

Вченому секретарю спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.06
Михайлу СВИРИДУ
Державний університет
«Київський авіаційний інститут»
просп. Любомира Гузара, 1
м. Київ, 03058

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Хімко Маргарити Сергіївни

«Підвищення зносостійкості шарнірних підшипників застосуванням
металополімерних та полімерних композиційних матеріалів»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Актуальність теми дослідження

Шарнірні підшипники ковзання отримали широке розповсюдження в машинобудуванні та авіаційній промисловості. Вони призначені для передачі великих вібраційних та ударних радіальних, осьових і комбінованих навантажень при низьких швидкостях ковзання у рухомих з'єднаннях машин та механізмів.

В сучасному авіабудуванні дуже популярні шарнірні підшипники ковзання, в яких використовуються металополімерні та полімерні композиційні матеріали. Такі підшипники є компактними, відрізняються надзвичайно високою несучою здатністю, вантажопідйомністю та не вимагають технічного обслуговування. Їх застосовують в опорах ракетних та газотурбінних двигунів, а також опорах шасі та системах керування літаків цивільної авіації, зокрема Ан-124, Ан-225, В-777, В-787, А330, А340. Але конструкція та матеріали зазначених підшипників не змінювались десятками років.

З розвитком сучасних технологій на ринку з'явився широкий спектр нових підшипників та втулок ковзання, які використовують металополімерні та полімерні композиційні матеріали. Тому на основі аналізу авіаційних шарнірних підшипників ковзання з металополімерними стрічками, які були створені відповідно до ГОСТ 3635-78, виникла необхідність у проведенні порівняльних триботехнічних досліджень нових сучасних антифрикційних полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати в таких підшипниках.

Враховуючи зазначене тема дисертаційної роботи, дослідження якої були спрямовані на вирішення науково-практичної задачі підвищення зносостійкості авіаційних шарнірних підшипників ковзання з полімерними композиційними матеріалами без обслуговування в міжремонтний період та розширення їх номенклатури для авіаційної промисловості, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана згідно з планами та договорами між Національним авіаційним університетом та іншими організаціями. Автор був відповідальним виконавцем та співвиконавцем 7 держбюджетних та госпдоговірних тем:

1. № 2023/39/UA, № 2024/139/UA між Авіакомпанією ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС» та Національним авіаційним університетом про співпрацю та наукове консультування.

2. № 549-X08 (АН01-60(08) «Проведення досліджень та видача рекомендацій по вибору покриття вузлів шасі», 2010 рік. Автором проведено аналіз покриттів хрому та молібдену на зносостійкість в умовах фретинг-корозії.

3. № 88/07.02.02 «Підвищення працездатності конструкцій з авіаційних матеріалів шляхом поверхневого зміцнення та відновлення деталей трибосистем», 2014-2017 роки. Автором проведено аналіз працездатності трибосистем авіаційних конструкцій в повітряних суднах та авіаційних двигунах.

4. № 110/07.02.02 «Технологічні методи підвищення працездатності елементів авіаційних трибомеханічних систем», 2018-2022 роки. Автором проведено дослідження зносостійкості металополімерних матеріалів при реверсивних рухах.

5. № 1049-X16 «Розробка методики та вдосконалення обладнання для випробувань шарнірних підшипників», 2016 рік. Автором розроблено методику для проведення випробувань шарнірних підшипників великих розмірів.

6. № 1050-X16 «Проведення науково-технічних випробувань шарнірних підшипників. Експертний аналіз працездатності та геометрії підшипників: ШС6ЮТ, ШМ6ЮТ, ШМ8ЮТ, ШМ10ЮТ, ШМ30ЮТ, ШНР6ЮТ, ШН8ЮТ, ШН10ЮТ, ШН12ЮТ, ШН15ЮТ, ШН17ЮТ, ШН20ЮТ, ШН25ЮТ, ШН30ЮТ, 6ШН20ЮТ», 2016-2018 роки. Автором проведено дослідження металополімерних підшипників типу ШН30ЮТ, GE30DE5 та GE30EW-2RS та їх порівняльний аналіз.

7. № 1.0668.2021 «Випробування підшипників ШНР6ЮТ та ШН10ЮТ і проведення їх аналізу відповідності ГОСТУ 3635-78. Експертний аналіз працездатності та геометрії підшипників ШНР6ЮТ, ШН10ЮТ», 2021-2022 роки. Автором проведено дослідження металополімерних матеріалів, що використовуються для створення підшипників серії ШН. Автор дисертаційної роботи був відповідальним виконавцем роботи.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 244 сторінки, з них 159 сторінок основного тексту.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження. Тобто визначена основна інформація, яка характеризує роботу та передбачена нормативними положеннями.

У першому розділі автором розглянуто аналіз використання антифрикційних полімерних та металополімерних композиційних матеріалів, які застосовуються в сучасному авіабудуванні як підшипники ковзання.

Автор показав, що існує тенденція впровадження у важконавантажені вузли машин, шарнірні підшипники з полімерними антифрикційними композиційними матеріалами, які не потребують технічного обслуговування впродовж всієї роботи. Це особливо актуально в авіаційній галузі, де прагнуть переведення обслуговування вузлів повітряних суден за технічним станом.

Представлено аналіз структур полімерних антифрикційних композиційних матеріалів для застосування їх в підшипниках ковзання. Зроблено аналіз найбільш сучасних та зносостійких видів композиційних матеріалів. Представлено технологічні аспекти нанесення та виготовлення композиційних матеріалів у підшипниках ковзання. Визначено, що впровадження в шарнірні підшипники високотехнологічних полімерних композиційних матеріалів дозволить підвищити довговічність та зносостійкість пар тертя за рахунок використання повної товщини полімерного матеріалу та розробленні підшипників з прогнозованими характеристиками під конкретну задачу.

Автор, ґрунтуючись на зазначеному, визначив мету роботи та напрями теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі розроблено методику та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних і полімерних композиційних матеріалів, які можна використовувати у підшипниках ковзання для авіаційної промисловості. Випробування матеріалів та підшипників на низці установок дозволяє отримати спеціальний сертифікат додаткового типу STC (supplemental type certificate), який видається за наявності ресурсних лабораторних та промислових випробувань.

Розроблено методику дослідження композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах, яка дозволяє проводити випробування матеріалів як на лабораторних зразках, так і на реальних шарнірних підшипниках ковзання діаметром до 12 мм. Також на базі цієї установки було розроблено методику досліджень матеріалів та покриттів при низькочастотних реверсивних рухах на лабораторних зразках.

Розроблено унікальну методику та лабораторну установку для ресурсних випробувань шарнірних підшипників для авіаційної промисловості. Установка дозволяє випробовувати реальні готові шарнірні підшипники та визначати ресурс в залежності від умов навантаження, роботи та середовища.

Автором обґрунтовано застосування статистичного аналізу для триботехнічних параметрів, що спрямовані на виявлення суттєвих змінних і отримання представлень про індивідуальні та спільні зв'язки з реальними триботехнічними характеристиками композиційних матеріалів та трибопар в цілому.

У третьому розділі автором проаналізовано та вибрано найбільш оптимальні структури полімерних композиційних матеріалів. Визначено високоефективні антифрикційні матеріали з різною структурою (Zedex ZX-324VMT, Fluroglide wear solid, Iglidur TX1 та металополімерна стрічка Ф-4К15М5), які підвищують зносостійкість та довговічність шарнірних підшипників для авіаційної галузі.

Дослідженнями встановлено, що армуючі компоненти та наповнювачі в композиційних матеріалах відіграють першочергове значення в забезпеченні зносостійкості полімерних матеріалів при підвищенні навантаження, низькочастотних вібраційних випробуваннях та випробуваннях на реверсивне тертя. Визначено, що полімерний композиційний матеріал Fluroglide, який складається з армуючої тканини з додаванням матеріалу PTFE та функціональними добавками, показує високі триботехнічні характеристики.

Встановлені механізми прояву релаксаційних процесів у композиційних матеріалах в умовах швидкодіючих низькочастотних реверсивних рухів:

релаксація локальних напружень в металополімерній стрічці відбувається за рахунок підвищення мікропластичності та зростання внутрішнього тертя проміжного шару бабіту, а в композиційному матеріалі на полімерній основі (до 35-65 % сполучника) релаксації напружень сприяє в'язкопружність матеріалу.

Проведено дослідження трибохарактеристик матеріалів внутрішньої обойми шарнірних підшипників для авіаційної промисловості. Встановлена висока зносостійкість покриття молібдену в умовах фретинг-корозії. При 20 та 30 МПа дане покриття на сплаві ВТ-22 характеризується зменшенням лінійного зносу в 2,6 та 1,2 рази відповідно порівняно з покриттям на сталі 95Х18Ш.

Запропоновано використання сплаву ВТ-22 як внутрішньої обойми з нанесенням на його поверхню покриття молібдену вакуумно-дуговим методом товщиною в 70 мкм. Представлено економічний розрахунок доцільності використання титанових матеріалів замість сталей в конструкціях авіаційних шарнірних підшипників з антифрикційними композиційними матеріалами.

У четвертому розділі проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища на полімерні композиційні матеріали. Визначено механізм збільшення лінійного зносу полімерних композиційних матеріалів в 1,5-1,9 разів порівняно з металополімерною стрічкою при підвищенні температури до 60 °С, який полягає у збільшенні деструкційних процесів внаслідок термо-механічного впливу в умовах реверсивного ковзання, низькій теплопровідності сполучника та армованих волокон.

Проведено моделювання напружено-деформованого стану шарнірних підшипників з полімерними та металополімерними композиційними матеріалами в системі SOLIDWORKS Simulation Premium. Розроблено модель шарнірних підшипників з композиційними матеріалами та варіантами комбінацій з матеріалами обойм підшипників, що виконані із сплаву ВТ-22 та сталі 95Х18Ш.

Визначено, що матеріали Zedex ZX324VMT та Iglidur TX1 при моделюванні напружено-деформованого стану знижують максимальне питоме напруження на 50 % в матеріалі при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН порівняно з металополімерною стрічкою. Моделюванням напружено-деформованого стану шарнірних підшипників з антифрикційними композиційними матеріалами доведено зменшення питомих напружень у поверхневих шарах матеріалів підшипників при використанні титанових сплавів ВТ22 замість підшипникової сталі 95Х18Ш до 20 % в залежності від матеріалу та умов навантажень.

За результатами оцінки встановлено, що використання вуглецевих волокон в чистому вигляді підвищує нормальні еквівалентні напруження по Мізеру в

1,27 раз та в 1,2 рази при моделюванні розташування волокон даного типу на обоймі зі сталі 95Х18Ш та сплаві ВТ-22 відповідно порівняно з металополімерною стрічкою.

Представлено теоретичні розрахунки довговічності шарнірного підшипника з урахуванням режимів роботи у важелі автомату перекосу гелікоптера. Розрахунок представлено на прикладі одного робочого дня гелікоптера Мі-8МТВ-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезенні пасажирів та вантажів. Встановлено при розрахунках довговічності шарнірного підшипника – 5891 годину роботи, що більше необхідного ресурсу, який визначений технічною документацією в 2000-2500 годин роботи на автоматі перекосу.

У п'ятому розділі представлені результати лабораторних ресурсних випробувань шарнірних підшипників з композиційними матеріалами. Визначено, що підшипники з матеріалом з вуглецевих волокон та функціональних добавок показує зносостійкість в 1,8-2 рази більшу на відрізку 40-100 тис. циклів, ніж підшипники з іншими матеріалами.

За результатами лабораторних ресурсних випробувань встановлена висока працездатність полімерних композиційних матеріалів Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide. Максимальний осьовий зазор в шарнірних підшипниках з даними матеріалами становив 0,25, 0,17 та 0,13 мм відповідно при напрацюванні 100 тис. циклів при низькочастотному амплітудному коливанні, що відповідає допустимому осьовому зазору при експлуатації підшипників (до 0,3 мм).

За результатами стендових випробувань шарнірних підшипників з імітацією режимів роботи важеля автомату перекосу гелікоптера типу Мі-8МТВ-1 після 2 млн. циклів встановлено зменшення осьового зазору при використанні полімерних композиційних матеріалів Fluroglide на 33 %, Zedex ZX-324VMT на 10-15 % та Iglidur TX 1 на 19-23 % порівняно з осьовим зазором підшипника з металополімерною стрічкою.

Розроблені технологічні рекомендації щодо виробництва підшипника з полімерними антифрикційними матеріалами для авіаційної промисловості. Впровадження технологічних рекомендацій на основі створення рельєфної поверхні внутрішньої поверхні зовнішньої обойми підшипника, кріплення полімерного композиційного матеріалу з урахуванням його структурної схеми армування у виробництво шарнірних підшипників сприятиме виготовленню підшипників з прогнозованими характеристиками під певні експлуатаційні умови роботи без технічного обслуговування в міжремонтний період.

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 174 найменувань, що свідчить про глибоке і ґрунтовне опанування дисертантом обробленої інформації за обраною тематикою та її аналіз.

У додатках представлено: акти впровадження наукових досліджень та акт промислових випробувань шарнірних підшипників; трибомеханічні характеристики полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання; характеристики та документація щодо шарнірних підшипників з металополімерної стрічки; розрахунок економічної доцільності заміни сталевих обойм шарнірних підшипників на обойми з титанових сплавів; документація з наробіток вертольоту типу Мі-8МТВ-1 державний номер UR-NZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезенні пасажирів та вантажів авіакомпанії «НЗОПЕРЕЙШИНЗ»; технічна документація щодо розташування та технічного обслуговування підшипників у важелі автомату перекошу гелікоптера Мі-8МТВ-1; приклад математичного обчислення середнього значення, стандартного відхилення, третього та четвертого моменту, коефіцієнту кореляції та стандартних помилок коефіцієнтів кореляції при дослідженнях полімерних та металополімерних матеріалах; список публікацій за темою дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше встановлено підвищення зносостійкості та антифрикційних властивостей полімерних композиційних матеріалів при контактних навантаженнях до 30 МПа за рахунок розподілу полімерного матеріалу PTFE між армованими волокнами внаслідок механодеструкції полімерної матриці, що сприяє рівномірному розподілу контактного навантаження в зоні тертя, яке сприймається, переважно, армуючою складовою полімерного композиційного матеріалу.

2. Набула подальшого розвитку реологія зносостійкості контактної взаємодії полімерних композиційних матеріалів: розсіювання механічної енергії при низькочастотних реверсивних рухах та механо-термічних деформаціях забезпечується релаксацією локальних напружень як в'язкопружними властивостями полімерного термопластичного сполучника, так і властивостями міцності армуючих компонентів.

3. Вперше отримано розрахункову модель оцінки напружено-деформованого стану шарнірних підшипників з підвищеним коефіцієнтом запасу міцності в діапазоні навантажень 3-200 кН при низькочастотних амплітудних коливаннях за рахунок використання армованих вуглецевими волокнами полімерних композиційних матеріалів, що сприяє зниженню максимальних нормальних напружень в 1,5-2 рази порівняно із стандартними шарнірними підшипниками з металополімерною стрічкою.

4. Вперше запропоновано використання сплаву ВТ-22 як внутрішньої обойми з нанесенням на його поверхню покриття молібдену або твердого хрому вакуумно-дуговим методом для підвищення довговічності конструкцій шарнірних підшипників за рахунок вищої зносостійкості, більшої демпфуючої здатності в умовах вібрацій, релаксації локальних пікових динамічних напружень титанового сплаву ВТ-22 порівняно з сталлю 95Х18Ш.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено методику оцінки триботехнічних показників композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах, що підтверджено актом про реалізацію наукових досліджень ТОВ Науково-виробнича фірма «МС АВІА-ГРЕЙД».

2. Модернізовано спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних і полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості, що зазначено в акті про реалізацію наукових досліджень в ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС».

3. Удосконалено технологію виробництва авіаційних шарнірних підшипників без обслуговування в міжремонтний період на основі формування рельєфної поверхні для кріплення полімерного композиційного матеріалу до зовнішньої обойми, вибору полімерних композиційних матеріалів та виготовлення внутрішньої обойми підшипника з поверхнево зміцненого титанового сплаву, що зазначено в акті впровадження результатів наукових досліджень в ТОВ «Aviaservice».

4. Розроблено структурну схему досліджень полімерних композиційних антифрикційних матеріалів та впровадження шарнірних підшипників на базі цих матеріалів для отримання додаткового сертифікату типу STC у важелі автомату перекошу гелікоптерів серії Мі, які працюють на африканському континенті у підтримку міжнародних місій, що підтверджено протоколом досліджень №17897-SB-879/15Н та актом впровадження наукових досліджень в

авіаремонтному підприємстві AAL GROUP LTD від 01.05.2024 року, Шарджа, ОАЄ.

5. Розроблено та впроваджено в практику експериментальних досліджень спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи (патент 92071).

Достовірність результатів та висновків

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

Основні дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях трибології, матеріалознавства, реологічної концепції зносостійкості матеріалів, фізико-хімічних процесів, теорії самоорганізації та математичного аналізу. Трибологічні дослідження виконані на стандартних та розроблених сучасних машинах тертя згідно з ЕТУ 100-4, ГОСТ 3635-78, ГОСТ 23.211-80, DIN ISO 12240-1 (DIN 648) та вимог СТП 651.02.061-92; використано оптичну та растрову електронну мікроскопію, рентгеноспектральний аналіз; вимірювання твердості проводили за методами Роквела, Брінеля та Шора, металофізичні дослідження проводили на мікроскопі інтерферометрі; параметри профілю рельєфу визначали за допомогою профілографа-профілометра. Використовувались прилади типу: твердоміри ПМТ-3, ТШ-Ц згідно з DIN EN ISO 868, ASTM D 2240, ISO 7619; мікроскопи МБС-9, МИМ-8, НЕОФОТ 21, SIGETA PRIZE NOVUM; профілометри SJ-201P, HANDYSURF 550 згідно з ISO 17025:2017; мікроаналізatori CamScan 4DV, INCA 200 Energy. Всі експериментальні дослідження, а також роботи з впровадження підтверджені відповідними актами.

Повнота викладених результатів дисертації у наукових фахових виданнях

За темою дисертації автором опубліковано 17 наукових праць, у тому числі: 9 статей у фахових виданнях переліку МОН України; 1 стаття у іноземному спеціалізованому виданні; 6 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях та 1 патент. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

Загальні зауваження до змісту та оформленню дисертації та автореферату

1. В дисертаційній роботі визначено аналітичним шляхом три типи композиційних антифрикційних матеріалів з різною структурою, але не визначено точного хімічного складу для матеріалів Zedex та Iglidur.

2. Здобувачем встановлено та доведено подальший розвиток реологічної теорії контактної взаємодії полімерних композиційних матеріалів, враховуючи термопластичний сполучник та властивості армуючих компонентів, але без урахування твердих мастильних матеріалів. Було б доречно це врахувати.

3. При моделюванні шарнірних підшипників автор роботи розробив спрощену модель шарнірного підшипника з урахуванням лише двох компонентів (матеріалу PTFE та основного композиційного матеріалу). В реальності композиційний матеріал може містити до десяти компонентів різної природи та з різними властивостями. Було б доцільно перенести результати моделювання на розподіл напружено-деформованого стану в реальному підшипнику.

4. При розрахунках довговічності шарнірних підшипників (сторінка 162) автор робив припущення лише для певної категорії шарнірних підшипників, які розташовані у вузлах автомату перекошу лопотів гелікоптера. Було б доречно зробити розрахунки довговічності для інших вузлів, які також використовують шарнірні підшипники, наприклад, шасі.

5. Не зрозуміло, чому при дослідженнях триботехнічних характеристик матеріалів для внутрішньої обойми шарнірних підшипників (сторінка 112) застосовувалась різна товщина гальванічних та вакуумно-дугових покриттів.

6. Не зрозуміло, чому у п'ятому розділі (сторінка 175) для промислових досліджень визначено титановий сплав R56260, а в попередніх розділах в дослідженнях застосовується титановий сплав BT-22.

Загалом зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

Загальний висновок по роботі

Не дивлячись на наведені зауваження, які значною мірою мають дискусійний характер і суттєво не впливають на загальний зміст отриманих результатів, визначаю позитивну оцінку роботи, яка виконана здобувачем і представлена в його дисертації.

Дисертаційна робота М.С. Хімко «Підвищення зносостійкості шарнірних підшипників застосуванням металополімерних та полімерних композиційних матеріалів» є закінченою науковою працею, в якій отримано нові науково-

обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, спрямовані на вирішення важливої задачі підвищення зносостійкості та довговічності шарнірних підшипників з композиційних матеріалів для гелікоптерів, які працюють у важких умовах експлуатації.

Дисертаційна робота в 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, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами), до кандидатських дисертацій, а її автор, Хімко Маргарита Сергіївна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент
учений секретар Сектору
фізико-технічних і математичних наук
Науково-організаційного відділу
І Президії НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Сергій БЕСПАЛОВ

