МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Хімко Маргарита Сергіївна

УДК 629.735.025

«ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ»

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах
Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мнацаканов Рудольф Георгійович,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
професор кафедри підтримання льотної придатності
повітряних суден Аерокосмічного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Беспалов Сергій Анатолійович,
Сектор фізико-технічних і математичних наук
Науково-організаційного відділу Президії
Національної академії наук України, вчений секретар

кандидат технічних наук, доцент
Шимчук Сергій Петрович,
Луцький національний технічний університет,
доцент кафедри галузевого машинобудування

Захист дисертації відбудеться «10» червня 2025 р. об 11^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Державного університету «Київський авіаційний інститут» за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корпус 1, ауд. 1.334.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Державного університету «Київський авіаційний інститут» за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1 та на сайті http://asdoc.nau.edu.ua/golovne-menyu/specz%D1%96al%D1%96zovan%D1%96-vchen%D1%96-radi-z-prisudzhennya-stupenya-doktora-nauk/specz%D1%96al%D1%96zovana-vchena-rada-d-26.062.06/05.02.04-%C2%ABtertya-ta-znoshuvannya-v-mashinax%C2%BB

Автореферат розісланий «7» травня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент Михайло СВИРИД

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасному машинобудуванні та авіабудуванні все більше застосовують металополімерні та полімерні композиційні матеріали (КМ). Застосування полімерних КМ у підшипниках ковзання виключає повністю обслуговування даного вузла в міжремонтний період, що особливо важливо для авіації, де намагаються перевести вузли повітряних суден (ПС) на технічне обслуговування (ТО) за фактичним станом.

Шарнірні підшипники (ШП) ковзання із полімерними КМ в авіаційній промисловості використовуються масово. В ПС таких як: Ан-124, Ан-225, В-777, В- 787, А330, А340 та ін. застосовуються більше тисячі таких підшипників. На металополімерних КМ працюють опори ракетних та газотурбінних двигунів в літаках цивільної авіації. Їх використовують в опорах шасі та системах керування ПС. Конструкція ШП із металополімерними матеріалами та матеріал металополімерної стрічки (МПС), який входить в її склад, не змінювались десятками років.

Із розвитком сучасних технологій на ринку з’являються багато високо-інженерних полімерних КМ, які випереджають за своїми триботехнічними характеристиками МПС. Стандартизовані підшипники та втулки ковзання з металополімерними вставками випускаються цілим рядом фірм: INA, SKF, FLURO, Koyo, FAG та ін. Також існують фірми (IGUS, ZEDEX, ELGES), які пропонують для використання у вузлах тертя полімерні антифрикційні матеріали. Номенклатура налічує майже 250 видів антифрикційних матеріалів для одної фірми. Це, як правило, дисперсійно зміцненні полімерні КМ із додаванням армованих волокон (нановолокна або неперервні волокна).

Підвищенням довговічності та зносостійкості полімерних композиційних матеріалів займались Wang F., Zhu W., Rowe W., Белий В.А., Гаркунов Д.Н., Горячева І.Г., Черський І.Н., Рабінович Е., Савьера Г., Лебедев В.В. та ін. В Україні питаннями тертя та зношування полімерних КМ займаються Чернець М.В., Буря О.І., Морозов О.Ф., Кончиць А.А., Диха О.В., Мнацаканов Р.Г. та ін. Ці вчені внесли істотний вклад у вирішення проблеми зносостійкості вузлів тертя шляхом застосування полімерних КМ у підшипниках ковзання. Було розроблено та запропоновано велику кількість матеріалів із прогнозованими трибологічними характеристиками.

Наявні сучасні композиційні антифрикційні матеріали не було досліджено в специфічних умовах роботи ШП ковзання для авіаційній галузі. Складність полягає в тому, що неможливо визначити універсальний КМ для широкого діапазону амплітуд та навантажень. Лише в останні роки з’явились високотехнологічні інженерні полімери, які здатні перекривати широкі діапазони по навантаженню, температурі та швидкості ковзання. КМ на основі таких полімерів в певному діапазоні температур здатні конкурувати із металевими парами тертя. Наявні в літературі відомості показують, що питання, пов’язані із застосуванням полімерних КМ у авіаційних підшипниках ковзання вирішені частково, тому необхідно було проведення ряду досліджень для відповіді на поставлені задачі.

Як правило, в зоні фрикційної взаємодії контактних поверхонь трибосистеми з полімерними КМ протікають складні фізико-хімічні процеси: механічна і

термоокислювальна деструкція макромолекул сполучника, структурно-фазові перетворення з утворенням нових функціональних груп, самоорганізація дисипативних структур, що забезпечують суттєве підвищення характеристик матеріалу. Особливості структури і деформаційних властивостей полімерних КМ необхідно враховувати при проектуванні трибосполучень та виборі матеріалу для ШП ковзання в авіаційній галузі.

Таким чином, проведення комплексних досліджень, направлених на оцінку протизношувальних та антифрикційних показників металополімерних та полімерних КМ за стандартними та удосконаленими методиками відповідно до умов роботи ШП, дозволить розробити рекомендації щодо вибору та впровадження нових матеріалів з підвищеними триботехнічними характеристиками.

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 наступних держбюджетних та хоздоговорних тем:

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

2. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 549-Х08 (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. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 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. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 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. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 1049-Х16 «Розробка методики та вдосконалення обладнання для випробувань шарнірних підшипників», 2016 рік. Автором розроблено методику для проведення випробувань шарнірних підшипників великих розмірів.

6. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 1050-Х16 «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. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи № 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.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості авіаційних шарнірних підшипників ковзання із полімерними композиційними матеріалами, що працюють в умовах реверсивного руху.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

1. Обґрунтувати вибір полімерних композиційних матеріалів для необслуговуємих авіаційних шарнірних підшипників ковзання для підвищення їх антифрикційних та зносостійких властивостей.

2. Розробка методики досліджень полімерних композиційних антифрикційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в умовах, наближених до реальних.

3 Визначення основних закономірностей зношування полімерних композиційних матеріалів, для застосування в авіаційних шарнірних підшипниках в умовах реверсивного руху.

4. Визначення закономірностей зміни триботехнічних параметрів полімерних композиційних матеріалів в якості покриттів для використання їх на обоймах шарнірних підшипників ковзання для авіації.

5. Розробка технологічних рекомендацій для виробництва шарнірних підшипників ковзання із полімерними композиційними матеріалами для авіаційної промисловості.

6. Розробка моделі шарнірних підшипників із полімерними композиційними матеріалами та розрахунок їх напружено-деформованого стану.

7. Проведення лабораторних та промислових ресурсних випробувань запропонованих шарнірних підшипників із композиційними матеріалами.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування полімерних композиційних матеріалів в умовах реверсивних рухів.

Предмет дослідження – закономірності впливу трибологічних характеристик полімерних композиційних матеріалів на довговічність авіаційних шарнірних підшипників.

Методи дослідження. Основні теоретичні дослідження ґрунтуються на відомих залежностях дослідників та вчених, фундаментальних положень трибології, матеріалознавства, реолого-кінетичної концепції зносостійкості матеріалів, фізико-хімічних процесів, теорії самоорганізації та математичного аналізу. Трибологічні дослідження виконувались на стандартних та розроблених сучасних машинах тертя згідно ЕТУ 100-4, ГОСТ 3635-78, ГОСТ 23.211-80, DIN ISO 12240-1 (DIN 648) та вимог СТП 651.02.061-92; використовували оптичну та растрову 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 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 ISO 17025:2017; мікроаналізатори CamScan 4DV, INCA 200 Energy. Використовувалась статистична обробка експериментальних даних методом регресійного аналізу та прикладні математичні програми для визначення похибок, відхилень та коефіцієнтів кореляції.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено підвищення зносостійкості та антифрикційних властивостей полімерних композиційних матеріалів при контактних навантажень 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, в порівнянні з стандартними шарнірними підшипниками з металополімерною стрічкою.

4. Вперше запропоновано використання сплаву ВТ-22 в якості внутрішньої обойми із 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, в порівнянні з сталлю 95Х18Ш.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику оціни триботехнічних показників композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах (акт про реалізацію наукових досліджень ТОВ Науково-виробнича фірма «МС АВІА-ГРЕЙД» від 14.08.2024 року).

2. Модернізовано спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості (акт про реалізацію наукових досліджень в ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС» від 05.03.2024 року, Київ, Україна).

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 з високоміцними армуючими волокнами в

модифікованому наповнювачами (C, MoS_2 та ін.) сполучнику та виготовлення внутрішньої обойми підшипника з титанового сплаву (з поверхневим покриттям з молібдену) для забезпечення ефективної демпфуючої здатності в умовах вібрацій (акт впровадження результатів наукових досліджень в ТОВ «Aviaservice» від 08.02.2024 року, Тбілісі, Грузія).

4. Розроблено структурну схему досліджень полімерних композиційних антифрикційних матеріалів та впровадження шарнірних підшипників на базі цих матеріалів, для отримання додаткового сертифікату типу STC (supplemental type certificate) у важелі автомату перекосу гелікоптерів серії Mi-8T, Mi-8P, Mi-8PS, Mi-8MTV-1(Mi-17-V), Mi-8MTV(Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171, Mi-17V-5, які працюють на африканському континенті у підтримку міжнародних місій Всесвітньої продовольчої програми (WFP) та Організації Об'єднаних Націй (UN) (протокол досліджень №17897-SB-879/15H та акт 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 нестаціонарних умовах роботи (Пат. 92071, МПК G01N 3/56. № u 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.)

Особистий внесок здобувача.

Наукові положення та практичні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторства опубліковано робота [6]. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено розрахунки матеріалів трибопар у триботехнічному контакті – [1]; розроблено модель інтенсивності зношування матеріалів та покриттів при терті ковзання – [2]; проаналізовано реологічні характеристики матеріалів в зоні контакту при терті в умовах реверсивних динамічних рухів – [3]; проаналізовано вплив навантаження на формування поверхні рельєфу в локальному контакті – [4]; розроблено установку для лабораторних ресурсних випробувань шарнірних підшипників – [5]; розроблено методику та модернізовано комплекс установок для випробувань полімерних композиційних антифрикційних матеріалів для використання їх у авіаційних шарнірних підшипників ковзання – [6]; визначено триботехнічні властивості сучасних інженерних полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання – [7]; визначено триботехнічні параметри шарнірних підшипників ковзання із полімерними матеріалами – [8]; визначено вплив температури на зносостійкість полімерних композиційних матеріалів – [9];

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: XII, XIV Міжнародних науково-технічних конференціях «Авіа-2015», «Авіа-2016» (Київ, 2015, 2016); XX, XXIII, XXIV Міжнародних науково-практичних конференціях здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ» (Київ 2020, 2023, 2024), Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, Ukraine: proceedings the seventh world congress. (Kyiv 2016); Сучасні проблеми науки (Київ 2023, 2024); X Всесвітньому конгресі "Авіація в XXI столітті" (Київ, 2022).

Публікації. За темою дисертації 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.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п’яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 244 сторінок, із них 159 сторінки основного тексту. Робота включає 9 таблиць, 87 рисунків (із них тих, що займають повну сторінку – 1), 8 додатків. Список використаних джерел налічує 174 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ 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 розглянуто аналіз використання антифрикційних полімерних та металополімерних КМ які застосовуються в сучасному авіабудуванні в якості підшипників ковзання.

Аналіз використання та пошкодження ШП показав, що існує тенденція впровадження в важконавантажені вузли машин, ШП із полімерними антифрикційними КМ, які не потребують ТО впродовж всієї роботи. Це особливо актуально в авіаційній галузі, де прагнуть переведення обслуговування вузлів ПС за технічним станом. Представлено аналіз структур полімерних антифрикційних КМ для застосування їх в підшипниках ковзання. Проаналізовано аналіз найбільш сучасних та зносостійких видів КМ, але майже всі вони визначені як зносостійкі згідно стандарту ISO 7148-2, що включає однонаправлений рух полімерів по металевій пластині. В реальності підшипники працюють в умовах вібрацій та реверсивних рухів. Важливим аспектом застосування КМ у ШП є врахування режимів роботи вузлів та агрегатів де конструктивно вони використовуються. Проаналізовано технологічні аспекти нанесення та виготовлення КМ у підшипниках ковзання. Визначено, що впровадження в ШП високоінженерних полімерних КМ дозволить підвищити довговічність та зносостійкість пар тертя за рахунок використання повної товщини полімерного матеріалу та розробці підшипників із прогнозованими характеристиками під конкретну задачу.

Ґрунтуючись на вищезазначеному, визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі розроблено методику та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних КМ, які можна використовувати у ШП ковзання для авіаційної промисловості. Випробування матеріалів та підшипників на цілому ряді установок дозволяє отримати спеціальний сертифікату додаткового типу STC (supplemental type certificate) якій видається при наявності ресурсних лабораторних та промислових випробувань.

Розроблено структурну логічну схему досліджень впровадження полімерних антифрикційних КМ для ШП в авіації. Послідовність дій в схемі направлена на результат впровадження сучасних високоінженерних КМ у підшипники, що дозволяє

дещо розширити номенклатури використання необслуговуємих шарнірних з’єднань і дозволити переведення деяких авіаційних компонентів на ТО за фактичним станом.

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

Розроблено унікальну методику та лабораторну установку (рис. 1) для ресурсних випробувань ШП для авіаційної промисловості. Установка дозволяє випробовувати реальні готові ШП і визначати ресурс в залежності від умов навантажування, специфічних умов роботи (вібрація, реверсивний рух, однонаправлений рух, частота коливань, швидкість ковзання) та специфічного середовища (температурний вплив, вологість, запиленість).



Рис. 1 Установка для ресурсних лабораторних випробувань шарнірних підшипників

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 характистиками КМ та трибопар в цілому.

У третьому розділі представлено триботехнічні характеристики металополімерних та полімерних антифрикційних КМ для ШП.

Проаналізовано та вибрано найбільш оптимальні структури полімерних КМ, які можна використовувати в трибоконтакті ШП ковзання. Визначено високоефективні антифрикційні КМ із різною структурою (Zedex ZX-324VMT, Fluroglide wear solid, Iglidur TX1 та МПС Ф-4К15М5), які підвищать зносостійкість та довговічності ШП для авіаційній галузі.

Дослідженнями встановлено, що при контактному навантаженні 5 МПа (рис. 2) при вібраційних випробуваннях із малою частотою визначальну роль у зношуванні КМ відіграють армуючи компоненти. Найбільший лінійний знос МПС обумовлений відсутністю в верхньому полімерному композиційному шарі армуючих волокон, а лише є дрібнодисперсні наповнювачі С та MoS_2. Полімерні КМ Fluroglide, Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 проявляють високу зносостійкість за рахунок наявності в їх структурі каркасу армованих волокон. Встановлено, що армуючі компоненти та наповнювачі в КМ відіграють першочергове значення в забезпеченні зносостійкості полімерних КМ при підвищені навантаження, при низькочастотних вібраційних випробуваннях та при випробуваннях на реверсивне тертя. Визначено, що полімерний КМ Fluroglide, який складається із армуючої тканини із додаванням матеріалу PTFE та функціональними добавками показує високі триботехнічні характеристики, які можна порівняти із класичною МПС. Армовані волокна КМ

Iglidur TX1 та нановуглеволокна матеріалу Zedex ZX-324VMT забезпечують високі показники межі міцності та модуля пружності полімерних КМ, при терті відбувається рівномірний розподіл контактних напружень в локальних зонах армування.

Дослідами при низькочастотних реверсивних рухах КМ встановлено, в діапазоні навантаження 5-12 МПа в умовах вібрацій МПС (PTFE+15% C+5% MoS_2 – Б-83 – сталева стрічка), та полімерні КМ Fluroglide, Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 мають максимальний лінійний знос до 48 мкм; при навантаженні 30 Н при низькочастотних реверсивних рухах лінійний знос зазначених матеріалів від 160 до 206 мкм, що знаходиться в межах допустимого зносу в осьовому зазорі ШП (до 300 мкм) (рис. 3).

Встановлені механізми прояву релаксаційних процесів в КМ в умовах швидкодіючих низькочастотних реверсивних рухів: релаксація локальних напружень в МПС відбувається за рахунок підвищення мікропластичності та зростання внутрішнього тертя проміжного шару бабіту; в КМ на полімерній основі (до 35…65 % сполучника) релаксації напружень сприяє в'язкопружність матеріалу.

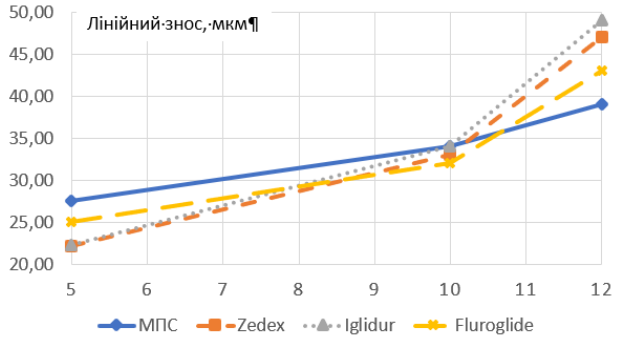


Рис. 2. Залежність лінійного зносу полімерних композиційних матеріалів від питомого навантаження в умовах вібрацій.

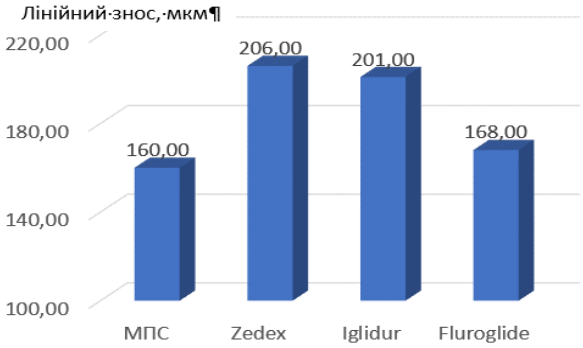


Рис. 3. Зносостійкість полімерних композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах.

Проведено дослідження трибохарактеристик матеріалів внутрішньої обойми ШП для авіаційної промисловості (рис. 4, 5). Досліджувались матеріали ВТ-22, 95Х18Ш та покриття хрому та молібдену на цих матеріалах, що були нанесені гальванічним та вакуумно-дуговим методом. Матеріал 95Х18Ш базовий матеріал який є основою для підшипників типу ШН. Титановий матеріал ВТ-22 було обрано в якості альтернативи сталі з послідуючим зміцненням покриттями.

Визначено, що покриття хрому та молібдену в умовах фретинг-корозії при частоті коливань 30 Гц та амплітуді 175 мкм проявляють вищу фретингостійкість при 20 та 30 МПа, в порівнянні з покриттями на сталі 95Х18Ш, за рахунок більшої демпфуючої здатності титанового сплаву ВТ-22 в умовах вібрацій. Встановлено, що покриття хрому товщиною 12-24 мкм, нанесене електролітичним методом, на сплаві ВТ-22 та сталі 95Х18Ш в умовах фретинг-корозії при 30 МПа проявляє схильність до схоплювання. Вакуумно-дугове покриття твердого хрому характеризується зносостійкістю в умовах фретинг-корозії в 2-3 рази більшою, ніж електролітичне покриття, однак при навантаженні 30 МПа проявляються ознаки схоплювання.

Встановлена висока зносостійкість покриття молібдену (вакуумно-дуговий метод) 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, в порівнянні з покриттям на сталі 95Х18Ш.

Запропоновано механізм підвищення зносостійкості покриття молібдену в умовах вібрацій, який полягає в підвищенні його пластичності за рахунок формування більшої щільності легкорухомих дислокацій внаслідок деформаційних процесів, що спричинює зростання амплітудної залежності внутрішнього тертя та спричиняє релаксації локальних пікових динамічних напружень.

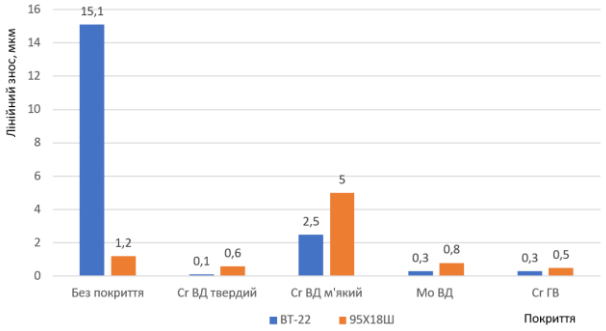


Рис. 4. Залежність лінійного зносу вакуумно-дугових та гальванічного покриттів при навантаженні в 20 МПа.

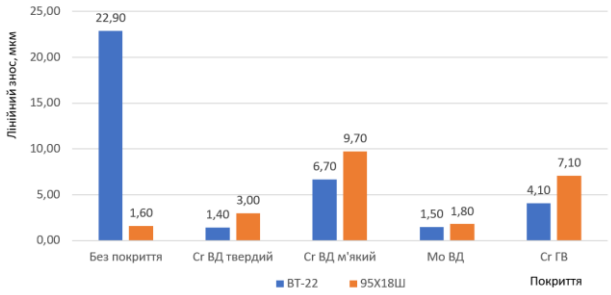


Рис. 5. Залежність лінійного зносу вакуумно-дугових та гальванічного покриттів при навантаженні в 30 МПа.

Для підвищення довговічності конструкцій ШП та підвищення їх ефективності використання в авіаційній галузі, запропоновано використання сплаву ВТ-22 в якості внутрішньої обойми із нанесенням на його поверхню покриття молібдену вакуумно-дуговим методом товщиною в 70 мкм. При використанні ШП у великій кількості (до тисячі штук) в ПС та наявність підшипників великих розмірів (20 – 35 мм) заміна стальних внутрішніх обойм на поверхнево зміцнений покриттям легкий титановий сплав ВТ-22 дозволить зменшити вагу конструкції ПС та підвищити його ефективність, не втрачаючи надійності шарнірних вузлів.

Представлено економічний розрахунок доцільності використання титанових матеріалів замість стальних в конструкціях авіаційних ШП із антифрикційними КМ.

У четвертому розділі представлено оцінку теплофізичних властивостей та напружено-деформованого стану (НДС) антифрикційних КМ для ШП.

Проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища на полімерні КМ (рис. 6). Встановлено, що висока зносостійкість МПС при підвищенні температури зовнішнього середовища до 60 °С обумовлена ефективним відведенням тепла з зони контакту за рахунок високої теплоємності та теплопровідності бабіту, наявності наповнювачів С та MoS_2 в верхньому шарі PTFE, які підвищують його теплопровідність до 0,8 Вт/(м·К) та зменшують енергонавантаженість контакту.

Визначено механізм збільшення лінійного зносу полімерних КМ в 1,5…1,9 разів, в порівнянні з МПС, при підвищенні температури до 60 °С, який полягає в збільшенні деструкційних процесів внаслідок термо-механічного впливу в умовах реверсивного ковзання, низький теплопровідності сполучника та армованих волокон.

Однак, показники лінійного зносу досліджуваних полімерних КМ знаходяться в межах допуску для осьового зазору ШП, що обумовлено термічною витривалістю та жорсткістю армуючих волокон.

Визначено, що високі критичні навантаження як статичні, так і динамічні значно знижують зносостійкість полімерних антифрикційних КМ. Найбільший вплив на величину інтенсивності зношування має генерація тепла, викликана як процесом тертя, так і динамічним навантаженням в результаті реверсивного руху.

Збільшення статичного навантаження при терті до 200 МПа не спричинює такого нагріву, як від динамічного навантаження. Наслідком цього є можливий перехід полімерного КМ в стан високоеластичності і, як наслідок, руйнування матеріалу.

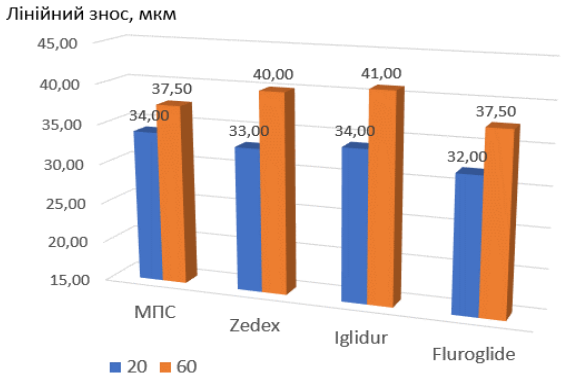


Рис. 6. Вплив температури на зносостійкість антифрикційних металополімерних композиційних матеріалів.

Проведено моделювання напружено-деформованого стану ШП із полімерними та металополімерними КМ в системі SOLIDWORKS Simulation Premium. Розроблено модель ШП (рис. 7) із КМ та варіантами комбінацій із матеріалами обойм підшипників, що виконані із ВТ-22 та 95Х18Ш (табл. 1).



а б в г

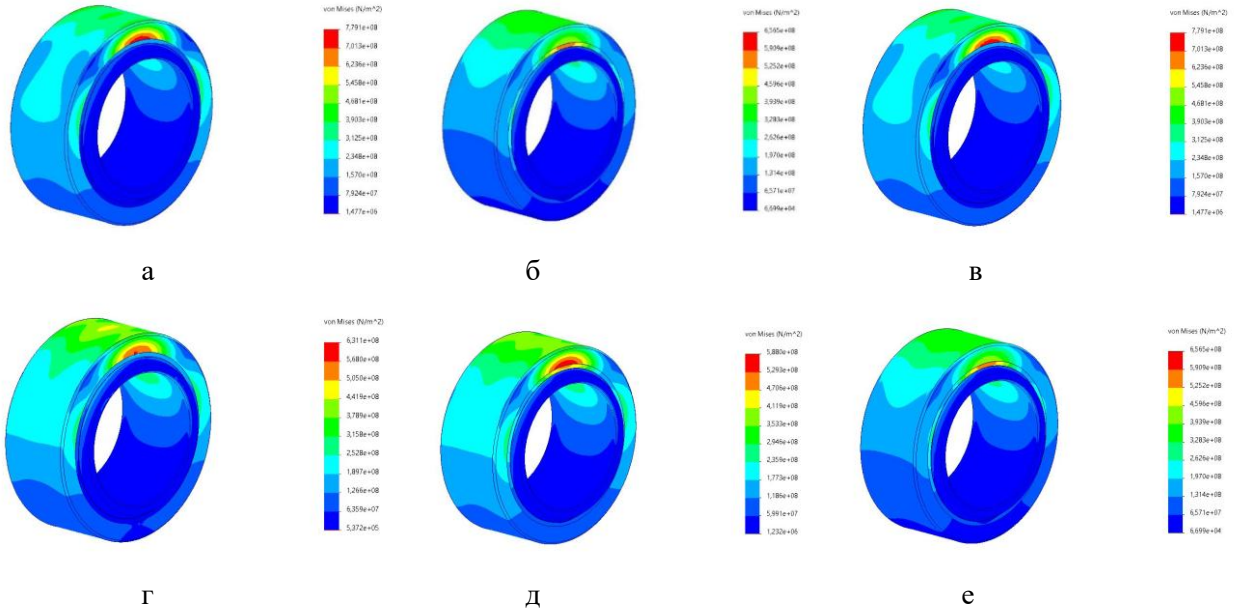
Рис. 7. Розрахункова модель шарнірного підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами: а – підшипник в зборі, б – підшипник із перетином зовнішньої обойми та композиційних матеріалів, в – перетин моделі підшипника, г – розкладка основних елементів моделі підшипника.

Таблиця 1 - Варіанти комбінацій елементів шарнірного підшипника із композиційними антифрикційними матеріалами для досліджень

Зразок	Матеріал шарів підшипника			
№	Елемент 1	Елемент 2	Елемент 3	Елемент 4
1	Сталь 95х18	PTFE	Бронза олов.	Сталь 95х18
2	Сталь 95х18	PTFE	ZX-324VMT	Сталь 95х18
3	Сталь 95х18	PTFE	ТХ1	Сталь 95х18
4	Сталь 95х18	PTFE	Вуглеволокна	Сталь 95х18
5	ВТ22	PTFE	ZX-324VMT	ВТ22
6	ВТ22	PTFE	ТХ1	ВТ22
7	ВТ22	PTFE	Вуглеволокна	ВТ22

Визначено, що КМ Zedex ZX324VMT та Iglidur TX1 при моделюванні НДС знижують максимальне питоме напруження на 50 % в матеріалі при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН, в порівнянні з МПС.

Моделюванням НДС ШП із антифрикційними КМ доведено (рис. 8) 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.



а б в

г д е

Рис. 8. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 2, б – зразок № 5, в – зразок № 3, г – зразок № 6, д – зразок № 4, е – зразок № 7.

При аналізі напружень та запасу міцності КМ матеріалів (елемент № 3, зразки № 2-4) в порівнянні із моделлю підшипника з МПС (елемент № 3, зразок № 1) можна стверджувати, що при напруженнях в 3 кН КМ ZX-324VMT та TX1 мають напруження на 50 % менші, в порівняно із МПС та матеріалом моделі на основі вуглецевих волокон, без сполучника. Модель вуглецевих волокон має навіть на 10-15 % більші напруження, в порівнянні із МПС. Це пояснюється високими фізико-механічними характеристиками вуглеволокон, а саме межею міцності при стисканні в 2 ГПа, яка найвища, серед матеріалів, які досліджуються. Водночас, в цій моделі відсутній сполучник, функція якого полягає в перерозподілу напружень по всій поверхні сполучення матеріалів.

На рис. 9 представлено максимальні значення розподілення навантажень в КМ (елемент № 3) при навантаженнях 100 та 200 кН. Аналогічна залежність відбувається і при навантаженні в 3 кН.

За результатами оцінки НДС 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, в порівнянні з МПС. Зростання напружень обумовлено жорсткістю вуглецевих волокон, їх низькою релаксаційною здатністю, відсутністю сполучника, який забезпечує високі демпфуючі властивості в

полімерних КМ. Зазначені чинники не враховуються при моделюванні, коефіцієнту запасу міцності зростає в 5-6 разів.

Результати моделювання НДС свідчать про ефективність використання полімерних КМ Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1, армованих вуглецевими волокнами, в якості зносостійких антифрикційних КМ для зовнішньої обойми ШП. Заміна сталевої обойми на обойму з поверхневозміцненого титанового сплаву забезпечує більш ефективну релаксацію напружень та збільшення коефіцієнту запасу міцності при моделюванні.

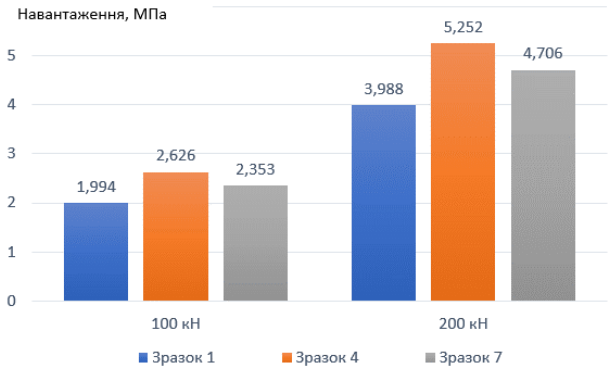


Рис. 9. Гістограма розподілу напружень в композиційних матеріалах при моделюванні напружено-деформованого стану шарнірних підшипників при навантаженнях в 100 та 200 кН.

Представлено методику розрахунку довговічності ШП із антифрикційними КМ. Методика дозволяє визначити теоретичний строк служби роботи ШП із урахуванням умов роботи в залежності від таких факторів (напрями навантаження, циклічність, швидкість руху, динамічність навантаження, температура тощо), які впливають на довговічність ШП.

Представлено теоретичні розрахунки довговічності ШП з урахуванням режимів роботи у важелі автомату перекосу гелікоптера. Розрахунок представлено на прикладі одного робочого дня гелікоптера Мі-8МТV-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезення пасажирів та вантажів. Встановлено при розрахунках довговічності ШП 5891 годину роботи, що більше ніж необхідний ресурс який встановлений технічною документацією в 2000 – 2500 годин роботи на автоматі перекосу. Але слід зазначити, що розрахувати та оцінити всі особливості умов роботи ШП (гелікоптера) неможливо.

У п’ятому розділі проведено порівняльні ресурсні лабораторні та промислові дослідження ШП із антифрикційними КМ.

Представлені результати лабораторних ресурсних випробувань ШП (рис. 10) із КМ. Визначено, що ШП із матеріалом із вуглецевих волокон та функціональних добавок показує зносостійкість в 1,8 - 2 рази більшу на відрізку 40-100 тис. циклів, ніж підшипники із іншими матеріалами. Також встановлено, що до наробітку до 60 тис. циклів ШП із МПС показує результаті гірші по зносостійкості ніж полімерні КМ, але всі ці результати лежать в полі допусків нормальної роботи підшипників.

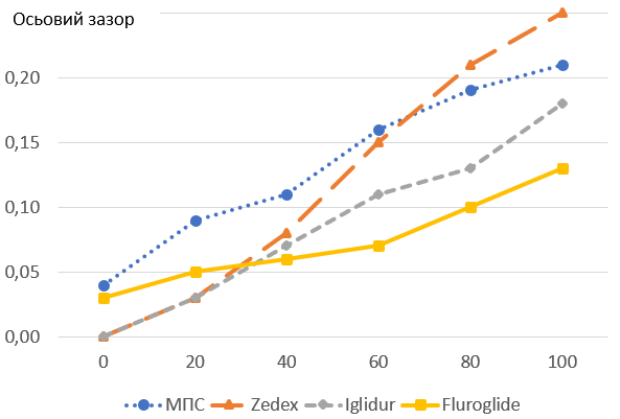
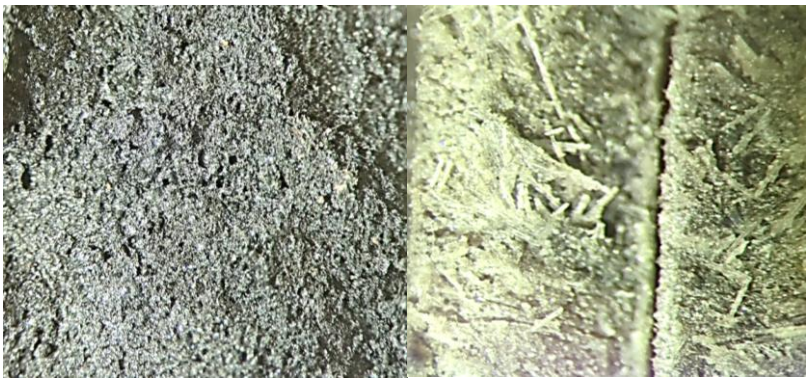


Рис. 10. Залежність осьового зазору шарнірних підшипників із композиційними матеріалами від кількості циклів коливань.

За результатами лабораторних ресурсних випробувань встановлена

висока працездатність полімерних КМ Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide. Максимальний осьовий зазор в ШП 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). Представлено топографії структур матеріалів ZX-324VMT та TX1 (рис. 11).

Визначено, що ШП із полімерним КМ Fluroglide (армуюча тканина, PTFE та функціональні добавки) показує зносостійкість в 1,8 - 2 рази більшу на відрізку 40-100 тис. циклів, ніж ШП із іншими КМ. Також встановлено, що до наробітку до 60 тис. циклів ШП із МПС показує результаті гірші по зносостійкості, ніж полімерні КМ, але всі ці результати лежать в полі допусків нормальної роботи підшипників.



а б

Рис. 11. Структури полімерних композиційних матеріалів ZX- 324VMT (а) та TX1 (б) при збільшеннях х56

Промисловими випробуваннями доведено (табл. 2, рис. 13), що при заміні внутрішнього кільця ШП ковзання на титановий сплав із покриттям молібдену зносостійкість КМ аналогічна їх зносостійкості по сталі. При малих або помірних навантаженнях заміна внутрішнього кільця ШП зі сталі на титановий сплав із захисними зносостійкими покриттями дає суттєвий виграш у вазі ПС.

Таблиця 2 - Результати осьових зазорів шарнірних підшипників при промислових випробуваннях

№ зразка	Полімер на зовнішній обоймі	Покриття на внутрішній обоймі	Матеріал внутрішній обойми	Осьовий зазору при наробітку, мкм		
				0	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
1	металополімерна стрічка	-	95Х18Ш	45	170	200
2	fluroglide	хром	95Х18Ш	50	145	155
3	zedex	-	95Х18Ш	5	120	140
4	zedex	молібден	95Х18Ш	5	120	135
5	zedex	молібден	R56260	5	125	140
6	iglidur	-	95Х18Ш	5	100	120
7	iglidur	молібден	95Х18Ш	5	95	120
8	iglidur	молібден	R56260	5	105	125



Рис. 13. Результати осьового зазору зразків без урахування початкового зазору при наробітку в 2 млн. циклів коливань.

За результатами стендових випробувань ШП з імітацією режимів роботи важеля автомату перекосу гелікоптера типу Mi-8MTV-1 після 2 млн. циклів встановлено зменшення осьового зазору при використанні полімерних КМ Fluroglide на 33 %, Zedex ZX-324VMT на 10-15 % та Iglidur TX 1 на 19-23 %, в порівнянні з осьовим зазором ШП з МПС. Підібрані матеріали підходять до умов роботи вузлів гелікоптерів Mi-8T, Mi-8P, Mi-8PS,

Mi- 8MTV-1(Mi-17-V), Mi-8MTV(Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171, Mi-17V-5, які працюють в на африканському континенті на міжнародних місіях WFP та UN.

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

У додатках представлено: акти впроваджень наукових досліджень та акт промислових випробувань ШП; трибомеханічні характеристики полімерних КМ для ШП ковзання; характеристики та документація, щодо ШП із МПС; розрахунок економічної доцільності заміни стальних обойм ШП на титанові сплави; документація по наробітках вертольоту типу Mi-8MTV-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезення пасажирів та вантажів авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС»; технічна документація, щодо розташування та ТО ШП у важелі автомату перекосу гелікоптера Mi-8MTV-1; приклад математичного обчислення середнього значення, стандартного відхилення, третього та четвертого моменту, коефіцієнту кореляції та стандартних помилок коефіцієнтів кореляції при дослідженнях полімерних та металополімерних КМ; список публікацій за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано принципи вибору антифрикційних, зносостійких матеріалів полімерних композиційних матеріалів для необслуговуємих авіаційних шарнірних підшипників ковзання з урахуванням адгезійної міцності зчеплення матеріалів з основою, демпфуючих властивостей, типу армуючих матеріалів, антифрикційних наповнювачів та матриці.

2. Розроблено методику оцінки триботехнічних показників композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, лабораторну установку для ресурсних випробувань авіаційних шарнірних підшипників, що дозволяє отримати спеціальний сертифікат додаткового типу STC (supplemental type certificate) з перспективою впровадження шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості.

3. Встановлено, що в композиційних матеріалах армуючі компоненти та наповнювачі відіграють першочергове значення в забезпеченні їх зносостійкості при підвищені навантаження, при низькочастотних вібраційних випробуваннях та при випробуваннях на реверсивне тертя. Визначено, що полімерний композиційний матеріал Fluroglide, який складається із армуючої тканини із додаванням матеріалу PTFE та функціональними добавками показує високі триботехнічні характеристики. Армовані волокна матеріалу Iglidur TX1 та нановуглеволокна матеріалу Zedex ZX-324VMT забезпечують високі показники межі міцності та модуля пружності полімерних композиційних матеріалів.

4. Визначено, що в діапазоні навантаження 5-12 МПа в умовах вібрацій, металополімерна стрічка (PTFE+15% C+5% MoS_2 – Б-83 – сталева стрічка) та полімерні композиційні матеріали Fluroglide, Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 мають максимальний лінійний знос до 48 мкм; при навантаженні 30 Н при низькочастотних реверсивних рухах лінійний знос зазначених матеріалів від 160 до 206 мкм. За результатами лабораторних ресурсних випробувань максимальний осьовий зазор в підшипниках з матеріалами Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide 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).

5. Встановлені механізми прояву релаксаційних процесів в 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; в композиційних матеріалах на полімерній основі (до 35…65 % сполучника) релаксації напружень сприяє в'язкопружність матеріалу.

6. Розроблено модель напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами. Визначено, що композиційні матеріали Zedex ZX324VMT та Iglidur TX1 знижують максимальне питоме напруження на 50 % в матеріалі при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН, в порівнянні з металополімерною стрічкою. Моделюванням напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними 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.

7. Запропоновано використання сплаву ВТ-22 в якості внутрішньої обойми із нанесенням на його поверхню покриття молібдену вакуумно-дуговим методом товщиною в 70 мкм для підвищення довговічності конструкцій шарнірних підшипників та підвищення їх ефективності використання в авіаційній галузі. 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 за рахунок більшої демпфуючої здатності титанового сплаву ВТ-22 в умовах вібрацій, в порівнянні з покриттям на сталі 95Х18Ш.

8. За результатами лабораторних ресурсних випробувань визначено, що шарнірний підшипник із полімерним композиційним матеріалом Fluroglide (армуюча тканина, PTFE та функціональні добавки) показує зносостійкість в 1,8 - 2 рази більшу на відрізку 40-100 тис. циклів, ніж підшипники із іншими композиційними матеріалами.

9. 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 %, в порівнянні з осьовим зазором шарнірних підшипників з

металополімерною стрічкою, за результатами стендових випробувань шарнірних підшипників з імітацією режимів роботи важеля автомату перекосу гелікоптера типу Мі-8МТV-1 після 2 млн. циклів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях:

1. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Кіндрачук М.В., Хімко М.С. Оцінка динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті. Проблеми тертя та зношування. 2014. № 4. С. 83-89 (категорія Б).

2. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Хімко М.С. Моделювання інтенсивності зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згоряння. Проблеми тертя та зношування. 2015. № 1. С. 140-145 (категорія Б).

3. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Хімко М.С., Шакулієв С.В. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергонавантаженість в контакті тертя при змінних контактних напругах. Проблеми тертя та зношування. 2015. № 4. С. 21-27 (категорія Б).

4. Бородій В.М., Кудрін АП., Якобчук О.Є., Хімко М.С. Вплив тиску на формування профілю і товщини мастильної плівки у локальному контакті кочення в умовах еластогідродинамічного мащення. Проблеми тертя та зношування. 2016. № 3. С. 46-51 (категорія Б).

5. Хімко М.С., Якобчук О.Є., Хімко А.М., Науменко Н.О. Методика випробувань шарнірних підшипників на зносостійкість. Проблеми тертя та зношування. 2017. № 1 (74). С. 118-122 (категорія Б).

6. Khimko M.S. Development and modernization of a complex of installations for wear testing of metal-polymer composite materials for spherical sliding bearings. Problems of friction and wear. 2024. № 1 (102). P. 73-83 (категорія Б).

7. Khimko M., Khimko A., Mnatsakanov R., Mikosyanchyk O. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry/ Problems of tribology. V.29, № 2/112-2024, P.16-22 (категорія Б).

8. Хімко М.С., Хімко А.М., Мнацаканов Р.Г., Кліпаченко В.В., Макаренко Р.О. Зносостійкість полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників. Проблеми тертя та зношування. 2024. № 2 (103). С. 29-42. (категорія Б).

9. Хімко М.С., Хімко А.М., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.М. Вплив теплофізичних властивостей металополімерних композиційних матеріалів на зносостійкість. Проблеми тертя та зношування. 2024. № 3 (104). С. 91-100. (категорія Б).

У іноземних спеціалізованих виданнях:

10. Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, M.S. Khimko Evaluation of effectivness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2015. № 9 (33). P. 301– 307.

Матеріали та тези конференцій:

11. Мікосянчик О.О. Мнацаканов Р.Г., Хімко М.С., Петренко М.А. Вплив контактного навантаження на антифрикційні властивості базових олив. Авіа-2015: XII Міжнародної наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015, Київ: матеріали. К.: НАУ, 2015. С. 25–28.

12. Mikosianchik O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko A.M., Khimko M.S., Shakuliev M.S. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction. Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. Kyiv: NAU, 2016. P. 1.4.51–1.4.56.

13. Хімко М.С., Гречуха А.В. Установка для випробувань шарнірних підшипників ковзання. 2024 XXIV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки. Сучасні авіаційні технології. Підтримка льотної придатності повітряних суден», 4-5 квітня 2024, Київ: НАУ, 2024. С. 3-4.

14. Хімко М.С., Мнацаканов Р.Г., Хімко А.М. Розробка структурної схеми досліджень шарнірних підшипників та формування принципів вибору металополімерних трибопар. XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІІРТК-2024), 21-22 травня 2024 р. Київ: НАУ, 2024. С. 118-120.

15. Хімко М.С., Кліпаченко В.В., Філоненко О.Є. Аналіз композиційних полімерних матеріалів для авіаційних шарнірних підшипників. XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІІРТК-2024), 21-22 травня 2024 р. Київ: НАУ, 2024. – С. 121-123.

16. Khimko A., Hrechukha A., Khimko M. Research of the impact of ambient temperature on the wear resistance of metal-polymer composite materials used in aviation plain bearings. Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 25-27 september, 2024 Kyiv, Ukraine. NAU, 2024. – С. 1.3.60-1.3.63.

Патенти:

17. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестаціонарних умовах роботи / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С. – № u 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Хімко М.С. – Підвищення зносостійкості шарнірних підшипників застосуванням металополімерних та полімерних композиційних матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія) – Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2025.

В дисертаційній роботі вирішувалась науково-технічна проблема підвищення зносостійкості авіаційних шарнірних підшипників ковзання із полімерними композиційними матеріалами, що працюють в умовах реверсивного руху.

Розроблено структурну логічну схему досліджень впровадження металополімерних та полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в авіації. Розроблено методику та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для

авіаційної промисловості. Проаналізовано та вибрано найбільш оптимальні структури металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можна використовувати в трибоконтакті шарнірних підшипниках ковзання з урахуванням сполучника та армуючих компонентів. Визначено високоефективні антифрикційні композиційні матеріали із різною структурою, які підвищать зносостійкість та довговічності шарнірних підшипників а авіаційній галузі.

Встановлено, що армуючі компоненти та наповнювачі в композиційних матеріалах відіграють першочергове значення в забезпеченні зносостійкості полімерних композиційних матеріалів при підвищені навантаження, при низькочастотних вібраційних випробуваннях та при випробуваннях на реверсивне тертя. Визначено, що полімерний композиційний матеріал Fluroglide, який складається із армуючої тканини із додаванням матеріалу PTFE та функціональними добавками показує високі триботехнічні характеристики, які можна порівняти із класичною металофторопластовою стрічкою.

Встановлені механізми прояву релаксаційних процесів в 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; в композиційних матеріалах на полімерній основі (до 35…65 % сполучника) релаксації напружень сприяє в'язкопружність матеріалу.

Встановлена висока зносостійкість покриття молібдену (вакуумно-дуговий метод) 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, в порівнянні з покриттям на сталі 95Х18Ш.

Розроблено модель напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами. Визначено, що композиційні 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, в порівнянні з металополімерною стрічкою. Моделюванням напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними 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.

Визначено, що шарнірний підшипник із полімерним композиційним матеріалом Fluroglide (армуюча тканина, PTFE та функціональні добавки) показує зносостійкість в 1,8 - 2 рази більшу на відрізку 40-100 тис. циклів, ніж підшипники із іншими композиційними матеріалами. Промисловими випробуваннями доведено, що при заміні внутрішнього кільця шарнірного підшипника ковзання на титановий сплав із покриттям молібдену зносостійкість композиційних матеріалів аналогічна їх зносостійкості по сталі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблено методику оціни триботехнічних показників композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах та модернізовано спеціальний комплекс

установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості. Запропоновані технологічні рекомендації щодо виробництва шарнірних підшипників ковзання із полімерними антифрикційними композиційними покриттями для авіаційної промисловості. Розроблено структурну схему досліджень полімерних композиційних антифрикційних матеріалів та впровадження шарнірних підшипників на базі цих матеріалів, для отримання додаткового сертифікату типу STC (supplemental type certificate) у важелі автомату перекосу гелікоптерів серії Mi-8T, Mi-8P, Mi-8PS, Mi-8MTV-1(Mi-17-V), Mi-8MTV(Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171, Mi-17V-5, які працюють на африканському континенті у підтримку міжнародних місій Всесвітньої продовольчої програми (WFP) та Організації Об’єднаних Націй (UN).

Ключові слова: шарнірні підшипники, композиційний матеріал, політетрафторетилен, зносостійкі покриття, гелікоптер, напружено-деформований стан, моделювання, зносостійкість, металополімерні та полімерні матеріали, зносостійкість, впровадження, випробування.

ABSTRACT

Khimko M.S. – Increasing the wear resistance of hinged bearings by the use of metal-polymer and polymer composite materials. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.02.04 "Friction and wear in machines" (13 – Mechanical Engineering) – State Non-Profit Enterprise "State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, 2025.

In the dissertation, the scientific and technical problem of increasing the wear resistance of aviation articulated plain bearings with polymer composite materials operating in reverse motion was solved.

A structural logical scheme of research on the introduction of metal-polymer and polymer composite materials for articulated plain bearings in aviation has been developed. A methodology and a special set of installations for the study of metal-polymer and polymer composite materials that can be used in articulated plain bearings for the aviation industry have been developed. The most optimal structures of metal-polymer and polymer composite materials that can be used in tribocontact hinged plain bearings, taking into account the conjunction and reinforcing components, have been analyzed and selected. High-performance anti-friction composite materials with different structures have been identified, which will increase the wear resistance and durability of hinge bearings in the aviation industry.

It has been established that reinforcing components and fillers in composite materials play a paramount importance in ensuring the wear resistance of polymer composite materials under increased load, low-frequency vibration tests and reverse friction tests. It has been determined that the polymer composite material Fluroglide, which consists of a reinforcing fabric with the addition of PTFE material and functional additives, shows high tribotechnical characteristics that can be compared with a classic metal-fluoroplastic tape.

The mechanisms of manifestation of relaxation processes in composite materials under conditions of high-speed low-frequency reversible movements have been established: relaxation of local stresses in the metal-polymer tape occurs due to an increase in microplasticity and an increase in internal friction of the intermediate layer of the babbitt; in polymer-based composite materials (up to 35... 65% of the conjunction) stress relaxation is facilitated by the viscoelasticity of the material.

High wear resistance of molybdenum coating (vacuum-arc method) under conditions of fretting corrosion is established, at 20 and 30 MPa, this coating on VT-22 alloy is characterized by a decrease in linear wear by 2.6 and 1.2 times, compared to the coating on 95X18Sh steel.

A model of the stress-strain state of hinged bearings with composite antifriction materials has been developed. It was determined that the composite materials Zedex ZX324VMT and Iglidur TX1 when modeling the stress-strain state reduce the maximum specific stress by 50 % in the material at loads of 3, 100 and 200 kN, compared to metal-polymer tape. Simulation of the stress-strain state of hinged bearings with composite antifriction materials proved a decrease in specific stresses in the surface layers of bearing materials when using titanium alloys VT22 instead of bearing steel 95X18Sh up to 20%, depending on the material and load conditions.

It was determined that a hinge bearing with polymer composite material Fluroglide (reinforcing fabric, PTFE and functional additives) shows wear resistance 1.8 - 2 times greater on a segment of 40-100 thousand km. cycles than bearings with other composite materials. Industrial tests have proven that when replacing the inner ring of the hinged plain bearing with a titanium alloy coated with molybdenum, the wear resistance of composite materials is similar to their wear resistance to steel.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that a method for evaluating the tribotechnical indicators of composite materials under low-frequency reversing movements has been developed and a special complex of installations for the study of metal-polymer and polymer composite materials, which can be used in articulated plain bearings for the aviation industry, has been modernized. Technological recommendations for the production of articulated plain bearings with polymer anti-friction composite coatings for the aviation industry are proposed. A structural scheme of research of polymeric composite antifriction materials and the introduction of hinged bearings based on these materials has been developed to obtain an additional STC type certificate (supplemental type certificate) in the automatic skew arm of helicopters of the Mi-8T, Mi-8R, Mi-8RS, Mi-8MTV-1 (Mi-17-V), Mi-8MTV (Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171, Mi-17V-5, which work on the African continent in support of the international missions of the World Food Program (WFP) and the United Nations Nations (UN).

Keywords: hinge bearings, composite material, polytetrafluoroethylene, wear-resistant coatings, helicopter, stress-strain state, modeling, wear resistance, metal-polymer and polymer materials, wear resistance, implementation, testing.