
мікропошкоджень в результаті впливу циклічних навантажень є важливою
складовою питання щодо підвищення надійності трибосистеми.

В умовах контактного циклічного навантаження в поверхневому шарі
трибоспряжень руйнування контактних поверхонь пов'язано зі зміною
структури матеріалів при високих швидкостях, температурах,
навантаженнях. Отже проблемами, які потребують подальших досліджень, є
визначення тривалості протікання процесів структурно-фазових перетворень,
їх якісна оцінка, межі прояву їх змін та тривалості стабільності утворених
структур до динамічних умов навантаження.

Порушення цілісності граничної плівки мастильного матеріалу, при
циклічних навантаженнях викликають різкі коливання температури в



локальних поверхневих об'ємах матеріалів пари тертя, що також призводить до протікання структурних та фазових перетворень, вибіркової дифузії елементів в приповерхневих деформованих об'ємах, прискореному руху дислокацій. Актуальним, таким чином, є питання управління процесами фазових і структурних перетворень за рахунок створення умов, що забезпечують утворення стабільних дисипативних структур в процесі структурної пристосованості матеріалів контактних поверхонь та мастильного матеріалу.

Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету та інших організацій. Автор був співвиконавцем цілого ряду держбюджетних тем. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт за наступними державними програмами: «Державне замовлення на наукові та науково-технічні розробки та державні цільові програми», бюджетною програмою "Прикладні дослідження і розробки за напрямами науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ", Державною цільовою програмою прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України за напрямом «Найважливіші проблеми фізико-математичних і технічних наук».

Загальна характеристика дисертаційної роботи

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

У першому розділі проведений аналіз літературних даних за темою дисертаційної роботи і обґрунтована актуальність та визначені основні напрямки досліджень. На основі аналізу літературних даних та аналізу технічного стану в умовах експлуатації зубчастих передач встановлено, що в результаті накопичення в тонких поверхневих шарах пар тертя дефектів, поява яких обумовлена впливом навантажувальних, швидкісних і температурних факторів, а також мастильного матеріалу і режимів експлуатації, відбувається їх руйнування і зниження ресурсу.

Відмічено, що процеси накопичення і розвитку мікропошкоджень в результаті впливу циклічних навантажень є важливою складовою питання щодо підвищення надійності трибосистеми. Встановлено, що в існуючих моделях не враховується вплив мастильного матеріалу на величину та вектор залягання дотичних зсувних напружень.

Проаналізовано сучасний стан питання оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту з урахуванням енергетичних, реологічних і структурно-фазових параметрів. Визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі наведена методологія оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту в несталіх умовах роботи. Створена комплексна методика моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних залежностей та спеціального програмного забезпечення, що

дозволяє розробляти адекватні заходи в управлінні процесами, які протікають в фрикційному контакті трибосистеми. Для оцінки триботехнічних характеристик контакту створено програмно-апаратний комплекс, що дозволяє проведення випробувань в умовах кочення, ковзання, реверсу.

Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя при контактних напруженнях. Розроблена методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при нестационарному режимі.

Розроблена методика розрахунку товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння.

У третьому розділі досліджено трибологічні аспекти взаємодії змащувальних, реологічних та антифрикційних характеристик мастильних матеріалів. Представлена методика припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах роботи за кінетикою зміни основних триботехнічних характеристик контакту.

Досліджено вплив контактних навантажень і температури на процеси утворення-руйнування граничних мастильних шарів для трьох типів мастильних матеріалів.

Встановлено зниження енергонапруженості контакту за рахунок ефективних демпфуючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу, який набуває в триботехнічному контакті властивостей неньютонівських рідин.

Встановлено зниження мастильної здатності мінеральної трансмісійної оливи при збільшенні проковзування контактних поверхонь при переході трибосистеми в екстремальні умови мащення, що обумовлено зменшенням товщини мастильного і перехід в напівсухий і граничний режими мащення.

Отримано, що збільшення ступеня проковзування обумовлює створення високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів, підвищує активацію контактних поверхонь, створює передумови для формування на поверхнях тертя хемосорбційних плівок.

Показано, що збільшення проковзування між контактними поверхнями призводить до прискорення схоплювання внаслідок зростання адгезійної складової коефіцієнта тертя при десорбції граничних шарів.

У четвертому розділі досліджено механізми утворення вторинних структур при структурній пристосованості трибоелементів.

Розглянуті структурно - енергетичні показники трибоконтракту в процесі утворення дисипативних структур. Обумовлені напрямки структурної пристосованості елементів трибоспряжень при терті. Проведена оцінка режиму мастильної дії з урахуванням гідродинамічної та негідродинамічної складових товщини мастильного шару. Досліджено вплив проковзування на реологічні і антифрикційні властивості контакту та вплив структури сталі на кінетику зміни енергетичного параметра при терті.

Проведена оцінка впливу змінного градієнта швидкості зсуву на реологічні і протизношувальні властивості контакту. Досліджено вплив ступеня проковзування контактних поверхонь на змащувальні і антифрикційні властивості оливи. Розкрито механізми структурної пристосовуваності з позицій кінетики зміни енергетичних і реологічних властивостей контакту. Досліджено вплив механо-хімічних процесів при терті кочення з різною величиною проковзування на зносостійкість контактних поверхонь.

У п'ятому розділі встановлені критерії оцінки зносостійкості контактних поверхонь в динамічних умовах навантаження на основі дослідження процесів, що відбуваються в тонких поверхневих шарах металу, як складної нерівноважної системи з нелінійними процесами.

Встановлено формування розподілу мікротвердості для вторинних структур II типу по лінії прикладання навантаження, для якої характерна максимальна зона зміцнення в центрі контакту і поступове зниження ступеня зміцнення до периферії лінії контакту та кореляцію між ступенем зміцнення поверхневих шарів металу і об'ємом деформованого металу по глибині.

Представлено практичне застосування методики прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів, що утворюється в процесі експлуатації елементів трибоспрямижень. Показана можливість прогнозування зносу контактних поверхонь в умовах кочення з різним ступенем проковзування від величини ефективної мікротвердості.

Встановлено вплив величини проковзування контактних поверхонь на кінетику зміни інтенсивності тепловиділення в контакті.

Проаналізовано динаміку тепловиділення в змащувальному шарі з урахуванням реологічних характеристик мастильного матеріалу в контакті. Показана доцільність вибору різних методик розрахунку підвищення температури в фрикційному контакті в умовах домінування гідродинамічного, еластогідродинамічного і граничного режимів мащення.

Запропонована емпірична залежність величини максимальних дотичних напружень в контакті з урахуванням триботехнічних параметрів контакту.

В шостому розділі проведено моделювання процесів зношування пар тертя в нестационарних умовах роботи. Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту. В якості базової моделі використана кінетична модель руйнування матеріалів на основі термофлуктуаційної концепції міцності твердих тіл С.Н. Журкова. Запропоновані методи оцінки параметрів, що входять в модель, яка описує довговічність області багатоциклової втоми.

Встановлено вплив ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу на енергію активації провідного механізму руйнування при терті.

Запропоновано формулу для розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспрямижень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, що враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту.

Запропонована математична модель оцінки інтенсивності зношування гільзи циліндра ДВЗ залежно від параметрів конструкції двигуна, матеріалів кільце -циліндр, умов роботи ДВЗ, властивостей мастильного матеріалу. Запропонована емпірична залежність глибини залягання максимальних дотичних напружень.

В сьомому розділі запропоновані способи підвищення зносостійкості контактних поверхонь шляхом застосування технологій поверхневого зміцнення та модифікування поверхневих шарів металу при використанні матеріалів, що підвищують триботехнічні характеристики фрикційного контакту в умовах кочення з проковзуванням.

В результаті структурної пристосованості при терті на покритті встановлено поступове зниження питомої роботи тертя в контакті.

За запропонованою в роботі методикою оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильних матеріалів встановлено підвищення термомеханічної стійкості граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях. Встановлено залежність зносу азотованих контактних поверхонь сталі 40Х від типу мастильного матеріалу.

Апробовано методику оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильних матеріалів в умовах, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву мастильних шарів.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі одержаних результатів. Вони наведені в кінці кожного розділу і в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

Обґрунованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Достовірність теоретичних положень дисертації ґрунтується на застосуванні 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. Експериментальні результати отримані шляхом планування і проведення лабораторних та стендових випробувань на основі теорії моделювання та планування експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичного аналізу, методів кінцевих елементів та математичної статистики.

До найбільш вагомих нових наукових результатів, отриманих дисертантом можна віднести наступні.

- Запропонована термо-кінетична модель прогнозування довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних підходів в умовах змащування при нестационарних режимах роботи.

- Отримані залежності для розрахунку інтенсивності зношування трибосистем кочення з проковзуванням на основі кінетики зміни антифрикційних, реологічних та енергетичних характеристик.

- Побудована математична модель локалізації вектора максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення при зміні НДС поверхневого шару в зонах локального підвищеного зносу і градієнті мікротвердості по глибині.

- Встановлена залежність зносостійкості від структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті кочення з проковзуванням.

- Розкрито механізми залежності зношування від енергоємності контакту при структурній самоорганізації вторинних структур з урахуванням термомеханічної стійкості граничних мастильних плівок.

- Теоретично і експериментально обґрунтований механізм схоплювання контактних поверхонь з позицій фазових переходів першого роду в граничних шарах мастильного матеріалу.

- Пояснено механізми, що визначають зміну реологічних характеристик граничних змащувальних шарів при надбанні мастильним матеріалом неньютоновських властивостей.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Створено програмно-апаратний комплекс для реєстрації, збереження та обробки результатів експериментального дослідження кінетики зміни змащувальних, антифрикційних, реологічних та енергетичних параметрів в реальному часі при нестационарних режимах роботи.

2. Запропоновано спосіб припрацювання трибосистем в нестационарних умовах тертя на основі оцінки завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей.

3. Розроблено спосіб оцінки динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів при формуванні гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару.

4. Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних шарів в екстремальних режимах тертя при пружно-пластичній деформації поверхонь і високих градієнтах швидкості зсуву змащувальних шарів.

5. Розроблена методика оцінки триботехнічних показників трибоспряження «верхнє компресійне кільце - гільза циліндра» двигуна внутрішнього згоряння залежно від робочого процесу.

Повнота викладу основних результатів дисертації

За темою дисертаційної роботи надруковано 50 наукових праць, у тому числі 27 статей у фахових виданнях переліку МОН України, 5 наукових статей у закордонних періодичних виданнях. Результати роботи доповідалися і пройшли апробацію на 13 конференціях, конгресах та форумах. Розробки захищені семи патентами на винаходи та корисні моделі. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

Зауваження по роботі.

1. Запропонований і використаний для розрахунків триботехнічних досліджень програмно-апаратний комплекс (ПАК) як вихідну інформацію сприймає показники датчиків вимірювання моменту тертя, частоти обертання роликів, температури мастильного матеріалу, падіння напруги в мастильному шарі тощо, які характеризуються певними похибками, що, очевидно, впливає на достовірність і точність подальших розрахунків, але похибки вимірювань цих параметрів в роботі не наведені і не зрозуміло, чи вони були враховані в програмному забезпеченні ПАК.

2. Величина лінійного зносу (с.132) визначалась як різниця глибин відбитка до і після зносу за формулою 2.16, за довжиною діагоналі відбитка піраміди. Однак не вказано, у якому напрямку відносно текстури матеріалу вони вимірювались, оскільки внаслідок анізотропії властивостей вони можуть бути різними. Також на рис. 2.11 показані відбитки піраміди на плоскій поверхні, а в подальшому аналізується твердість для криволінійних поверхонь зразків.

3. Опис розрахунку товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра при робочому процесі двигуна внутрішнього згоряння (п.2.5.1) містить низку формул (2.32 2.48) без посилань на власні дослідження автора та інші літературні джерела.

4. Підрозділ 3.1.1 повністю присвячений опису методики визначення кінцевого терміну припрацювання за кінетикою зміни триботехнічних параметрів, тому його доцільно було розташувати в другому методичному розділі роботи.

5. В кожному підрозділі 4-го розділу наголошується, що результати дослідження механізму утворення вторинних структур збігаються з висновками інших авторів: 133, 205, 207. 445 (с.192); 268 (с.195) і не вказано, що відмінного отримано за результатами власних досліджень. Також потребує уточнення спосіб вимірювання зносу контактних поверхні в межах 0,2 – 0,3 мкм (рис. 4.5), коефіцієнту тертя 0,005 (рис. 4.7) тощо. Не зазначено, як отримані рівняння поліноміальної регресії 4-го ступеня для розрахунку товщини граничного змащувального шару (с. 202).

6. В 6-му розділі (п. 6.2), як і в 2-му розділі (п. 2.5.1) наведені результати досліджень контакту «верхнє кільце – гільза циліндра» ДВЗ, в якому «проковзування», характерне для зубчастого зачеплення, відсутнє. Оскільки основний зміст роботи висвітлює вплив саме проковзування на

трибологічні характеристики контакту, то ці підрозділи (2.5.1) і (6.2), що відображають нестационарність процесу тертя від зміни швидкості вихідної ланки КШМ, на нашу думку, не зовсім вписуються в загальну концепцію роботи.

7. У 7-му розділі наведені результати застосування розроблених критеріїв підвищення довговічності до контактних поверхонь, зміцнених шляхом нанесення самофлюсуючих порошкових покриттів та методом термоциклічного іонного азотування. Бажано було б також з наведених позицій оцінити сучасні технології дискретного зміцнення контактної поверхні і дати порівняльну оцінку зносостійкості напилених, азотованих і дискретно зміцнених поверхонь по відношенню до традиційно термооброблених сталей ШХ15 і 40Х, закономірності структурної пристосованості яких наведені в попередніх розділах роботи.

8. В кінці 7 розділу наведений висновок, що «представлена феноменологічна імовірнісна модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару дозволяє прогнозувати величину зносу» і т.д. Не зовсім зрозумілий механізм застосування вказаної імовірнісної моделі для отримання і аналізу результатів досліджень наведених в цьому розділі.

9. Автор в використовує в роботі не завжди стандартизовані терміни. Наприклад «згинальні напруження» «або напруги вигину» (с. 51). Але відомо, що напружений стан характеризується лише нормальними та дотичними напруженнями у відповідності з тензором напружень.

10. В роботі зустрічаються якісні оцінки досліджуваних процесів типу «відносно малих циклів навантаження» та «значно вищих циклів» (стор. 55) або «характеристиками великими на поверхні і меншими в серцевині» (стор. 56). Бажано було б використовувати кількісні показники.

11. Пункт 2 наукової новизни роботи не може бути віднесений до нових наукових положень, оскільки згідно з рекомендаціями ДАК МОН України запропонована методика розрахунку і методики взагалі трактуються як нові прикладні результати, що впливають з теоретичного доробку дисертанта.

Загальний висновок

Дисертаційна робота “Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи ” є закінченою науково-дослідною роботою, що містить вирішення важливої науково-технічної проблеми управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу змащених трибосистем на основі науково-обґрунтованого вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів.

Незважаючи на наведені вище зауваження, дисертаційна робота у цілому виконана на високому науковому рівні і є завершеною щодо

поставлених завдань. Її нові теоретичні і практичні результати є актуальними, науково обґрунтованими та достовірними. Оформлення, стиль і мова викладення роботи в цілому відповідають встановленим вимогам.

Головні результати дисертаційної роботи опубліковані досить широко і мають національне та міжнародне визнання.

Зміст автореферату відповідає основним положенням і змісту дисертації. Положення і результати, що виносилися дисертантом на захист кандидатської дисертації не використані у докторській дисертаційній роботі.

У цілому робота 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,
завідувач кафедри зносостійкості
і надійності машин Хмельницького
національного університету

Диха О.В.

Підпис завідувача кафедри зносостійкості машин, д.т.н. Дихи О.В.
засвідчую:

Учений секретар Хмельницького національного університету,

к.т.н., доцент

12 червня 2017р.



Тebляшкіна Л.І.