



Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

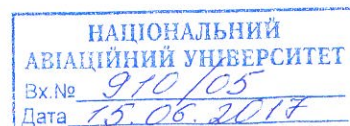
Мікосянчик Оксани Олександрівни

«Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Актуальність теми та її зв'язок з державними науковими програмами. Вирішення проблеми зносостійкості матеріалів на будь-якому рівні, а особливо на нанорівні, несталих умов роботи (характеризуються високими значеннями контактних навантажень, швидкостей, взаємного переміщення і контактних температур) завжди буде на часі і тому потребує системних досліджень, підпорядкованих меті підвищення працездатності трибовузлів машин шляхом забезпечення сумісності їх складових елементів. Дослідження умов утворення стабільних дисипативних структур при структурній пристосовуваності матеріалів контактних поверхонь в присутності мастильного матеріалу дасть можливість управління процесами самоорганізації таких структур, що забезпечить підвищення ресурсу пар тертя. Це може бути здійснено тільки за умови розробки або вибору науково-обґрунтованої методології дослідження процесів контактної взаємодії робочих поверхонь деталей, мастильного матеріалу і довговічності зношеного шару при його утворенні.

Тому тема роботи є безумовно актуальною.

Актуальність теми дисертації та вибраний напрямок досліджень тісно пов'язані з програмою «Державне замовлення на наукові та науково-технічні розробки та державні цільові програми». Дослідження виконані в межах наступних науково-дослідних робіт №ДЗ/499-2009(0109u007638, ДБ№67(0109u002144), ДБ№85(0110u00024) в національному транспортному університеті; №789 – ДБ12(0112u002057), №865 – ДБ13(0113u000084) в національному авіаційному університеті, в яких здобувач був співвиконавцем зазначених тем.



Структура и обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг складає 416 сторінок, обсяг анотації – 27 сторінок. Дисертація містить 107 ілюстрацій (із них тих, що займають повну сторінку – 8), 23 таблиці (тих, що займають повну сторінку – 4). Список використаних джерел із 465 найменувань займає 48 сторінок. Додаток містить 31 сторінку. Обсяг основної частини становить 298 сторінок.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

У **вступі** відображено основні, передбачені нормативними положеннями ДАК МОН України дані, які характеризують роботу, а саме актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, темами, месту та завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, відомості про кількість публікацій.

У **першому розділі** наведено результати аналітичного огляду літературних джерел за темою дисертації, зокрема пов'язаних з оцінкою триботехнічних характеристик фрикційного контакту з урахуванням енергетичних реологічних і структурно-фазових параметрів. Проаналізовані механізми зношування робочих поверхонь евольвентних зубчастих передач; висвітлені фактори, які впливають на силу тертя при граничному режимі мащення; розглянуті механізми утворення вторинних структур; представлені дані щодо триботехнічних та реологічних властивостей граничних змащувальних шарів, впливу деформаційних процесів і структурно-фазових перетворень на зносостійкість контактних поверхонь; детально проаналізовано вплив дотичних напружень зсуву при терті на зносостійкість контактних поверхонь; визначені енергетичні аспекти руйнування поверхневих шарів елементів трибоз'єднань при терті.

За результатами цього розділу проведене обґрунтування актуальності, деталізовано мету і напрямки вирішення поставленої наукової проблеми, а також сформульовано завдання досліджень.

У **другому розділі** описано методологічні основи досліджень триботехнічних характеристик фрикційного контакту в несталих умовах роботи, які базуються на застосуванні системного підходу до вирішення наукової проблеми.

Зокрема, створено: комплексну методику моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних залежностей та спеціального програмного забезпечення, що дозволяє розробляти заходи в управлінні процесами в зоні контакту; програмно-апаратний комплекси (установка тертя, електронний блок, програмне забезпечення «Тертя»), що дає можливість проведення випробувань в умовах кочення, проковзування в розширеному діапазоні (коеф. проковзування від 0 до 100%), реверсивного тертя. Розроблено низку методик для: визначення питомої роботи тертя в контакті; оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу; оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь; розрахунку товщини мастильного шару в трибоз'єднанні коіпресійне кільце – гільза циліндра внутрішнього зоряння. Побудовано феноменологічну імовірносну модель зношування поверхневого шару.

У третьому розділі з використанням методики припрацювання контактних поверхонь в нестационарних режимах роботи визначені закономірності зміни антифрикційних властивостей контакту в умовах чистого кочення та кочення з проковзуванням. Зокрема показано: основним критерієм ефективності антифрикційних властивостей є здатність впливу формувати хемсорбційні плівки з низьким опором зсуву на активованій поверхні металу; зростання проковзування до 20% призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів порядку $0,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Напряга зсуву мастильного матеріалу зростає аналогічно підвищенню моменту тертя; зниження енергонапруженості контакту при 170МПа відбувається за рахунок ефективних демпфіруючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу; залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву пояснюється набуттям мастильним матеріалом властивостей неньютоновських рідин; коливальний процес зміни питомої роботи тертя свідчить про періодичний характер утворення та руйнування вторинних структур; при збільшенні ступеня проковзування з 10 до 40% створюються високі градієнти зсуву змащувальних шарів і підвищується активація контактних поверхонь, що призводить до прискорення періоду прояву перших ознак схоплювання, які проявляються в зростанні адгезійної складової коефіцієнта тертя при десорбції граничних шарів.

У четвертому розділі на основі оцінки структурно енергетичних показників трибоконтакту в процесі утворення дисипативних структур, впливу структури сталей на кінетику зміни енергетичного параметра при терті, аналізу впливу зміни градієнта швидкості зсуву на реологічні і протизношувальні властивості контакту розглянуто механізми утворення вторинних структур при структурній пристосовуваності трибоелементів в процесі експлуатації. Підтверджено експериментально вплив механо-хімічних процесів при терті кочення з різною величиною проковзування на зносостійкість контактних поверхонь.

У п'ятому розділі запропоновано критерії оцінки зносостійкості контактних поверхонь за умов динаміки навантаження, а саме: інтенсивність тепловиділення у фрикційному контакті; локальний приріст температури; глибина поширення напружено-деформованого стану; розподіл мікротвердості по поверхневому шарі (усереднений показник розподілу мікротвердості, градієнт мікротвердості, ефективна мікротвердість); градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів і інш. Проводились дослідження впливу різного ступеня проковзування контактних поверхонь на кінетику зміни питомої роботи тертя, міцнісних властивостей поверхневих шарів металу і зносостійкість контактних поверхонь в умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зоні контакту та переходу трибосистеми в екстремальні умови тертя, а також дослідження з використанням запропонованих критеріїв оцінки зносостійкості. Встановлено механізми, що зумовлюють вплив температурних і механічних факторів на напружено-деформований стан поверхонь при їх контактній взаємодії.

У шостому розділі розглянуто моделювання процесів зношування пар тертя в несталих умовах роботи. Запропоновано термо-кінетичну модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту, а також методи оцінки параметрів, що входять в модель утомного зношування, яка описує довговічність області багатоциклової втоми. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що провідними факторами, які впливають на довговічність поверхневого шару, є контактний тиск, швидкість ковзання і температура. Наводиться залежність для розрахунку

інтенсивності зношування елементів трибоз'єднань, що працюють за умов кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту. Отримано емпіричну залежність величини максимальних дотичних напружень з урахуванням триботехнічних параметрів контакту при коченні з проковзуванням до 40%. Доведено, що зниження товщини мастильної плівки є домінуючим чинником в локалізації вектора дотичних напружень при терті. Запропоновано емпіричну залежність глибини залягання максимальних дотичних напружень.

У **сьомому розділі** наведено результати досліджень в напрямку підвищення зносостійкості контактних поверхонь шляхом застосування технологій зміцнення та модифікування поверхневих шарів. Зокрема: досліджено вплив товщини покриття самофлюсуючого порошку ПГ-АН9 на триботехнічні властивості контакту та встановлено механізм структурної пристосовуваності з позицій активації поверхневих шарів металу; в умовах кочення з проковзуванням спостерегалось зниження антифрикційних властивостей в контакті, що обумовлено підвищенням напруги зсуву змащувальних шарів; виявлено підвищення термомеханічної стійкості граничних шарів, сформованих на сталі 40X (термоциклічне іонне азотування) в 1.7 рази в порівнянні з граничними шарами, утвореними загартуванням + відпуск; встановлено залежність зносу сталі 40X від типу мастильного матеріалу; побудовано феноменологічну імовірнісну модель послідованого зносу субшарів поверхневого шару для прогнозування процесів накопичення трибопошкоджень і, як наслідок, величини зносу контактних поверхонь в залежності від часу роботи пар тертя.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі отриманих теоретичних та експериментальних результатів досліджень, які наведені в кінці кожного розділу та в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

Список літературних джерел включає 465 найменувань, що свідчить про глибоке і ґрунтовне опанування дисертантом обробленої інформації за обраною тематикою та її аналіз.

У додатках наведені: структура та функціональна схема електронного блоку керування програмно-апаратним комплексом для оцінки трибологічних характеристик трибоелементів; функціональні схеми програмних модулів програмного забезпечення «Тертя»; моделювання НДС зубчастої передачі; список публікацій за темою дисертації; акти впровадження та реалізації наукових досліджень.

Наукова новизна роботи. У відповідності з метою досліджень дисертантом розроблені наступні наукові положення. Розроблено термо-кінетичну модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи. Запропоновано методика розрахунку інтенсивності зношувашся елементів трибоз'єднань, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту та довговічність debris-шару. Вперше розроблена математична модель оцінки локалізації вектору максимальних дотичних напружень при переході системи від гідродинамічного до граничного режиму мащення на основі експериментально встановленої зміни напружено-деформованого стану поверхонь, як результату появи зон локального підвищеного зносу, градієнтного розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині. Вперше встановлено залежність зносостійкості контактних поверхонь від структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Розкрито механізми зношування трибоелементів в результаті зміни енергоємності контакту при структурній пристосовуваності вторинних структур на підставі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь. Вперше теоретично і експериментально обґрунтовано механізм прояву процесу схоплювання тертьових поверхонь з позицій фазових переходів в граничних шарах мастильного матеріалу, а також встановлені механізми, які визначають зміну реологічних параметрів граничних змащувальних шарів при надбанні мастильним матеріалом неньютонівських властивостей. Запропоновано модель оцінки триботехнічних характеристик трибоз'єднання компресійне - кільце-гільза циліндра двигуна

внутрішнього згоряння, а також створено методику оцінки змащувальних, антифрикційних, реологічних характеристик мастильних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом забезпечення сумісності трибоелементів на основі науково-обґрунтованого застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь мастильних матеріалів та довговічності зношуваного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя. Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань програмно-апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту. Запропоновано спосіб припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя на підставі оцінки завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей мастильного матеріалу. Створено рекомендації щодо товщини, фізико-механічних властивостей та структурної пристосовуваності зносостійких покриттів з урахуванням локалізації максимальних дотичних напружень зсуву при різних режимах мащення. Програмно-апаратний комплекс, програмне математичне забезпечення, способи і методики використовуються при наукових дослідженнях, виборі складу, структури та технології нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення.

Достовірність результатів та висновків. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у роботі, обґрунтовані достатньо переконливо та повно. Достовірність і обґрунтованість одержаних у дисертації наукових положень підтверджуються коректною постановкою наукової проблеми, використанням апробованого математичного апарату, збігом результатів теоретичних досліджень з результатами проведених експериментальних досліджень, упровадженням технології у виробництво.

В роботі застосовано комплексний підхід до наукових досліджень, який забезпечив всебічне і глибоке вивчення та аналіз процесів, які відбуваються у

контакті при несталих режимах тертя. При цьому використані сучасні експериментальні методи: рентгеноструктурні методи для визначення кристалографічної текстури у поверхневому шарі деталей і структурно-фазових змін; методи рентгенівського аналізу для дослідження особливостей мікроструктури поверхневого шару, вмісту та розподілу легуючих елементів у дискретній поверхні; методи інженерної механіки для дослідження залишкових напружень, мікротвердості, триботехнічних характеристик матеріалів в умовах зношування при коченні і коченні з проковзуванням. Всі експериментальні дослідження, а також роботи з впровадження підтвержені відповідними актами.

Повнота викладення основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях. Основні результати дисертаційних досліджень Мікосянчик О.О. опубліковані в 50 наукових працях, у тому числі: 27 праць у фахових виданнях переліку МОН України; 5 наукових праць в іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних; 13 матеріалів та тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах; розробки захищені 4 патентами і свідоцтвом на винахід. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

Загальні зауваження до змісту та оформленню дисертації і автореферату.

1. На початку розділів 2 – 7 наводиться обґрунтування необхідності проведення досліджень на підставі чого формулюється мета. Це доцільніше було б навести у другому розділі.

2. Проведено аналіз механізмів зношування зубчастих передач по профілю зубів тільки для передач з евольвентним зачепленням. Визначення навантажувальних параметрів слід було б більш детально обґрунтувати в залежності від експлуатаційних умов роботи конкретних механізмів.

3. При проведенні експериментальних досліджень використані матеріали з яких зубчасті колеса майже не виготовляються, наприклад, сталь 45. Моделювання процесів в контакті слід було б провести також і з використанням кольорових металів, наприклад, бронзою.

4. Має місце використання одних і тих же символів у математичних виразах, наприклад, N для формули 2.4, та розрахунку довговічності (с.124).

До розділу 1.

1. Автор використовує вираз «критичні режими роботи», однак не пояснює ці умови роботи пар тертя.

2. Здобувач справедливо робить висновок, що встановлення механізмів утворення вторинних структур на поверхнях елементів трибоз'єднань дозволяє керувати вибором оптимальних поєднань триботехнічних властивостей контактних поверхонь і мастильних матеріалів в залежності від умов експлуатації вузлів тертя забезпечуючи умови їх сумісності, однак зовнішні умови і механізми утворення вторинних структур 1 і 2 типів характеризуються суттєвими відмінностями, на що слід було б звернути увагу.

До розділу 2.

1. В методиці оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу при критичних режимах тертя вказується на наявність пружно-пластичної деформації в зоні фрикційного контакту, але не пояснюється, яким чином проводилась ідентифікація того чи іншого виду деформації.

2. В методиці оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталих режимах роботи пар тертя немає чіткості в формулюванні «до прояву перших ознак схоплення елементів трибоспряжень».

До розділу 3.

1. На стор. 179 автор стверджує «внаслідок зменшення гідродинамічної складової товщини мастильного шару вектор дотичного напруження зсуву локалізується в основному в сформованому граничному шарі, що аналогічно результатам, наведеним у роботі [462]». Немає пояснення по тексту, чому дотичні напруження зсуву локалізуються в граничному змащувальному шарі.

2. У висновку №9 до розділу 3 с. 186 автор стверджує, що зростання градієнту швидкості зсуву за наявності проковзування в контакті призводить до часткової дезорієнтації граничних адсорбованих шарів мастильного матеріалу, що проявляється в зниженні ефективної в'язкості в 25:16:12 разів. По тексту немає

пояснень як визначалась дезорієнтація та яким чином це пов'язано з ефективною в'язкістю.

До розділу 4.

1. В роботі акцентується увага на тому, що при мінімальному проковзуванні 3% в контактні домінують процеси, які спричиняють пластифікування поверхневих шарів металу і зниження їх зносостійкості. Для підтвердження цього наведені результати по зниженню мікротвердості, однак причини, які викликають пластифікування не розкриті в повному обсязі.

До розділу 5.

1. На стор. 220 автор стверджує, що на контактних поверхнях установлена найбільша ступінь деструкції граничних змащувальних плівок, яка в умовах граничного режиму мастильної дії становить 30% від усього періоду роботи (рис. 5.6). Далі по тексту не наводиться пояснення до терміну «конструкція» і не зовсім зрозуміло, що автор вкладає в це поняття.

2. На стор. 222 підкреслюється важливість утворених вторинних структур «для даних контактних поверхонь збільшення зносостійкості здійснюється за рахунок формування стабільних граничних хемосорбційних плівок мастильного матеріалу, стійких високоміцних вторинних структур, які перешкоджають поширенню пластичної деформації вглиб металу». Про структури якого типу йде мова?

До розділу 6.

1. Автор на стор. 269 справедливо стверджує, що «найчастіше на процес зношування істотний вплив відводиться мастильному матеріалу, тому логічно розглянути його в якості головного чинника, що формує коефіцієнт ΔG_d , який враховує вплив зовнішнього середовища». Однак цей коефіцієнт аналізується в роботі стосовно рідких та твердих змащувальних матеріалів. Але існує ще один важливий клас змащувальних матеріалів – пластичні та напіврідкі мастила, які в представленій роботі не розглядаються.

До розділу 7.

1. Дисертантом встановлено високу змащувальну здатність трансмісійної оливи ТС-гіп на покритті з порошку ПГ-АН9, але з тексту не зрозуміло, чому

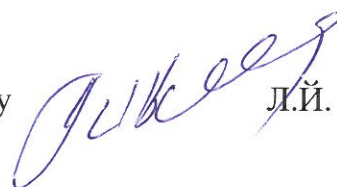
використовується саме цей мастильний матеріал та які перспективи використання інших олів трансмісійної групи.

Загальний висновок по роботі.

Дисертація Мікосянчик О.О. «Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи» є закінченою науковою працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, направлені на вирішення важливої проблеми підвищення зносостійкості вузлів тертя шляхом підбору сумісності трибо елементів на основі довговічності зношуваного шару при самоорганізації дисипативних структур в нестационарних умовах тертя.

Дисертаційна робота у цілому виконана на високому науковому рівні, її результати є актуальними, обґрунтованими та достовірними. Оформлення та стиль викладання роботи в повній мірі відповідає вимогам пунктів 9, 10, 13 «Порядку присудження наукових ступенів – присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». Затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 (зі змінами) до докторських дисертацій, а її автор, Мікосянчик Олена Олександрівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Доктор технічних наук, професор,
директор машинобудівного інституту
Запорізького національного технічного університету



Л.Й. Івченко

Підпис

доктора технічних наук, професора Івченка Л.Й.
Засвідчую
Вчений секретар Вченої ради
Запорізького національного технічного
університету, к. соц. наук, доцент



В.В. Кузьмін