

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Хімко Маргарита Сергіївна

УДК 629.735.025

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

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Маргарита ХІМКО

Науковий керівник: Мнацаканов Рудольф Георгійович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2025

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.

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; використовували оптичну та растрову мікроскопію, мікро рентгеноспектральний аналіз, визначення характеристик поверхневого шару; вимірювання твердості проводили за відомими методами на сучасному обладнанні, металофізичні дослідження проводили на мікроскопі інтерферометрі; параметри профілю рельєфу визначали за допомогою профілографа. Використовувалась статистична обробка експериментальних даних методом регресійного аналізу та прикладні математичні програми для визначення похибок, відхилень та коефіцієнтів кореляції.

Розроблено структурну логічну схему досліджень впровадження металополімерних та полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в авіації. Послідовність дій в схемі направлена на результат впровадження сучасних антифрикційних та зносостійких композиційних матеріалів у підшипники, що дозволяє дещо розширити номенклатури

використання необслуговуваних шарнірних з'єднань і дозволити переведення деяких авіаційних компонентів на обслуговування за фактичним станом.

Розроблено методику та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості. Випробування матеріалів та підшипників на цілому ряді установок дозволяє отримати спеціальний сертифікат додаткового типу STC (supplemental type certificate), який видається при наявності ресурсних лабораторних та промислових випробувань.

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 підвищують 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 підвищенні 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. Армовані волокна матеріалу Iglidur TX1 та нановуглеволоконна матеріалу Zedex ZX-324VMT забезпечують високі показники межі міцності та модуля пружності полімерних композиційних матеріалів, при терті відбувається рівномірний розподіл контактних напружень в локальних зонах армування.

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.

Визначено, 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.

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.

Встановлена висока працездатність полімерних композиційних матеріалів Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide. Максимальний осьовий зазор в 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). 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. Також встановлено, що до наробітку до 60 тис. циклів шарнірний підшипник із металополімерною стрічкою показує результати гірші по зносостійкості, ніж полімерні композиційні матеріали, але всі ці результати лежать в полі допусків нормальної роботи підшипників.

Промисловими випробуваннями доведено, що при заміні внутрішнього кільця шарнірного підшипника ковзання на титановий сплав із покриттям молибдену зносостійкість композиційних матеріалів аналогічна їх зносостійкості по сталі. При малих або помірних навантаженнях заміна внутрішнього кільця шарнірного підшипника зі сталі на титановий сплав із захисними зносостійкими покриттями дає суттєвий вииграш у вазі повітряних суден.

Розроблені технологічні рекомендації щодо виробництва шарнірних підшипників ковзання із полімерними антифрикційними композиційними покриттями 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 із прогнозованими характеристиками під певні експлуатаційні умови роботи без технічного обслуговування в міжремонтний період.

Наукова новизна роботи полягає в наступних основних положеннях.

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.

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.

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.

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 полягає у наступному:

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.

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 (С, 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.

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 перекошу 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.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 17 наукових працях.

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 згорання. *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.

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 effectiveness 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: ХІІ 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, 2015. 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» (ІРТК-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» (ІРТК-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 нестационарних 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.

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.

The main theoretical studies are based on the well-known dependencies of researchers and scientists, the fundamental provisions of tribology, materials science, the rheological-kinetic concept of wear resistance of materials, physicochemical processes, the theory of self-organization and mathematical analysis. Tribological studies were performed on standard and developed modern friction machines; optical and raster microscopy, micro X-ray spectral analysis, determination of surface layer characteristics were used; hardness measurements were carried out according to known methods on modern equipment, metal-physical studies were carried out on a microscope, interferometer; The parameters of the relief profile were determined using a profilograph. Statistical processing of experimental data by regression analysis and applied mathematical programs were used to determine errors, deviations and correlation coefficients.

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. The sequence of actions in the scheme is aimed at the result of the introduction of modern anti-friction and wear-resistant composite materials into bearings, which makes it possible to slightly expand the range of use of maintenance-free hinge joints and allow the transfer of some aviation components for maintenance according to the actual condition.

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. Testing of materials and bearings on a number of installations allows you to obtain a special certificate of additional type STC (supplemental type certificate), which is issued in the presence of resource laboratory and industrial tests.

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. Reinforced fibers of Iglidur TX1 material and nanocarbon fibers of Zedex ZX-324VMT material provide high tensile strength and modulus of elasticity of polymer composite materials, during friction there is a uniform distribution of contact stresses in local reinforcement zones.

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.

It was determined that the coating of chromium with a thickness of 12-24 μm , applied by the electrolytic method, on an alloy of BT-22 and steel 95X18III under conditions of fretting corrosion at 30 MPa, shows a tendency to set. The vacuum-arc

coating of hard chromium is characterized by wear resistance under fretting corrosion conditions 2-3 times greater than the electrolytic coating, however, at a load of 30 MPa, signs of setting appear. High wear resistance of molybdenum coating (vacuum-arc method) under conditions of fretting corrosion is established, at 20 and 30 MPa, this coating on BT-22 alloy is characterized by a decrease in linear wear by 2.6 and 1.2 times, compared to the coating on 95X18III 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 BT-22 instead of bearing steel 95X18Sh up to 20%, depending on the material and load conditions.

High performance of polymer composite materials Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide has been installed. The maximum axial clearance in bearings with these materials was 0.25, 0,17 and 0,13 mm, respectively, with an operating time of 100 thousand km. cycles at low-frequency amplitude oscillation, which corresponds to the permissible axial clearance during the operation of bearings (up to 0.3 mm). 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. It was also established that before the operating time of up to 60 thousand. cycles of a swivel bearing with a metal-polymer strip shows results worse in wear resistance than polymer composite materials, but all these results lie within the tolerances of normal bearing operation.

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. At low or moderate loads, replacing

the inner ring of the hinge bearing made of steel with a titanium alloy with protective wear-resistant coatings gives a significant gain in the weight of aircraft.

Technological recommendations for the production of articulated plain bearings with polymer anti-friction composite coatings for the aviation industry have been developed. The introduction of technological recommendations based on the creation of a relief surface of the inner surface of the outer bearing cage, fastening of the polymer composite material, taking into account its structural scheme of reinforcement in the production of hinged bearings, will contribute to the manufacture of bearings with predicted characteristics for certain operating conditions of operation without maintenance during the overhaul period.

The scientific novelty of the work lies in the following main provisions.

The theory of internal friction was further developed from the standpoint of the rheology of contact interaction of polymeric composite materials: the dissipation of mechanical energy during low-frequency reverse movements and mechanothermal deformations is provided by the relaxation of local stresses both by the viscoelastic properties of the polymeric thermoplastic connector and by the strength properties of the reinforcing components.

For the first time, a computational model for assessing the stress-strain state of hinged bearings with an increased safety factor in the load range of 3... 200 kN at low-frequency amplitude oscillations due to the use of carbon fiber-reinforced polymer composite materials, which helps to reduce the maximum normal stresses by 1.5-2 times, compared to standard articulated bearings with a metal-polymer tape.

The technology for the production of maintenance-free aircraft swivel bearings during the overhaul period has been improved on the basis of the formation of a relief surface for attaching the polymer composite material to the outer cage, the selection of polymer composite materials with high-strength reinforcing fibers in a connector modified with fillers (C, MoS₂, etc.) and the manufacture of the inner bearing cage made of titanium alloy (with a molybdenum surface coating) to ensure effective damping capacity under vibration conditions.

The practical significance of the results obtained is as follows:

A methodology for evaluating tribotechnical indicators of composite materials during low-frequency reversible 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. The introduction of technological recommendations based on the creation of a relief surface of the inner surface of the outer bearing cage, fastening of the polymer composite material, taking into account its structural scheme of reinforcement in the production of hinged bearings, will contribute to the manufacture of bearings with predicted characteristics for certain operating conditions of operation without maintenance during the overhaul period.

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.

The main results of dissertation research have been published in 17 scientific papers.

In professional publications:

1. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Kindrachuk M.V., Khimko M.S. Estimation of dynamic effective viscosity of lubricants in tribotechnical contact. *Friction and wear problems*. 2014. No. 4. P. 83-89 (category B).

2. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M.S. Modeling the intensity of wear intensity of the cylinder liner of an internal combustion engine. *Friction and wear problems*. 2015. № 1. P. 140-145 (category B).

3. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M.S., Shakuliev S.V. Rheological properties of lubricating layers and energy load in friction contact at alternating contact contact voltages. *Friction and wear problems*. 2015. № 4. P. 21-27 (category B).

4. Borodiy V.M., Kudrin AP., Yakobchuk O.E., Khimko M.S. Influence of pressure on the formation of the profile and thickness of the lubricating film in the local rolling contact under conditions of elastohydrodynamic lubrication. *Friction and wear problems*. 2016. № 3. P. 46-51 (category B).

5. Khimko M.S., Yakobchuk O.E., Khimko A.M., Naumenko N.O. Methods of testing hinged bearings for wear resistance. *Friction and wear problems*. 2017. № 1 (74). P. 118-122 (category B).

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. No. 1 (102). P. 73-83 (category B).

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.

8. Khimko M.S., Khimko A.M., Mnatsakanov R.G., Klipachenko V.V., Makarenko R.O. Wear resistance of polymer composite materials for hinged bearings. *Friction and wear problems*. 2024. No 2 (103). Pp. 29-42. (category B).

9. Khimko M.S., Khimko A.M., Mnatsakanov R.G., Mikosyanchyk O.M. Influence of thermophysical properties of metal-polymer composite materials on wear resistance. *Friction and wear problems*. 2024. № 3 (104). Pp. 91-100. (category B).

In foreign specialized publications:

10. Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, M.S. Khimko Evaluation of effectivity of 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.

Conference materials and abstracts:

11. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M.S., Petrenko M.A. Influence of contact load on antifriction properties of base oils. *Avia-2015: XII International Scientific and Technical Conference*, April 28-29, 2015, Kyiv: materials. Kyiv: NAU, 2015. P. 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. Khimko M.S., Grechukha A.V. Installation for testing hinged plain bearings. *2024 XXIV International Scientific and Practical Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists "Flight. Modern problems of science. Modern aviation technologies. Aircraft Airworthiness Support"*, April 4-5, 2024, Kyiv: NAU, 2015. Pp. 3-4.

14. Khimko M.S., Mnatsakanov R.G., Khimko A.M. Development of a structural scheme of research of hinged bearings and formation of the principles of selection of metal-polymer tribopars. *XVII International Scientific and Practical Conference "Integrated Intelligent Robotic Complexes" (IIRTK-2024)*, May 21-22, 2024 Kyiv: NAU, 2024. Pp. 118-120.

15. Khimko M.S., Klipachenko V.V., Filonenko O.E. Analysis of composite polymer materials for aviation articulated bearings. *XVII International Scientific and Practical Conference "Integrated Intelligent Robotic Complexes" (IIRTK-2024)*, May 21-22, 2024 Kyiv: NAU, 2024. P. 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. P. 1.3.60-1.3.63.

Patents:

17. Pat. 92071, Ukraine, IPC G01N 3/56. Method of running in friction pairs in non-stationary working conditions / Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko M. S.; applicant and patent owner Mykosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M.S. – No. u 2014 02492; declared. 13.03.2014; Publ. 25.07.2014, Bul. № 14. – 4 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АЛАНІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВІАЦІЇ.....	33
1.1 Застосування антифрикційних металополімерних та полімерних матеріалів.....	33
1.2 Використання шарнірних підшипників в авіаційній галузі та аналіз їх пошкоджуваності.....	38
1.3 Аналіз структур полімерних композиційних матеріалів та реологія їх зносостійкості.....	48
1.4 Технологічні аспекти нанесення металевих, металополімерних та полімерних композиційних матеріалів.....	57
Висновки до розділу 1.....	64
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ.....	65
2.1 Розробка структурної схеми досліджень шарнірних підшипників та формування принципів вибору металополімерних та полімерних композиційних матеріалів в якості покриттів.....	66
2.2 Модернізація машини для досліджень процесів фретинг-корозії для випробувань шарнірних підшипників в умовах вібрацій.....	70
2.3 Розробка методики досліджень матеріалів та покриттів при низькочастотних реверсивних рухах.....	78
2.4 Розробка методики для лабораторних ресурсних випробувань шарнірних підшипників ковзання.....	80
2.5 Планування експерименту та статистична обробка результатів при випробуваннях матеріалів в умовах вібрації.....	85
Висновки до розділу 2.....	88

РОЗДІЛ 3 ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ	
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ.....	90
3.1 Вибір матеріалів для авіаційних шарнірних підшипників.....	90
3.2 Дослідження антифрикційних композиційних матеріалів при зношуванні в умовах вібрації.....	95
3.3 Дослідження трибохарактеристик антифрикційних композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах.....	102
3.4 Дослідження трибохарактеристик матеріалів для внутрішньої обойми шарнірних підшипників.....	109
Висновки до розділу 3.....	128
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА	
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ	
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ.....	131
4.1 Визначення теплофізичних властивостей на зносостійкість композиційних матеріалів.....	131
4.2 Моделювання напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними матеріалами.....	138
4.3 Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану елементів шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами.....	143
4.4 Розрахунок довговічності шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами.....	154
Висновки до розділу 4.....	164
РОЗДІЛ 5 ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ	
ПАРАМЕТРІВ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМИ	
АНТИФРИКЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.....	166
5.1 Ресурсні лабораторні випробування шарнірних підшипників з композиційними матеріалами.....	166
5.2. Промислові випробування шарнірних підшипників.....	173

5.3. Розробка технологічних рекомендацій, щодо виготовлення шарнірних підшипників з вставками з композиційних матеріалів для авіаційної галузі.....	178
Висновки до розділу 5.....	185
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	187
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ.....	190
ДОДАТКИ.....	209

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

КМ – композиційний матеріал;
МПС – металополімерна стрічка;
НДС – напружено-деформований стан;
ПС – повітряне судно;
ТО – технічне обслуговування;
ШП – шарнірний підшипник;
РА – поліаміди;
РЕТР – поліетилентерефталат;
PPS – поліфеніленсульфід;
PEEK – полієфірефіркетон;
PEI – полієфірімід;
PET – поліетилентерефталат;
РОМ – поліацетал;
PTFE – політетрафторетилен.

ВСТУП

Шарнірні підшипники (ШП) ковзання отримали широке застосування в машинобудуванні та авіаційної промисловості. Їх використовують для роботи в агресивних середовищах, при великих вібраційних та ударних навантаженнях, в нерухомих з'єднаннях та там, де потрібні високі контактні навантаження та низькі швидкості ковзання. Вони призначені для передачі радіальних, осьових та комбінованих навантажень у рухомих чи нерухомих з'єднаннях машин та механізмів. ШП використовують для компенсації перекосів, температурних та пружних деформацій які виникають під час експлуатації повітряних суден. Особливе місце у лінійці ШП займають підшипники із матеріалами, які не потребують змазування протягом всього терміну служби підшипника.

Підшипники із металополімерними вставками досить широко використовуються у вузлах тертя. Різні комбінації металевих та полімерних конструктивних елементів дають можливість проектувати вузли тертя під конкретну задачу. У свою чергу, полімерні матеріали набувають нових фізико-хімічних та механічних властивостей після їх модифікації функціональними, як правило, антифрикційними наповнювачами.

Металополімерні матеріали і полімерні композиційні матеріали (КМ) відіграють важливу роль в триботехнічних системах. Їх використовують для заміни дефіцитних металів і сплавів, значному підвищенні технологічності, надійності і довговічності вузлів тертя. Вузли машин із застосуванням полімерних КМ, мають меншу масу, працюють практично безшумно, мають високу демпфуючу здатність, можуть працювати без мастила. Це особливо актуально для авіаційної промисловості. Деталі з полімерних матеріалів можуть експлуатуватися у вакуумі та хімічно активних середовищах, при криогенних та підвищених температурах, у широкому інтервалі навантажень та швидкостей ковзання. В даний час антифрикційні полімерні матеріали широко застосовуються в транспортному та енергетичному машинобудуванні, технологічному обладнанні та побутовій техніці, охоплюючи величезну номенклатуру вузлів тертя технічного і медичного

призначення, починаючи з футерувальних плит гідроелектростанцій і закінчуючи мікророботами для очищення крові.

Застосування полімерних КМ дозволяє значно знизити трудомісткість виготовлення деталей вузлів тертя за рахунок високопродуктивних технологій, які заощаджують ресурси. Наприклад, при заміні металів ливарними пластмасами трудовитрати знижуються в 5...6 разів, а собівартість в 2...5 разів; при використанні полімерних матеріалів замість металів та напівфабрикатів на їх основі собівартість виробу знижується у 4...9 разів.

У відповідності до визначення, КМ складається із одної або більше неперервної фази однорідної матриці та із одного або більше армуючого компонента. В зв'язку з цим надійна робота трибосистем, де застосовуються КМ, в першу чергу залежить від структурно-морфологічного фактору, який впливає на трибомеханічні характеристики матеріалів. Принцип отримання КМ складається із заздалегідь створеної комбінації двох різноманітних фаз (наповнювачів та матриці) за допомогою певних технологічних прийомів. В результаті наповнення одержують матеріали, фізичні та механічні властивості яких відрізняються від матриці та наповнювача. Вибір наповнювачів полімерних КМ залежить від експлуатаційного призначення виробу, необхідності зміни певних трибомеханічних характеристик та типу полімерної матриці.

Зазвичай полімерні КМ, які застосовуються у підшипниках ковзання, поділяються на КМ армовані неперервними волокнами або тканинами; дисперсно-зміцнені КМ; КМ на основі сумішей полімерів, які не здатні до розчинення один в одному і характеризуються певним розподіленням частинок полімеру одної природи в матриці іншого полімеру.

ШП ковзання із металополімерними вставками дуже популярні в авіаційній промисловості. Вони виготовляються з нержавіючих та корозійностійких сталей та не вимагають технічного обслуговування. Компактні, відрізняються надзвичайно високою несучою здатністю та вантажопідйомністю і використовуються в первинних і вторинних системах управління польотом. Мають конструкцію шарнірного типу. Внутрішнє кільце виготовляється з високоякісної сталі із

полірованою сферичною поверхнею. Зовнішнє кільце забезпечене композиційним металополімерним матеріалом на основі політетрафторетилену на підкладці з бронзи на основі олова (металополімерна стрічка). Для точної пригонки до сферичної поверхні внутрішнього кільця та забезпечення оптимальної поверхні ковзання зовнішнє кільце виготовляється методом холодного формування навколо внутрішнього кільця.

Останнім часом на ринку з'являються багато високотехнологічних інженерних антифрикційних полімерних КМ для застосування їх у трибовузлах машин. Ці матеріали за своїми характеристиками в деяких випадках перевищують по зносостійкості металополімерну стрічку (МПС), яку було створено у 60-х роках попереднього століття. Сучасні антифрикційні КМ мають велику номенклатуру та більш вузький діапазон умов роботи. Але взамін цього вони більш технологічні, дешевші, екологічні, легші та мають кращі трибологічні характеристики.

Таким чином, оцінка трибологічних характеристик сучасних композиційних полімерних матеріалів для ШП в експериментальних умовах, наближених до реальних умов їх експлуатації в авіаційній промисловості дозволить підвищити техніко-економічні показники повітряних суден (ПС) та знизити витрати на технічне обслуговування (ТО).

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

ШП ковзання із полімерними КМ в авіаційній промисловості використовуються масово. В крупних 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 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, Kooyo, 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., Сав'єра 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 авіаційної галузі. Складність полягає в тому, що неможливо визначити універсальний КМ для широкого діапазону амплітуд та навантажень. Лише в останні роки з'явилися 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-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. 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-X16 «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-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. 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 необслуговуваних 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 PMT-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 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, 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 (С, MoS_2 та ін.) сполучнику та виготовлення внутрішньої обойми підшипника з титанового сплаву (з поверхневим покриттям з молібдену) для забезпечення ефективною демпфуючою здатністю 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 перекоосу 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 нестационарних 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 ХХІ 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВІАЦІЇ

1.1. Застосування антифрикційних металополімерних та полімерних композиційних матеріалів.

Довговічність та ефективна експлуатація сучасних машин та механізмів на 80 % залежить від правильного вибору трибосистем [1-3]. Використання трибосистем з антифрикційними КМ дозволило досягнути суттєвого прогресу у підвищенні ресурсу та довговічності трибоспряджень. Ці матеріали мають жорсткість на порядки меншу, ніж метали, і, деформуючись під дією робочих навантажень, суттєво збільшують площу фактичного контакту трибосполучень, знижуючи величину фактично діючих контактних напружень [4-8]. Залежно від необхідного ресурсу, умов експлуатації та економічності полімерні КМ використовуються у вигляді різних покриттів, облицювань та монолітних деталей трибосистем. Останніми роками швидко розширюється асортимент КМ як з урахуванням металополімерними компонентами так і полімерних матеріалів армованих спеціальними волокнами [9, 10].

Антифрикційні полімерні КМ з армуючими волокнами у вигляді покриттів на деталях трибосистем застосовуються для експлуатації при досить низьких швидкостях ковзання (0,01 – 0,5 м/с) та високих контактних навантаженнях (до 260 МПа) [11] в умовах реверсивного або обертового руху при коефіцієнтах перекриття, близьких до одиниці.

Завдяки своїм властивостям полімерні антифрикційні КМ та покриття широко використовуються в космічній [12] та авіаційній [13] техніці.

Підшипники з антифрикційними покриттями використовуються у конструктивних вузлах шасі та системі управління майже всіх сучасних повітряних суден, таких як В-767, В-777, В-787, А320, А330, А340, Ан-124, Ан-225 застосовується більше тисячі таких підшипників. На полімерних матеріалах працюють опори ракетних двигунів та газотурбінних двигунів в ПС цивільної

авіації [14]. Ці матеріали широко використовуються в поворотних вузлах та кулькових опорах легкових та вантажних автомобілів та спеціальної кар'єрної техніки, шарнірах рульових тяг. Подібні матеріали знайшли застосування в текстильній промисловості. Вони використовуються в транспортному та підйомному машинобудуванні, у харчовій та фармацевтичній промисловості, де не допустимо мастило, у варіаторах, тощо. Найбільш широко полімерні КМ на основі волокон застосовують у різних масових виробках: стандартних полімерних підшипниках ковзання, згорнутих втулках з листа із металополімерними покриттями, плоских напрямних у вигляді накладок та ін. [15-20]. На рис. 1.1 представлено сфери застосування підшипників ковзання із полімерними КМ в якості спеціальних антифрикційних покриттів.

В роботах [21, 22] проаналізовано застосування покриттів на основі самозмащувальних антифрикційних волокнітів. Аналіз патентів [23-25] та робіт [26-28] показує високу ефективність цих матеріалів. Однак поведінка аналізованих покриттів, що мають одну з найвищих (порівняно з іншими антифрикційними матеріалами) несучих здібностей, не досліджено в умовах дії динамічних навантажень, що виникають при вібронавантаженні, реверсивного руху та пускових періодах.

Стандартизовані підшипники ковзання з металополімерними покриттями випускаються цілим рядом фірм: NSK, INA, SKF, NTN, FLURO, Koyo, FAG та ін. [29, 30]. Серійне виробництво подібних підшипників налагоджено і в Україні – фірмою ООО Укртехавіа.

У текстильній і харчовій промисловостях, де застосування мастильних матеріалів обмежене, антифрикційні композиційні матеріали і покриття з них практично незамінні. Використання цих композитів у ткацькому, харчовому та медичному обладнанні дозволило уникнути застосування рідких та пластичних мастильних матеріалів [31-33].

Крім того, антифрикційні полімерні матеріали, використовуються в самому різному технологічному металообробному обладнанні. Вони знайшли застосування в якості покриттів направляючих супортів металорізальних верстатів

сучасних станків типу FDB Maschinen Turner, JET BD-920, Proma SK-550 та направляючих обрізного кривошипного преса, де виникають зусилля в 2500 кН та більше [24, 26, 34].



Рис. 1.1. Области застосування антифрикційних полімерних композиційних матеріалів в шарнірних підшипниках.

В роботі [35] показано використання розроблених планок з антифрикційним покриттям, що склалися з двох модулів довжиною 280 мм, а композит покриття

формувався на основі технічної тканини "Нафтлен-8" та епоксидного матричного сполучника у вигляді товарного клею "K300". В даному випадку нанесення антифрикційного покриття виконувалося під час ремонту преса та застосовувався сполучник гарячого затвердіння. Відсутність нагрівального пристрою та габарити напрямних спричинило необхідність поділу напрямних на окремі модулі, що суттєво збільшило трудомісткість та знизило якість покриття через стики.

В роботах [36, 37] автори зазначають, що найбільш терmostійкими є композиційні покриття на фенольних (АФК-101), епоксидних (K300) та інших сполучниках. Для цих сполучників використовують спеціальні автоклави практично будь-яких габаритів. Подібні матеріали можуть значно розширити область раціонального застосування трибосистем з полімерними КМ [38].

Аналізуючи застосування полімерних КМ в промисловості, можна сказати, що неможливо на сьогодні уявити техніку без застосування в ній цих матеріалів. При виробництві техніки, підшипників, агрегатів, приборів підприємства часто використовують напівфабрикати готових антифрикційних матеріалів (рис. 1.2) або закупають готові технології застосування антифрикційних полімерних КМ (рис. 1.3) для використання їх у виробництво своєї продукції.

Широке застосування трибосистем з антифрикційними полімерними КМ в різних галузях промисловості обумовлено здатністю даного матеріалу одночасно забезпечувати цілий комплекс конструкційних і антифрикційних властивостей [39-41] трибосистем при одночасному підвищенні економічності [42]. Здешевлення триботехнічних конструкцій виходить за рахунок відсутності складних систем мащення та потреби у частих техоглядах.

До основних переваг цих покриттів можна віднести такі [43]:

- високі ресурсні характеристики, що забезпечують багато циклів навантаження;
- виключення поточного обслуговування з нанесення мастильних матеріалів внаслідок самозмащування;
- значна несуча здатність;

- здатність знижувати вібронавантаження трибоконтакту та рівень шуму трибосистеми;
- низькі втрати на тертя (коефіцієнт тертя до 0,01);
- здатність працювати в агресивних (кислих та лужних) водних та в середовищах при застосуванні рідких мастильних матеріалів;
- повне виключення процесів захоплення (як першого, і другого роду);
- економічність.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.2. Полімерні антифрикційні композиційні матеріали у вигляді напівфабрикатів: а – циліндри для втулок, б – листовий матеріал, в – прутки для напилення, г – порошок та гранули для вдавлювання в інший матеріал



Рис. 1.3. Металополімерні композиційні антифрикційні матеріали у вигляді напівфабрикатів та готових виробів.

1.2. Використання шарнірних підшипників в авіаційній галузі та аналіз їх пошкоджуваності.

Конструкція ШП не має тіла кочення. Данні підшипники працюють в умовах де немає кругового обертання. Широке застосування ця група підшипників знайшла у авіаційній галузі.

Шарнірні підшипники призначені для передачі радіальних, осьових та комбінованих навантажень у рухомих чи нерухомих з'єднаннях машин та механізмів. Їх використовують для компенсації перекосів (рис. 1.4), температурних та пружних деформацій, які виникають під час експлуатації ПС.

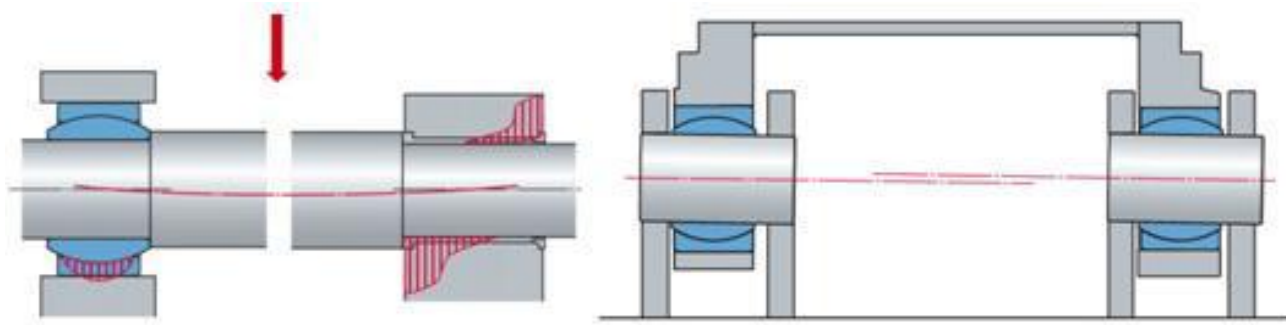


Рис. 1.4. Використання шарнірних підшипників як компенсаторів перекосу.

Усі ШП, які використовуються в авіаційній галузі [44, 45] можна розділити на дві групи за способом змащування робочих поверхонь:

1. Шарнірні підшипники, що вимагають підведення мастильного матеріалу (з поверхнею ковзання сталь - сталь). Поверхні ковзання кілець, виготовлених з високовуглецевої хромистої підшипникової сталі, оброблені фосфатами, після чого сухим способом покриті дисульфідом молібдену (рис. 1.5). Для полегшення подачі мастильного матеріалу до поверхонь ковзання в кільцях виконують мастильні канавки і отвори. Для протидії витoku мастильного матеріалу і проникнення пилу вони можуть оснащуватися ущільненнями.

ШП з поверхнею ковзання сталь - сталь призначені для сприйняття знакозмінних важких, ударних чи статичних навантажень. Вони виготовляються із високоякісних підшипникових сталей ШХ15, ШХ15СГ або нержавіючої сталі 95Х18Ш [46].



Рис. 1.5. Шарнірні підшипники SKF (Швеція), покриті фосфатами та покриттям дисульфиду молібдену на робочих поверхнях.

2. Шарнірні підшипники без зовнішнього мастильного матеріалу - самозмащувальні (з поверхнею ковзання сталь-металополімер [19], сталь-органоволокніт [35] або виконані з бронзи з твердим змащувальним матеріалом (рис. 1.6). ШП призначені в першу чергу для сприйняття великих навантажень постійного напрямку, при невеликих швидкостях ковзання. Їх застосовують у вузлах з підвищеними вимогами до довговічності та при обмеженому обслуговуванні опор, коли використання підшипників з поверхнею ковзання сталь-

сталь недоцільно. Підшипники, що самозмазуються, виготовляються зі сталі ШХ15, 95Х18Ш, 12Х18Н9Т.

При маркуванні підшипників з парою тертя сталь-металофторопласт, сталь-органоволокніт їх поділяють також для рухомих та не рухомих з'єднань: ШН - шарнірний підшипник для рухомих з'єднань з поверхнею ковзання сталь-металофторопласт - мають нероз'ємну конструкцію; ШЛТ - шарнірний підшипник для рухомих з'єднань з поверхнею ковзання сталь-органоволокніт та зовнішні кільця мають розломну конструкцію; Ш..Е - шарнірний підшипник із внутрішніми кільцями з композиційного матеріалу - суміші поліаміду з фторопластом.



Рис. 1.6. Шарнірні підшипники з бронзовою втулкою та вкрапленнями твердого змащувального матеріалу на робочих поверхнях.

Серійні підшипники є працездатними при температурі до $+120^{\circ}\text{C}$. Допускається короткочасна робота підшипників до температури $+150^{\circ}\text{C}$. Для важчих температурних умов застосування випускаються підшипники спеціальних конструктивних рішень [47].

На жаль, для вибору типу підшипника не можна скласти загальні правила, так як зазвичай слід враховувати безліч факторів, що містить ряд суперечностей, які необхідно вирішити або оптимально врівноважити.

Радіально-упорні шарнірні підшипники – це підшипники ковзання, що сприймають навантаження в радіальному та осьовому напрямках. На сьогоднішній день шарнірні радіально упорні підшипники зазвичай застосовують в умовах, де нема одностороннього руху. Вони виконуються з полімерних матеріалів [48, 49] або кераміки, можуть експлуатуватись без додаткового змащення при температурах

від -40 до +240 °C (рис. 1.7). Дуже стійкі до агресивних середовищ та забруднених поверхонь. Використовуються в сучасних вузлах ПС малої та приватної авіації при помірних навантаженнях для виконання реверсивних рухів.



Рис. 1.7. Радіально-упорні шарнірні підшипники фірми IGUBAL з використанням антифрикційного полімерного матеріалу IGLIDUR.

Шарнірні головки - це різновид шарнірних підшипників, які здатні сприймати осьові, радіальні, а також комбіновані навантаження в 3-х площинах. Крім того, вони мають функцію самоцентрування, що особливо актуально для ряду пристроїв.

Їх використовують для шарнірного з'єднання валів або тяг, що повертаються менш ніж на один оберт з невеликими швидкостями, або часто змінюють напрямок обертання. Конструктивно виконуються у вигляді головки з хвостовиком (рис. 1.8). В отвір головки запресовано сферичний ШП ковзання з різною комбінацією контактних поверхонь (сталь-сталь, сталь-бронза, сталь-металфторопласт). У системах керування ПС та вертольотами, в агресивних середовищах та місцях підвищеної запиленості використовують комбінацію матеріалів метал-металополімерний композиційний матеріал або метал-політетрафторетилен. Такі варіанти конструктивних рішень дуже широко використовуються в авіаційній галузі за рахунок малої ваги виробу. Тут поєднують важіль та підшипник в одному рішенні. Всі сучасні ПС та гелікоптери місцевих повітряних ліній в своїх конструкціях використовують саме цей варіант [50, 51]. ШП в конструктивному виконанні використовують лише за умов, де є значні навантаження на конструкцію шарнірів та у важких умовах роботи.



Рис. 1.8. Шарнірні головки з антифрикційними полімерними матеріалами, що використовуються в гідравлічній системі та системах керування повітряних суден.

Кульовий шарнір тяги – це сферичний підшипник ковзання, що забезпечує безперебійне функціонування за наявності мінімального зазору. Завдяки високій стійкості до стирання та великому куту роботи, це рішення підходить для механізмів, які сприймають значно менше навантаження, ніж ШП та шарнірні головки [52]. Великим недоліком таких шарнірів є їх неремонтопридатність. Зазвичай, шарніри та тяги виконані в одному нерозбірному корпусі (рис. 1.9).

Шарнірні тяги використовуються дуже широко в автотранспортній індустрії, а також в приватних ПС малої авіації. ПС малої авіації (до 4 місць) використовує для з'єднань своїх важелів та тяг саме цей тип шарнірів. Конструкція повітряного судна малої авіації в процесі польоту більше деформується під дією зовнішніх факторів (навантаження, вібрація, турбулентність та ін.), ніж інші літаки. У більшості випадків у сучасних ПС намагаються використовувати саме шарніри із полімерними антифрикційними КМ.



Рис. 1.9. Кулькові шарніри важелів повітряних суден малої авіації.

До основних переваг використання підшипників з антифрикційними металополімерними та полімерними композиційними матеріалами можна віднести такі [53]:

- високі ресурсні показники, що співвідносяться з показниками до роликів підшипників кочення;
- зменшення ділянок контролю при технічному обслуговуванні повітряного судна;
- здатність знижувати вібронавантаження трибоконтакту та рівень шуму трибосистем;
- низькі втрати на тертя, що співставляються зі звичайними роликовими підшипниками;
- здатність працювати в місцях із підвищеним вмістом пилу та в умовах агресивного середовища;
- повне виключення процесів руйнування від втоми, а також захоплення за умов нормативної експлуатації ПС.

Тенденції на використання підшипників із антифрикційних металополімерних та полімерних КМ можна побачити на таких прикладах, як ПС

України (Ан-124, Ан-148 та ін.), так і закордонного виробництва (Boeing, Airbus, MD, Mi, Ка та ін.).

Наприклад: на гелікоптері Мі-8МТВ-1 важелі, що змінюють кут несучих лопатів під керуванням автомату перекосу, до 1994 року застосовувалися підшипники ШС30Ю згідно технічної документації [54] (додаток Е). Кожен важіль має по два ШП, які передають зусилля від тарілки автомату перекосу (рис. 1.10). Під час перехідних режимів (зліт, посадка, маневрування) ці важелі працюють в інтенсивному режимі, а ШП сприймають реверсивний рух. Завдяки тому, що це один із найвідповідальніших вузлів в гелікоптері, згідно технічної документації ТО відбувається раз на 50 годин роботи гелікоптера. При роботі гелікоптера в складних умовах (підвищена температура, забруднене пилом повітря, робота біля моря або океану) цей показник зменшується в 2 рази і складає – 25 годин роботи. Технічне обслуговування зводилося до шприцювання підшипників мастилом ЦИАТИМ.

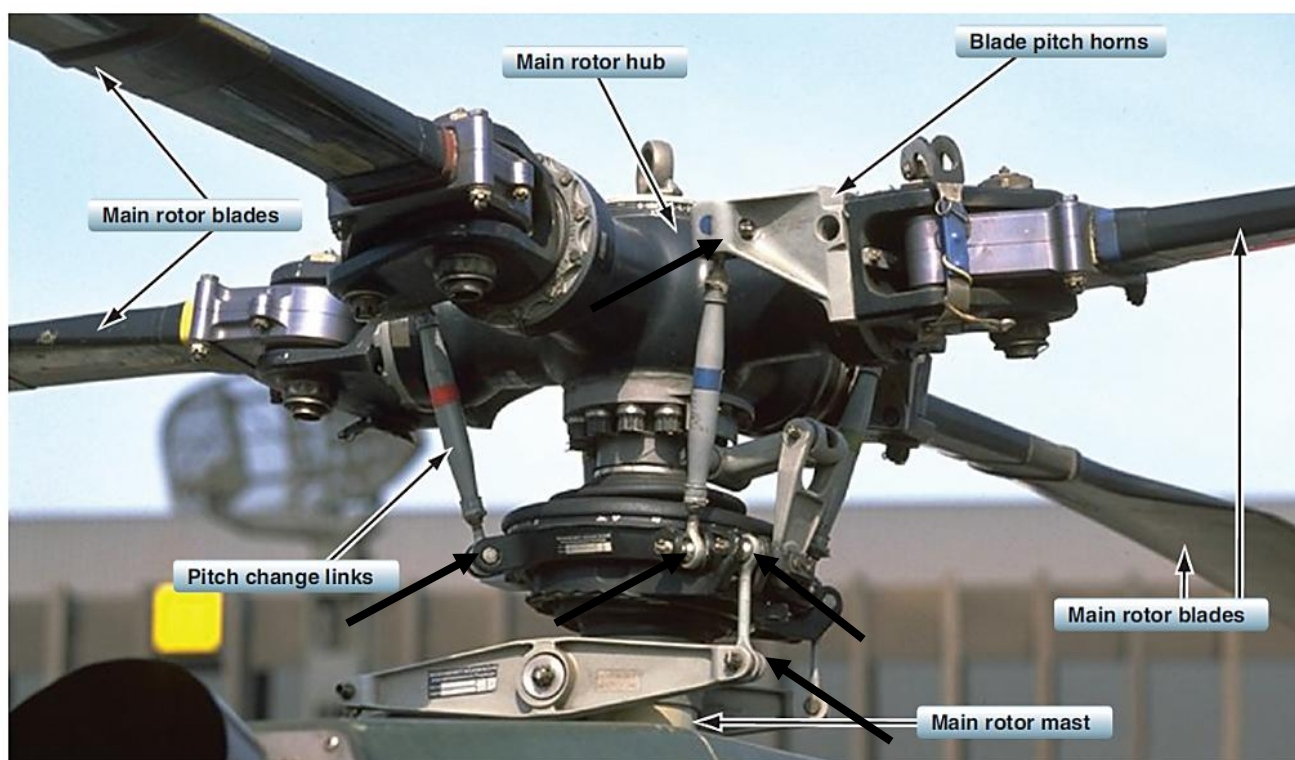


Рис. 1.10. Приклади розташування рычагів із шарнірними підшипниками в автоматі перекосу гелікоптера.

Під час модернізації гелікоптера в 1994 році ці вузли перейшли на роботу з підшипниками ШН30ЮТ. Це необслуговуємий ШП, який виконаний з

застосуванням антифрикційного металополімерного матеріалу і не потребує змащування під час всього терміну служби. Технічне обслуговування значно спростилося і зводилося до того, що необхідно було контролювати сумарний зазор всіх 5 підшипників на верхній опорі після нештатних умов експлуатації (перенавантаження згідно приладів, груба посадка). Сумарний знос підшипників на одній опорі не повинен перевищувати 1,2 мм згідно технічної документації (додаток Е).

Наступний приклад використання ШП на основі антифрикційних металополімерів у відповідальних вузлах ПС це конструкція шасі літака Ан-148-100 (рис. 1.11). Так, у місцях кріплення важелів шасі використовуються спеціальні підшипники 6ШН20ЮТ. Підшипники працюють лише при зльотах та посадках при контакті літака з злітно-посадковою смугою. Робота підшипника - це повертання його на кут $\pm 20^\circ$ під дією динамічного навантаження маси літака під час посадки. Згідно DIN ISO 12240-1 та ГОСТ 3635-78 (навантаження та кількість циклів напруження, порядок контролю зазорів) та вимог СТП 651.02.061-92 (навантаження для шарнірних підшипників, база випробувань на ресурсні дослідження, умови проведення випробувань) підшипник має витримати 5 тисяч таких коливань під дією динамічного навантаження близько 100 тон. Підшипник вважається непридатним, коли осьовий зазор шарніру буде перевищувати 0,3 мм. Аналіз пошкоджень ШП аналізувалось та представлено в звітах про наукову дослідну роботу [55, 56] між Національним авіаційним університетом, ДП Завод «Антонов» та ООО «Укртехавіа».

Пошкодження ШП з антифрикційними металополімерними матеріалами в умовах нормальної експлуатації зводяться до зношення полімерного матеріалу та бабіту в структурі МПС. Допускається контакт олов'янистої бронзи зі сталлюю поверхнею внутрішнього кільця без значних пошкоджень внутрішньої обойми ШП. При тривалій роботі підшипників відбувається зношування антифрикційного пластикового шару (рис. 1.12) та зношування наступного шару бабіту (рис. 1.13). В таких випадках з'являється великий зазор між обоймами підшипника в радіальному та осьовому напрямі. Зазор буде залежати від товщини полімерного та бабітового

наповнювача між стальними обоймами ШП. В залежності від типу та призначення підшипників товщина прошарку варіюється від 0,1 до 1 мм.

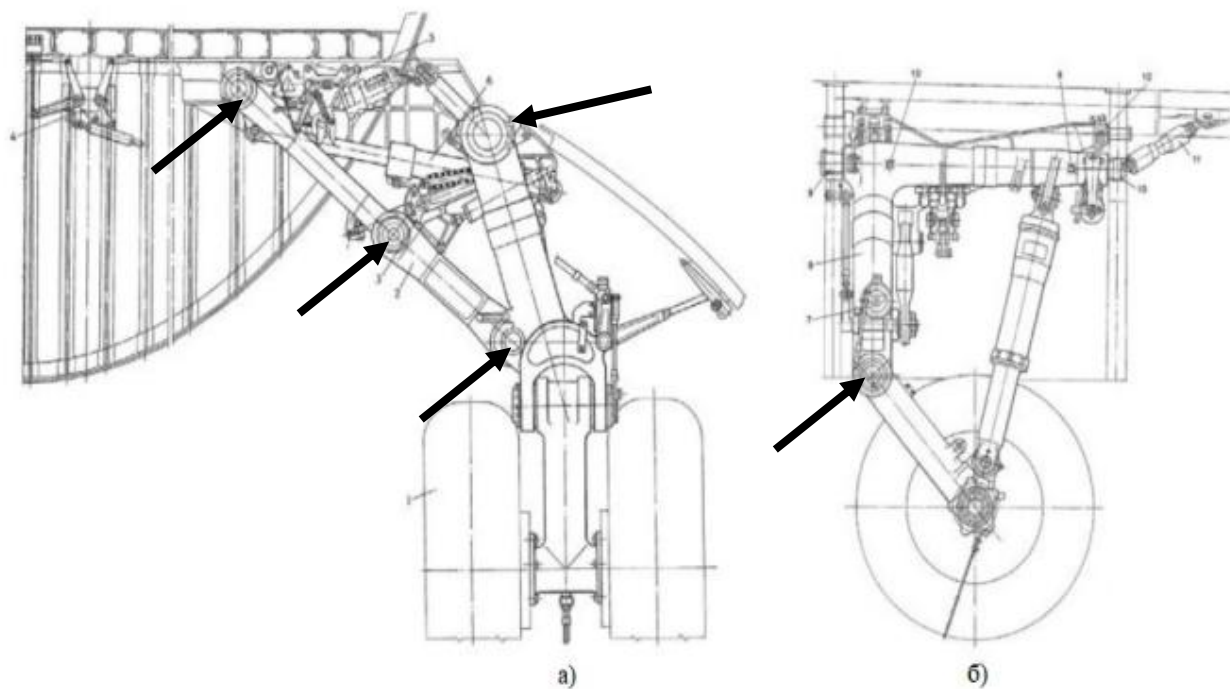


Рис 1.11. Місця встановлення шарнірних підшипників на шасі літака Ан-148-100.

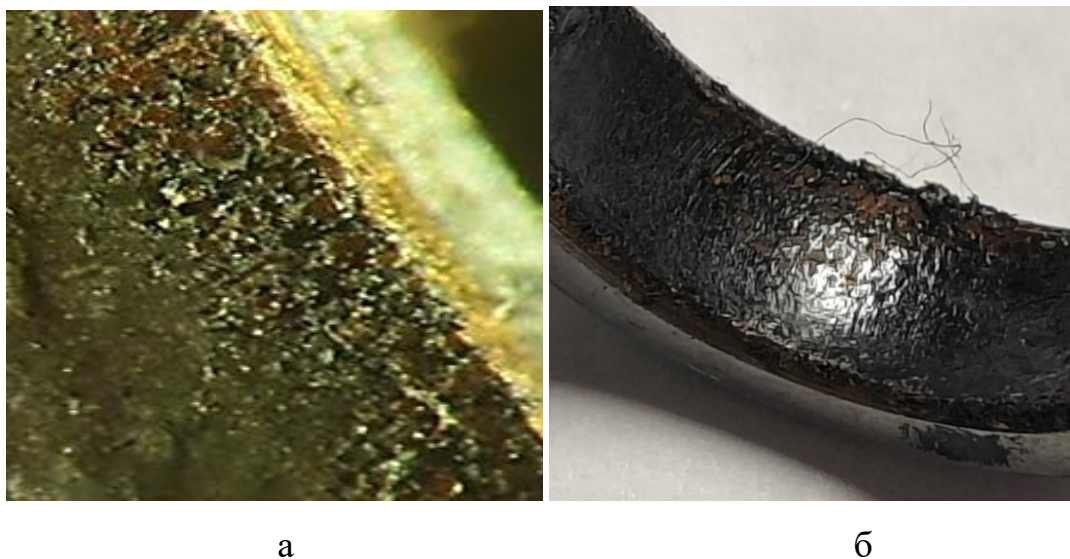


Рис. 1.12. Пошкодження зносостійкого шару (а) металополімерної стрічки (б) підшипника ШН10ЮТ.

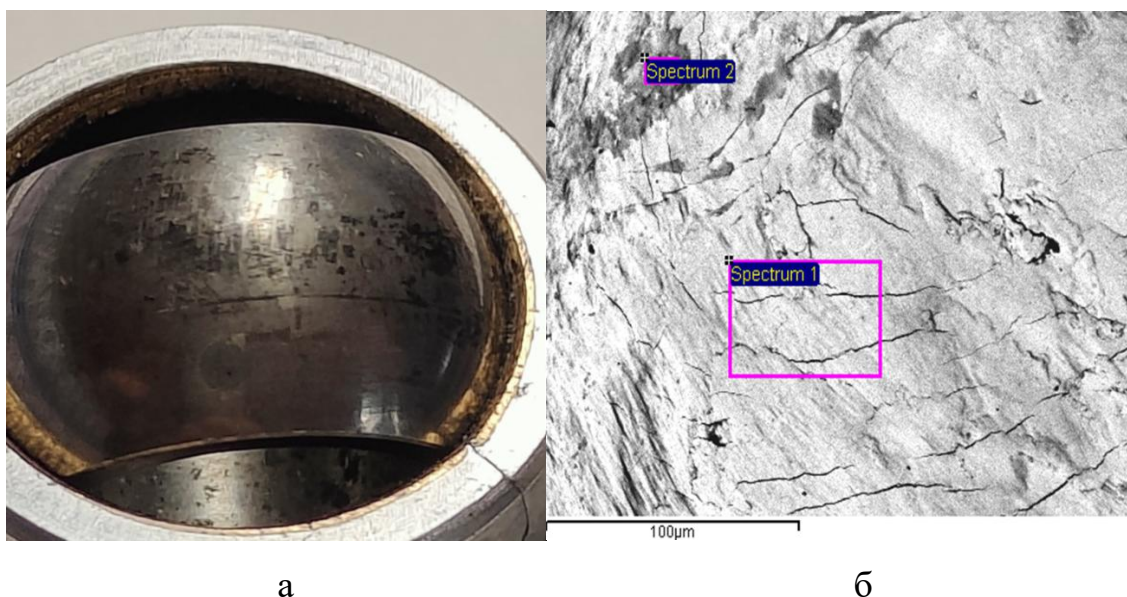


Рис. 1.13. Місця схоплювання (а) та катастрофічного зношування (б) поверхонь шарнірних підшипників.

Також негативний вплив на трибопару підшипників мають такі фактори, як температура та навантаження вище розрахункового [57, 58]. Суттєвий вплив має і швидкість ковзання антифрикційного покриття по сталевій поверхні. При неправильному підборі матеріалів відбувається підвищення температури та розм'якшення полімерної частини трибопари. В таких випадках у металополімерний матеріал додатково додають армуючі волокна – волокніти [36, 38, 59].

Крім того, у металополімерних трибосистемах, у зв'язку зі значною відмінністю міцності та жорсткості полімерної опори та сталевого валу, істотний вплив на ресурс надає шорсткість поверхні сталевих контртіл [60]. Тверді мікровиступи шорсткості сполучених металевих деталей, що контактують з композиційними покриттями, можуть розривати окремі філаменти фторопластових ниток або руйнувати контактну поверхню в результаті мікрорізання. У роботі [61] наведено залежності основних триботехнічних параметрів КМ класу, що розглядається, від шорсткості сполученої металевої поверхні (рис. 1.14). Необхідно відзначити, що наведені на рисунку 1.14 експериментальні результати відносяться до антифрикційних КМ з фенольною матрицею.

Таким чином, зважаючи на високу ефективність використання антифрикційних металополімерних та полімерних КМ в цілому ряді трибосистем в машинобудуванні, для розширення області їх застосування в авіаційній та космічних галузях, вимагаються додаткові дослідження.

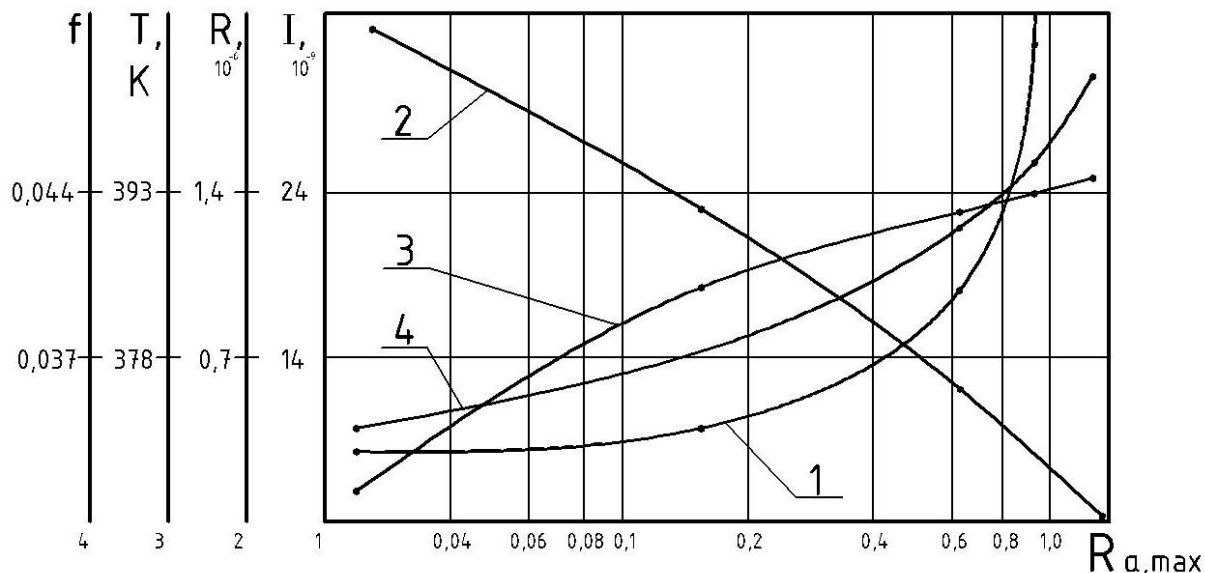


Рис. 1.14. Вплив шорсткості контртіла на параметри металополімерної трибосистеми з композиційним покриттям [61]: 1 – інтенсивність зношування; 2 – ресурс; 3 – температура; 4 – коефіцієнт тертя.

1.3. Аналіз структур полімерних композиційних матеріалів та реологія їх зносостійкості.

Серед термопластичних антифрикційних матеріалів найбільшого поширення набули: поліаміди (РА), поліфеніленсульфід (PPS), політетрафторетилени (PTFE), поліетилентерефталати (PET), поліефірефіркетони (РЕЕК), поліефіріміди (РЕІ), поліетилентерефталат (РЕТР), поліацетали (РОМ), серед реактопластів - епоксидні та фенолформальдегідні смоли.

При введенні до складу полімерних матеріалів твердих змащувальних матеріалів та інших антифрикційних волокнистих та дисперсних наповнювачів зносостійкість КМ зростає від 2 до 50 разів і більше. Як антифрикційні наповнювачі застосовують тверді мастила (графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору, слюда),

окисли металів, особливо м'яких (цинк, олово, свинець, мідь), солі (хлориди, сульфіді, селеніди, телуриди), вуглецеві скляні волокна та інше [5, 62, 63].

Як правило всі сучасні антифрикційні матеріали на полімерній основі є складним композитом, що складається з термопласту та спеціальних дисперсних домішок, або ниток іншої хімічної природи з ефективною адгезією в матричному сполучнику.

В якості антифрикційної компоненти в матеріалах використовуються РА [64] або частіше PTFE [65] нитки. Фторпластові або інші армуючі волокна мають цілу низку переваг. Вони допускають ткацьку переробку, більш термостійкі, мають унікальні властивості [66], але характеризуються низькою адгезійною здатністю. Однак, як зазначено в роботі [67], характеристики міцності PTFE досить низькі а погана адгезійна здатність, значно ускладнює технологію закріплення ниток на підкладці.

Для компенсації згаданих недоліків термопластичних матеріалів у антифрикційний КМ включають другий тип волокон з ефективною адгезією до сполучника. Ці волокна скріплюються з PTFE чисто механічно: переплетенням у тканинах та стрічках, в'язанням у трикотажі, валянням у матах. Таким чином, антифрикційний КМ є гібридним, так як включає волокна з двох або більше типів полімерів різної хімічної будови.

В роботі [68] аналізуються використання армуючих волокон з бавовни, полівінілспиртових, поліефірних, поліамідних та інших полімерів або тонкий дріт із нержавіючої сталі чи міді. Використання ниток з бавовни та поліаміду представлені в роботах [61, 69]. Такі матеріали використовують частіше в космічній техніці, де потрібен матеріал з умовами роботи при великих діапазонах температур. Матеріали досить широко використовують для створення антифрикційних матеріалів підшипників типу ШЛТ, де парою тертя є сталь-органоволокніт.

Фторопластові та поліамідні нитки переробляються у спеціальні технічні тканини, стрічки, трикотаж та мати. Останні найбільш дешеві, але найменш зносостійкі. Найбільш зносостійкими є тканини. При їх застосуванні розташування

окремих фторопластових волокон збігається з напрямком вектору швидкості ковзання, що сприятливо впливає на зносостійкість підшипника. В якості армуючої компоненти КМ для плетіння покриттів використовуються технічні тканини саржевого (рис. 1.15) та атласного плетіння (рис. 1.16) [70].

Саржа - це масив тканин будь-якого складу і призначення, об'єднаних оригінальним способом плетіння. Ефект досягається завдяки особливій схемою саржевого плетіння, при якій відбувається зміщення системи перетину волокон на 1, 2, 3 і більше ниток. Саржа є одношаровою тканиною з одинарним перекриттям ниток. Армуючі зносостійкі волокна вводяться в тканину шляхом скручування із міцними нитками. При співвідношенні поліфен: арімід = 1:2 і рівної товщині ниток на робочу поверхню покриття виводиться до 70 % PTFE [68, 70].

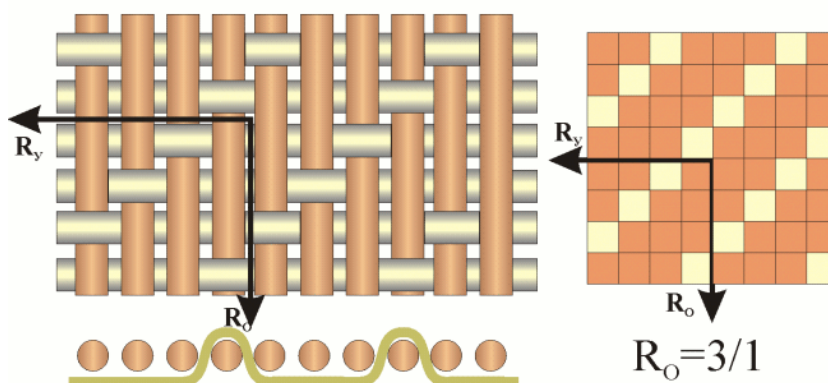


Рис. 1.15. Приклад саржевого плетіння армуючих та зносостійких волокон при створенні полімерних композиційних матеріалів.

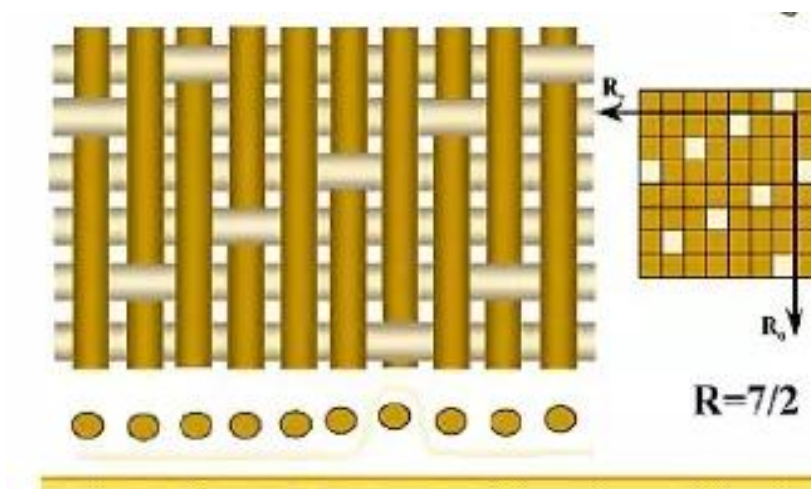


Рис. 1.16. Приклад атласного плетіння армуючих та зносостійких волокон при створенні полімерних композиційних матеріалів.

Тканина атласного плетіння виконується півторашарового типу. Основа з PTFE ниток, другий шар тканини із PA ниток. При цьому на робочу поверхню покриття виводиться до 100 % PTFE, а на виворот до 85-90 % міцних волокон з гарною адгезією до матричного сполучного [70].

В роботі [71] представлено аналіз матричних матеріалів в якості сполучника при виготовлення КМ. Може бути використаний цілий ряд полімерних смол: епоксидні, фенольні, поліефірні, поліімідні та ін. Ці смоли мають термостійкість до 300°C і при використанні забезпечують практично рівну термостійкість усіх елементів КМ (кристаліти поліфену плавляться при 327°C, арімід Т термостабільний до 350 °C). Матричне сполучне поєднує всі компоненти КМ в єдине ціле і одночасно приклеює покриття до робочої поверхні підшипника [72].

Проаналізувавши роботи [73-75], можна зробити висновок, що для відновлення зношених або пошкоджених поверхонь тертя підшипників ковзання знаходиться застосування полімерний КМ ДК6 – епоксидний КМ підвищеної твердості (РТ). Автори робіт [63, 65, 74, 75] показують, що зносостійкість КМ ДК6 та ДК6+30Бронза при навантаженні в 1 МПа майже однакова, а при збільшенні до 3 МПа додаткові матеріали, що зміцнюють структуру, збільшують зносостійкість матеріалу ДК6+30Бронза в 1,35 разів.

Великий вклад в дослідження триботехнічних властивостей металополімерних антифрикційних матеріалів було зроблено такими вченими як Мнацаканов Р.Г., Чернець М.В., Корнієнко А.О. В роботі [75] авторами було проаналізовано трибологічну поведінку полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання різних КМ (РА, PTFE, POM, PEEK, ДК6 та ін.) та домішок (скловолокно (GF), MoS₂, TiC, Bronze, C) до них. Дослідження були проведені згідно стандарті ISO 7148-2 [76] та використано схему торцевого тертя пальцевих полімерних зразків з контрдиском зі сталі 45. Забезпечувались постійні умови навантаження та швидкості ковзання. Автори визначили для поліефірефіркетонів приблизно дворазове зниження коефіцієнту тертя (f) при зростанні контактних тисків. А для терефталанів таке зниження

складає 1,75 – 1,85 рази. Якісна зміна f для обох видів КМ є приблизно однаковою. Проте у випадку РЕТ, РЕТ+PTFE f є суттєво нижчими (у 1,35... 1,55 рази), ніж у випадку РЕЕК, РЕЕК+30GF. Найбільші коефіцієнти тертя виникають у парі з РЕЕК+30GF, а найнижчі - у парах з РЕТ [75].

В роботі [74] автори встановили, що у КМ одного класу POM+20PTFE, POM+35PTFE, POM+60Bronze зносостійкість зростає практично на однакову величину, у порівнянні з POM-H, тобто у 1,77 рази. Щодо інших дво- і трискладникових КМ, то вони мають ще вищу зносостійкість у 2,8, 3,81, 5,58 рази, окрім КМ POM+10PTFE+20Bronze (1,43 рази). Тут скловолокно, як наповнювач, підвищує зносостійкість КМ POM+10PTFE+10GF, POM+10PTFE+5Bronze+5GF, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+20Bronze+10GF. У КМ POM+10PTFE+20Bronze та POM+20PTFE+30Bronze різниця у зносостійкості, у порівнянні з POM-H, є досить різною, тобто у 1,77 і 2,8 разів. Тобто збільшення вмісту порошку бронзи та політетрафторетилену у базовому полімері (POM-H) спричинює збільшення зносостійкості. Відносне підвищення зносостійкості між обома вказаними КМ складає 2,8:1,43, тобто 1,96 рази.

Також в роботах [65] автори встановили, що зносостійкість КМ на основі PTFE при зміні питомих сил тертя є суттєво відмінною. У випадку, коли одним із наповнювачів є кокс (PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF) діаграми (суцільна лінія) мають принципово відмінний вид, ніж діаграми трьох інших КМ (PTFE+15GF, PTFE+10C+15TiC, PTFE+15CF), де одним із наповнювачів є скло- чи вуглеволокна. Відповідно, КМ PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF мають суттєво нижчу зносостійкість при дотичному зусиллі $\tau = 0,4...0,8$ МПа, наближену при $\tau = 1...1,4$ МПа та вищу від КМ PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF при подальшому її зростанні. Якісні закономірності зміни зносостійкості КМ PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF є практично однаковими. Кількісна різниця у зносостійкості при $\tau = 2$ МПа PTFE+15CF відносно PTFE+15GF складає 1,3 рази, а PTFE+10CF+15TiC – 1,4 рази. Натомість при цій величині τ зносостійкість КМ PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF перевищує зносостійкість КМ PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF у 4,6 рази.

Після цілого комплексу досліджень авторами [63, 65, 73-78] визначено, що найбільш зносостійкий матеріал є політетрафторетилен PTFE із наповнювачами (MoS_2 , C, CF, GF, TiC) з різним процентним вмістом. На якісну зміну зносостійкості КМ на основі PTFE суттєво впливають питомі сили тертя. За цією ознакою вони поділяються на дві групи – з більшим зниженням зносостійкості зі збільшенням питомих сил тертя (PTFE+15GF, PTFE+10C+15TiC, PTFE+15CF) та з меншим зниженням (PTFE+15C+5 MoS_2 , PTFE+10C+10CF). Коефіцієнт сухого тертя ковзання нелінійно залежить від контактного тиску у експериментальних трибопарах. Відповідно представлено якісні і кількісні закономірності цих залежностей для кожного з досліджених полімерів. Найнижчим був коефіцієнт тертя у парах PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF – сталь 45, а вищим - у парі PTFE+10C+10CF – сталь 45 [65].

Проаналізувавши роботи [5-7, 63, 65, 73-78], можна зробити висновок, що було досліджено велика кількість антифрикційних металополімерних та полімерних КМ згідно стандарту ISO 7148-2, що включає однонаправлений рух полімерів по металевій пластині. Однак, існує багато вузлів, де застосовуються реверсивні рухи, і необхідно провести додаткові досліді при терті ковзання в умовах знакозмінного руху. Досліді дозволять обрати зносостійкі та антифрикційні матеріали та рекомендувати металополімерні та полімерні КМ для використання ШП в авіаційній галузі.

Сімейство пластиків серії Zedex — композиційні полімерні матеріали на основі PET (поліетилентерефталат), PEEK (поліефірефіркетон), PEI (поліефірімід), завдяки низькому коефіцієнту тертя в умовах без змащувального матеріалу, зносостійкості і високим антикорозійними властивостями застосовуються для виготовлення втулок, напрямних, підшипників ковзання, шестерень. Пластикові підшипники із Zedex можуть працювати без мастила при важких умовах експлуатації: у втулках ходового механізму роторних екскаваторів, ходові гайки автопідіймачів, вкладиші розподільчого валу двигунів внутрішнього згорання.

Полімерні та пластикові втулки, осі, деталі механізмів, пластикові болти і гайки з інженерних пластиків Zedex (Німеччина) застосовуються в промисловості,

в поліграфічному обладнанні і витісняють такі традиційні матеріали, як сталь, чавун, бронзу. Вони відносяться до полімерів та пластиків з поліпшеними характеристиками, що значно розширює сферу застосування синтетичних матеріалів: базовий тип Zedex ZX-324 працює в діапазоні від -50 до $+250^{\circ}\text{C}$, ходові гайки з пластику Zedex ZX-100K встановлюють на 5-тонні автопідіймачі.

Базові типи ZX-100K, ZX-324, ZX-410, ZX-530, ZX-550, ZX-750 і їх модифікації замінюють традиційні втулкові матеріали: бронзи, графіт, бабіт, фторопласт - це особливо важливо при роботі в хімічно агресивних і забруднених середовищах та впливі корозії. Заміна підвищує час роботи деталей та частин машин і механізмів.

Продукція налічує понад 20 марок термопластичних полімерів серії Zedex : ZX-100, ZX-324, ZX-410, ZX-530, ZX-750 і їх модифікації. Кожен з матеріалів має свою область застосування та умови використання (рис. 1.17).

ZX-100 на основі поліетилентерефталату (PET), температурний режим: від -100°C до $+110^{\circ}\text{C}$, допускається короткочасна робота до $+140^{\circ}\text{C}$.

ZX-324 розроблено на основі поліефірефіркетону (PEEK), має високу температуру тривалої експлуатації (від -50 до $+250^{\circ}\text{C}$), найстійкіший з термопластів до дії водяної пари.

ZX-410 на основі поліефіріміда (PEI), пожежнобезпечовий до 180°C , висока жорсткість і стабільність розмірів.

ZX-530 характеризується високою хімічною стійкістю до органічних розчинників та особливими антифрикційними властивостями, терmostійкий до $+240^{\circ}\text{C}$.

ZX-550 розроблено для пластикових напрямних.

ZX-750 ударостійкий пластик з найвищою робочою температурою, міцний і жорсткий.

Серед розроблених пластиків торгової марки Zedex, найбільш цікавими для застосування в авіаційній галузі є матеріали серії ZX-100 та ZX-324. Полімери серії ZX-100 більш м'які і використовуються при невеликих навантаженнях, а полімер ZX-324 більш жорсткий та використовується при заміні підшипника кочення на

ковзання. Механічні, термопластичні, зносостійкі та інші параметри цих матеріалів вказують на аналог використання цих матеріалів замість металополімерних КМ, які зараз найбільш розповсюджені в ШП ковзання в ПС.



Рис. 1.17. Базові властивості та характеристика антифрикційних полімерних композиційних матеріалів Zedex.

Матеріал FLUROGLIDE. Відповідно до DIN ISO 12240-1, радіальні сферичні підшипники ковзання є стандартизованими, готовими до встановлення деталями для машин та механізмів. Компанія FLURO-Gelenklager GmbH (Німеччина) виготовляє сферичні підшипники ковзання та шарнірні головки для машинобудівної промисловості. Для того, щоб задовольнити зростаючі потреби споживачів у продукції для складних та небезпечних умов роботи при динамічних навантаженнях пропонується матеріал FLUROGLIDE.

Матеріал FLUROGLIDE застосовується в ШП GE..EW-2RS, GE..GW-2RS, GE..CW(-2RS), GE..SWE, GE..AWE, а також в циліндричних втулках ковзання

GB..x..x..ZW. Особливістю конструкції цих підшипників є те, що відбувається тертя антифрикційного матеріалу по шліфованому, термообробленому та полірованому покриттю твердого хрому.

Шарнірні підшипники цієї марки використовують в своїй техніці сучасні компанії по виробництву автомобілів, тракторів, кар'єрної техніки та ін. Однак, для використання цих матеріалів в авіаційної галузі та отримання відповідних допусків необхідні додаткові випробування.

Матеріали IGLIDUR. Полімерні підшипники ковзання IGUS є технічно та економічно вигідною альтернативою металевим підшипникам ковзання. Компанія IGUS – виробник високоефективних полімерів для руху, розташований у Кельні (Німеччина). Розробляють та виробляють пластики руху - інноваційні вироби, що не містять мастила.

Пластикові підшипники IGLIDUR виготовляються із сучасних полімерних КМ, що складаються з базового полімеру, твердих частинок та твердих мастильних матеріалів. Вони забезпечують зниження коефіцієнта тертя підшипників ковзання. При однорідній структурі зоною зношування є вся товщина підшипника. Матеріал IGLIDUR поділяється на наступні базові матеріали: G, A350, M250, P210, J, TX1, X, P, J260, J350, J3, L250, R, D, Z.

Однорідна структура з твердими мастильними та армуючими матеріалами забезпечує зону тертя змащувальними та антифрикційними компонентами на постійній основі, незалежно від виду переміщення. Дуже низькі коефіцієнти тертя та знос протягом усього терміну служби продукту. Велика несуча поверхня і певний ступінь еластичності пластикових підшипників ковзання забезпечують також стійкість при високих ударних і кромкових навантаженнях. Додаткове покращення механічних властивостей забезпечується армуючими волокнами.

Матеріал IGLIDUR ефективно використовується в машинобудівній промисловості, однак в літературі не знайдено інформації щодо використання цього матеріалу для застосування в ШП ковзання як аналог металополімерним підшипникам згідно [47] та DIN ISO 12240-1.

1.4. Технологічні аспекти нанесення металевих, металополімерних та полімерних композиційних матеріалів.

Металополімерні та полімерні КМ являють собою спрямовано сформовані поверхневі шари, що істотно відрізняються за своїми властивостями від властивостей матеріалу основи. Також габаритні розміри деталі збільшуються на товщину шару покриття, що дозволяє використовувати методи нанесення покриттів не тільки при виготовленні нових, але і при відновлення зношених деталей та конструкцій [79]. Матеріали покриття, складені з різних компонентів, утворюють окремий вид антифрикційних КМ. Причому властивості КМ як кількісно, так і якісно відрізняються від властивостей складових.

За способом або технологією формування покриття на основі металевих антифрикційних матеріалів поділяються на такі види [80]: PVD – покриття (фізичне осадження); CVD – покриття (хімічне осадження); покриття, отримані електрохімічним осадженням; газотермічні покриття; покриття отримані плакуванням та припіканням; фрикційно – механічна обробка; комбінована обробка.

Найбільш економічним і простим у реалізації методом нанесення антифрикційних матеріалів є **газополум'яне напилення**, що дозволяє формувати і оплавляти шар в одній технологічній операції. Обладнання для газополум'яного напилення має малу вагу та габарити, не потребує джерел електроживлення, може експлуатуватися у нестаціонарних умовах.

Газополум'яним напиленням можливо формувати і покриття на полімерній основі. В роботі [81] автор аналізує та модернізує спосіб напилення покриттів. Пропонується використовувати як спеціальні марки полімерних порошків, що мають строго регламентований хімічний та гранулометричний склад, так і отримані кріогенним подрібненням полімерних гранул. Однак, газополум'яні технології, що використовують полімерний порошок для нанесення покриттів, мають наступні недоліки: при зберіганні та транспортуванні порошки насичуються вологою, злежуються, утворюють конгломерати; при сушінні в сушильних шафах порошки

легкоплавких поліефірів (наприклад, вторинного поліетилентерефталату) спікаються; неможливо забезпечити рівномірний розподіл у покритті неорганічних наповнювачів (особливо нанорозмірних), що вводяться в шихту, що напилюється. Автор зазначає, що вище названих недоліків позбавлені шнури, дротяні або пруткові матеріали. На сьогоднішній день випускаються полімерні шнури у вигляді екструдатів, наприклад, з поліамідом. Пропонується технічні засоби для нанесення полімерних покриттів газополум'яним розпиленням шнурів і екструдатів.

Технологія виготовлення антифрикційних матеріалів, залежить від конструкції вузла тертя, від складу і типу сполучника і масштабів виробництва. Технологічні процеси можна розділити на три групи:

- пряме пресування в прес-формах [82] або безпосередньо між робочою деталлю і контртілом;
- намотування нитками, стрічками або шнурами [83];
- виготовлення листового матеріалу з покриттям на спеціальних технологічних лініях [84].

Найбільш економічним та універсальним є останній спосіб. Він згадується у патентній літературі, а реалізований лише для масового виробництва **металополімерної стрічки** з антифрикційними КМ (рис. 1.18).

Багатошаровий КМ, який використовується для виробництва підшипників ковзання, складається із прироблювальної поверхні з політетрафторетилену (PTFE+MoS₂) завтовшки 0,01 - 0,5 мм, шару олов'янистої бронзи завтовшки 0,20 - 0,5 мм, сталеві основи з низьким вмістом вуглецю завтовшки 0,25 - 2,0 мм.

В роботі [84] було досліджено оптимальний вміст твердих домішок до матеріалу PTFE. Автори аналізували вплив коксу, скловолокну, графіту, дисульфиду молібдену, бронзи, вуглецевих волокон та полімерних наповнювачів. Було визначено, що фізична модифікація існуючих полімерів, їх комбінація з компонентами іншої природи, забезпечує формування структури, суть якої - це придати матеріалу PTFE особливий комплекс властивостей, що залежить від наповнювача та здешевити його – один із найперспективніших шляхів вирішення проблем полімерного триботехнічного матеріалознавства.

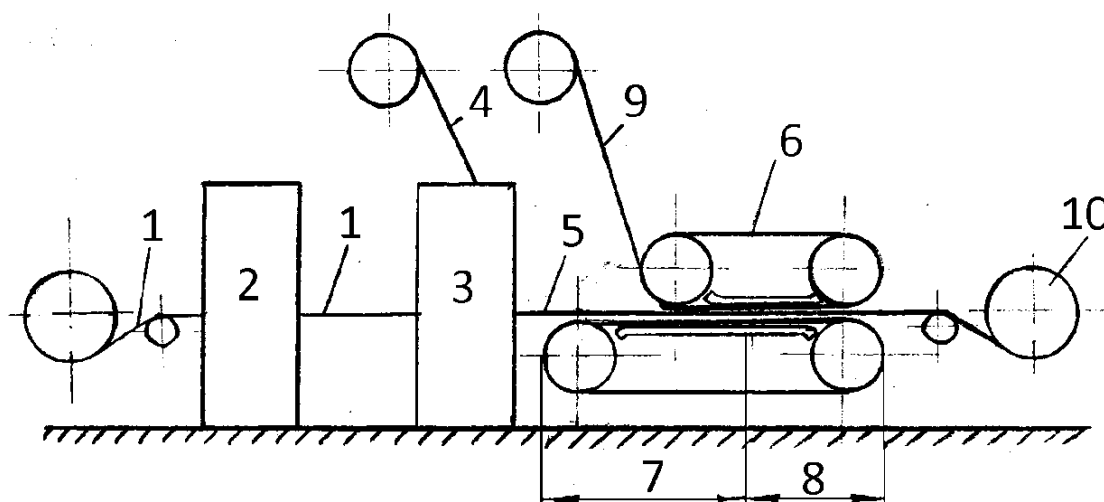


Рис. 1.18. Схема технології виробництва сталеві стрічки з полімерним антифрикційним покриттям: 1 - сталеві стрічка, 2 - камера підготовки поверхні, 3 - дозатор адгезиву (бронзовий порошок), 4 - механізм подачі суміші із PTFE та твердим мастильним матеріалом або тканини із цією сумішшю, 5 - стрічка з антифрикційним покриттям, 6 - пристрій для затвердіння (запікання) покриття, 7 - зона нагріву, 8 - зона охолодження, 9 - механізм подачі консерваційної стрічки, 10 - барабан намотування готового матеріалу [85].

Металополімерний матеріал на металевій основі поєднує у собі такі властивості як, механічну міцність сталі та низький коефіцієнт тертя тефлонової основи. Проміжний шар спеченої бронзи забезпечує надійне зчеплення між шарами, покращує відведення тепла, що виробляється в процесі експлуатації. З цих матеріалів виготовляються циліндричні та фланцеві підшипники, опорні кільця, стрічка та спеціальні вироби зі специфікації замовника. Переваги таких виробів наступні: експлуатація за високого навантаження; автономне мастило під час «сухої» експлуатації; низький коефіцієнт статичного та динамічного тертя (немає ефекту тертя зі стрибками); мінімальний знос і велика тривалість терміну експлуатації; висока опірність хімічному впливу та сумісність із рідинними середовищами; широкий діапазон робочих температур; ефективні теплопровідність та електропровідність; мінімальні габарити; простота встановлення та ін. На рис. 1.19 представлено антифрикційна МПС та вироби із неї, які масово застосовуються в машинобудуванні.



Рис. 1.19. Металополімерна антифрикційна стрічка та вироби із неї.

Пресування, лиття під тиском або екструзія. Така технологія виробництва підшипників складається з декілька етапів. Перший етап починається з добірки базового матеріалу - основи. Це може бути будь-який полімерний матеріал в залежності від експлуатаційних умов роботи. Надалі основу поєднують з волоконно-армованим матеріалом для додаткової міцності. Потім все це змішують з твердими мастилами до однорідної маси. Далі ці речовини впресовуються в мініатюрні камери фібро-армованого матеріалу. Завдяки такому поєднанню створюється триботехнічний матеріал для підшипників з низьким коефіцієнтом тертя (рис. 1.20).

Існує багато праць [82, 86, 87 та ін.] щодо цих базових методів виробництва підшипників, але вони всі направлені на модифікації пластичних мас та знаходження оптимального складу КМ для певних умов навантажень (швидкість ковзання, навантаження, напрям руху, частота та ін.)

Одна з технологій виготовлення підшипників кочення - це технологія намотки армуючого та антифрикційного волокна з наступним просоченням його епоксидною матрицею або вдавлюванням в ці волокна полімерного матеріалу із суміші PTFE плюс твердий мастильний матеріал.

Недоліками **технології намотки** є відсутність поперечної зв'язки між волокнами. Слабкий поперечний зв'язок впливає на товщину покриття, збільшуючи його, що у своє чергу різко знижує теплопровідність полімерної складової КМ.

Така технологія здійснюється за допомогою складання та термосилового навантаження зусиллям затвердіння та температурою технологічного пакета (препрег, антиадгезив, поверхня деталі вузла тертя, пристрій для силового замикання). У відкритому технологічному пакеті навантаження затвердіння створюється зовнішньою силою, у замкнутому – за рахунок пружних деформацій підшипникової втулки.



Рис. 1.20. Приклади полімерних підшипників ковзання виготовлених пресуванням, литтям під тиском та екструзією.

Контроль виготовленого антифрикційного матеріалу переважно зводиться до перевірки якості приклеювання КМ до поверхні. Для нанесення описаних покриттів використовується пряме пресування [82], як правило, у самому вузлі тертя або під час опресування деталей з покриттям.

В роботі [88] пропонується використовувати для нанесення антифрикційного матеріалу спеціальний формуючий, що відіграє пуансона при вдавлюванні матеріалу. Якщо матриця отримана на основі епоксидних смол, виготовлення препрегу неможливе через малу життєздатність епоксидного компаунду. Крім того, необхідно враховувати її плинність до певної стадії затвердіння і вимоги щодо низького тиску для забезпечення розмірної точності.

Загальна послідовність нанесення таких матеріалів складається з наступних технологічних етапів: підготовка деталей трибосистеми, що включає механічну

шліфовку металевих елементів субстрату та викрійку каркасу (тканини, трикотажу, повсті) покриття; знежирення робочої поверхні деталі (протирання) та каркаса покриття (занурення та віджимання); просочування епоксидним компаундом каркасу покриття та нанесення тонкого шару сполучника на поверхню субстрату; складання технологічного пакету (субстрат, сполучник, армуючий каркас, плівка антиадгезив) та забезпечення силового замикання; витримка технологічного пакету під навантаженням до повного затвердіння сполучника.

В роботі [89] зазначається, що для забезпечення необхідного ресурсу антифрикційних матеріалів виконується розробка конкретної технології нанесення на деталь трибосистеми при використанні холодного затвердіння і експериментального відпрацювання технології.

3D-друк підшипників (інжекційне плетення) - це унікальна можливість створювати якісні елементи для машин та механізмів із мінімальними витратами часу та засобів. Багато компаній використовують сучасну техніку та якісну сировину для відтворення на спеціальних 3D-принтерах різних вузлів, компонентів, запасних частин (рис. 1.21).



Рис. 1.21. Підшипники ковзання, виготовлені за допомогою 3D-друку.

Як зазначає компанія IGUS, щодо матеріалу IGLIDUR, зносостійкість підшипників ковзання, виготовлених за допомогою друку, майже однакова, в порівнянні з технологією лиття під тиском. Зазначається, що технологія друку підшипників ковзання є більш універсальною, ніж при інших технологічних

методах виробництва. Унікальною особливістю цієї технології є те, що можливо отримувати любую пористість полімерного матеріалу. Це актуально для умов роботи підшипників ковзання в мастильних середовищах та інших умов, де присутня рідина. У випробуванні на зношування шарніра трибологічні властивості підшипників ковзання, виготовлених з полімеру на 3D-друку, показали, що опір стиранню підшипників в 2-3 рази вище при умові роботи вузла тертя в діапазоні незначних навантажень, в порівнянні з підшипниками виготовлених за допомогою технологій лиття під тиском.

Таким чином, проаналізувавши літературні джерела та дослідження інших авторів можна сформулювати мету та 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. Розробка методики досліджень полімерних композиційних антифрикційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в умовах, наближених до реальних.

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

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

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

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

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

Висновки до розділу 1

1. Аналіз використання та пошкодження шарнірних підшипників показав, що існує тенденція впровадження в важконавантажені вузли машин, шарнірних підшипників із металополімерними антифрикційними 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.

2. Функціональні можливості антифрикційних покриттів забезпечуються наявністю на робочій поверхні певного композиційного матеріалу із різною структурою. Це може бути металополімерний композиційний матеріал, полімерний матеріал із армуючими нитками та оптимальним вмістом наповнювачів із твердих матеріалів або спеціальні каркасні волокна із полімерних тканин, залиті в матриці із епоксидних матеріалів.

3. Аналіз сучасних антифрикційних матеріалів показав, що останніми роками з'явилося багато модифікацій різноманітних металополімерних матеріалів для підшипників ковзання. На основі аналізу авіаційних шарнірних підшипників ковзання, які були створені згідно ГОСТ 3635-78, а саме підшипники із металополімерними стрічками, встановлено, що необхідно провести порівняльні триботехнічні дослідження нових сучасних антифрикційних полімерних композиційних матеріалів які можливо використовувати в цих підшипниках.

4. Для розширення номенклатури використання необслуговуваних шарнірних підшипників ковзання із полімерними композиційними матеріалами в авіаційній промисловості необхідно проведення додаткових порівняльних досліджень їх триботехнічних властивостей в умовах, наближених до реальних (лабораторних та промислових випробувань). Згідно чинного законодавства, впровадження нових матеріалів або виробів (шарнірних підшипників) на повітряному судні можливо лише за умов отримання сертифікату додаткового типу (supplemental type certificate), який видається при наявності лабораторних та промислових випробувань.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Використання трибосистем з металополімерними та полімерними КМ в самих різних високонавантажених вузлах машин та механізмів дуже добре себе зарекомендувало. Зокрема наявність покриттів з зазначених матеріалів забезпечує високу зносостійкість і працездатність шарнірних з'єднань при високих навантаженнях та важких умовах роботи.

В даному розділі роботи розроблено структурну схему досліджень ШП та формування принципів вибору антифрикційних та зносостійких матеріалів, а також розроблено методики проведення експериментальних триботехнічних досліджень, спрямованих на встановлення можливостей розширення місць використання та ефективного застосування антифрикційних КМ у ШП для авіаційної галузі.

Проведенню випробувань на зносостійкість присвячено багато робіт [25, 76, 90]. Згідно міжнародним стандартам ASTM G99, ISO 7148-2 дослідження зносостійкості полімерних та металополімерних матеріалів відбувається за схемою торцевого тертя, при якому забезпечуються незмінні умови швидкості і навантаження протягом експерименту. Однак, існують роботи [65, 77, 78] де задане початкове навантаження поступово збільшується в процесі випробувань. Це імітує роботу підшипника ковзання, наближеного до реальних умов, де під час роботи площа контакту трибоелементів збільшується при збільшенні часу роботи підшипника.

Однак, ці методики не відповідають реальним умовам роботи ШП в ПС, які працюють в умовах реверсивного руху та вібрацій. Тому для більш коректного дослідження в роботі було проведено наступні дії:

1. Модернізована машина для досліджень процесів фретинг-корозії при випробуваннях ШП в умовах вібрацій.

2. Розроблена методика досліджень матеріалів та покриттів при низькочастотних реверсивних рухах.

3. Розроблена методика для лабораторних ресурсних випробувань авіаційних ШП ковзання в умовах, наближених до реальних.

2.1. Розробка структурної схеми досліджень шарнірних підшипників та формування принципів вибору металополімерних та полімерних композиційних матеріалів в якості покриттів.

Аналіз технічної та патентної літератури [47, 50-52, 54, 91], а також досвіду експлуатації ШП на ПС, дозволяє встановити основні закономірності, що визначають ресурс трибопар. Як правило, знос ШП ковзання у ПС до критичного зазору формується в результаті двох процесів: зношування металополімерних покриттів під дією великих динамічних навантажень (низькочастотні реверсивні рухи) та вібраційного навантаження (фретинг-корозія) від дії газотурбінних двигунів, що передається на ПС.

В ході аналізу пошкоджень ШП [55, 56] визначена структура проведення наукових досліджень металополімерних матеріалів для застосування їх у вузлах ПС. На рисунку 2.1. представлено структурну схему досліджень трибосистем з металополімерними та полімерними КМ для ШП, яка складається із наступних основних напрямків випробувань:

1. Трибологічні дослідження трибосистем під дією низькочастотних реверсивних рухів та вібрації.

2. Вплив температури на триботехнічні характеристики сучасних антифрикційних металополімерних та полімерних КМ.

3. Ресурсні лабораторні випробування дослідних зразків ШП в умовах, наближених до реальних та порівняльний їх аналіз.

4. Промислові випробування ШП в умовах ТОВ авіакомпанії «НЗОПЕРЕЙШІНС» та авіаремонтному підприємстві «AAL GROUP LTD» в місті Шарджа ОАЕ.

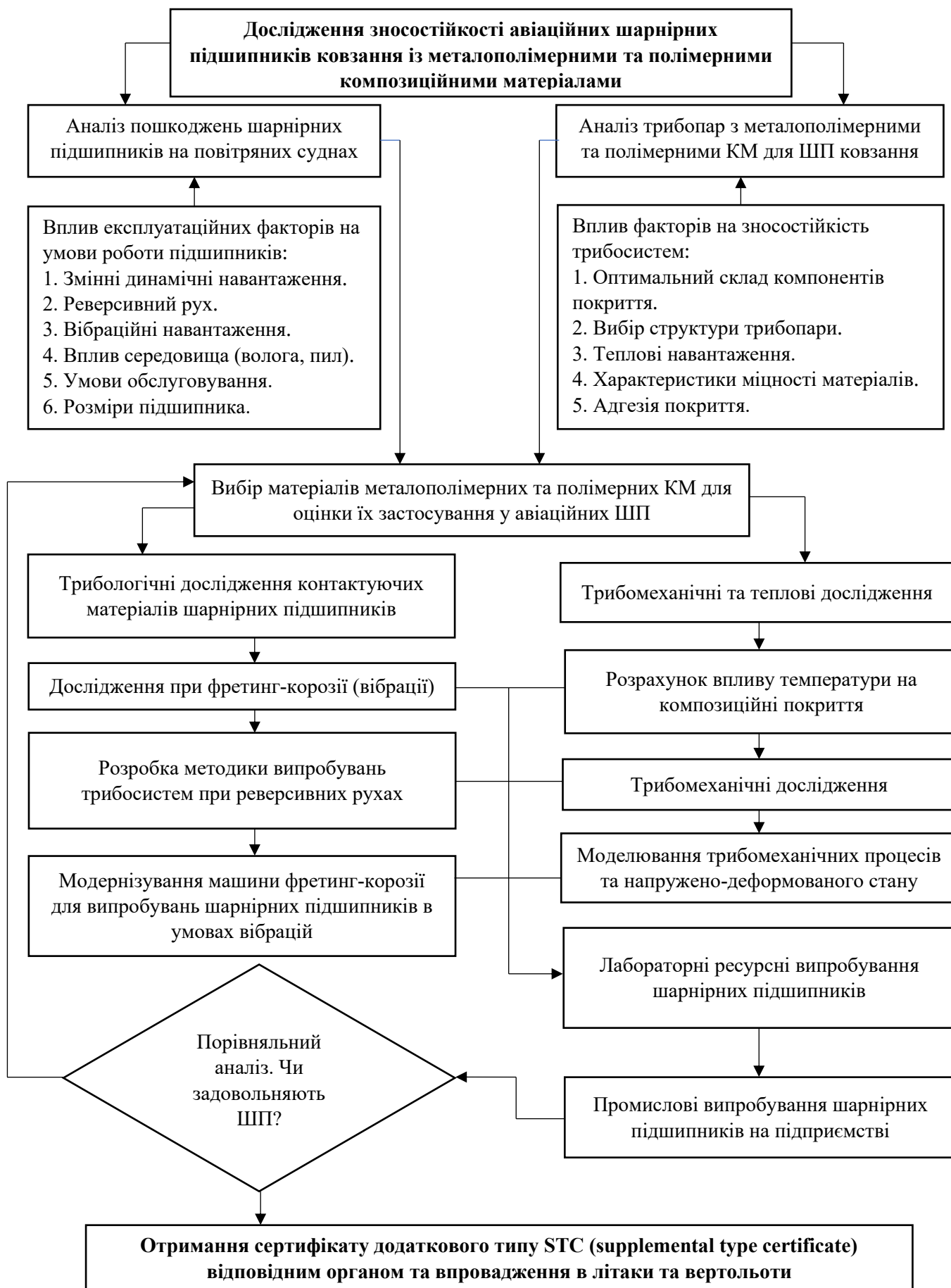


Рис. 2.1. Структурна схема досліджень шарнірних підшипників.

На рис. 2.1 представлено структурну схему досліджень, що дозволяє систематизувати фактори, які впливають на роботу ШП в авіації та визначити механізм проведення досліджень оптимальних трибосполучень для застосування їх у авіаційних ШП ковзання.

Сукупність правил, за якими будувалося схема, володіє емпіричними властивостями: повнотою (у будь-якій ситуації є припис для подальших дій), недвозначністю (всі приписи розуміються єдиним чином), несуперечливістю (відсутні суперечливі один одному або взаємовиключні приписи), результативністю та спрямованістю (алгоритм після кінцевого числа кроків призводить до зупинення операцій та отримання результату).

При виборі трибосистем з металополімерними та полімерними КМ для авіаційних ШП кочення слід керуватися основними загальними положеннями [92 - 94] та принципами.

Першим і основним принципом вибору матеріалу трибопарі є необхідність задоволення вимог, що пред'являються до ШП і забезпечення заданої надійності виробу у всіх режимах його експлуатації. Вибраний матеріал трибопарі повинен забезпечувати успішну роботу деталі конструкції.

Другим важливим принципом вибору матеріалу трибопарі є економічна ефективність. Це широке і не завжди однозначне поняття. Говорячи про економічну ефективність, зазвичай мають на увазі забезпечення мінімуму вартості.

При виборі матеріалу трибопарі також важливо враховувати його дефіцитність, так само як і дефіцитність компонентів, що входять до нього (наявність у країні, поширеність у природі).

Нарешті, під час вибору трибопарі для ШП, слід враховувати необхідність охорони праці та довкілля, згідно останніх вимог ISO 14001:2015, ISO 19011:2018 для авіаційної галузі. Матеріал, його вихідні та побічні продукти не повинні завдавати шкоди здоров'ю людини (токсичність) та шкоди навколишньому середовищу (екологічна безпека).

Виходячи з усього вище сказаного, можна сформулювати вимоги до вибору трибопар з металополімерними та полімерними КМ для ШП ПС:

1. Висока зносостійкість і низький коефіцієнт тертя;
2. Висока міцність зчеплення КМ покриття з основою;
3. Матеріал повинен характеризуватися демпфуючими властивостями (здатність матриці протистояти динамічним навантаженням);
4. Низька вартість матеріалу, не дефіцитність, нешкідливість.

Якщо брати до уваги, що кількість матеріалу трибопари, який використовується для забезпечення нормальної роботи ШП в авіації порівняно мало, то можна вважати такі вимоги до трибопар як вартість, не дефіцитність і нешкідливість - другорядними. Але аналізуючи тенденцію переведення вузлів ПС по ТО за фактичним станом, та збільшення кількості ШП ковзання із металополімерними та полімерними КМ, цими вимогами нехтувати не слід.

Тертя та зношування відбувається при динамічній контактній взаємодії пластичних і твердих тіл та є структурночутливим процесом, трибомеханічні характеристики якого пов'язані з неоднорідністю напружено-деформованого стану поверхневих шарів трибопари, що контактують [95]. Інакше кажучи, стан зносостійкості тісно пов'язаний з реологічними (релаксаційними) властивостями трибосистеми [95]. Релаксація напружень у зонах контакту, обумовлена високим внутрішнім тертям, призводить до більш рівномірного перерозподілу напружень за обсягом і запобігає необоротному накопиченню дефектів, які спричиняють концентрацію напружень [96].

Таким чином, для забезпечення довготривалої роботи трибовузла, металополімерний та полімерний КМ трибопари повинен розсіювати механічну енергію, яка підводиться [97, 98], що сприятиме стабілізації процесу тертя і зношування. Металополімерний матеріал шарнірного підшипника ковзання повинен складатися з основи для піддатливості до змінних реверсивних рухах, температурних деформацій та твердих включень (волокна, твердий змащувальний матеріал, бронза, карбіди металів та ін.) для збільшення зносостійкості.

2.2. Модернізація машини для досліджень процесів фретинг-корозії при випробуваннях шарнірних підшипників в умовах вібрацій.

Для випробувань ШП ковзання із металополімерними та полімерними КМ була вибрана існуюча методика випробувань матеріалів на фретинг-корозію згідно [90]. Вибір обумовлений тим, що більшість ШП працюють в умовах реверсивних рухів, які є основою для реалізації умов фретинг-корозії.

Виконання дослідження в області фретинг-корозії відрізняється великою різноманітністю використаних методик як щодо схеми навантаження і типу контакту, так і в оцінці пошкодження поверхні. Методика вибиралась відповідно до двох основних вимог [99, 100]:

1. Імітація фретинг-корозії (вібрації) в лабораторних умовах повинна максимально наближатися до умов виникнення цього виду поверхневого руйнування в реальних конструкціях.

2. Вибрана методика повинна бути такою, щоб можна було зіставити одержані результати з даними інших робіт.

До випробувальних пристроїв, у зв'язку із специфікою виникнення фретинг-корозії, пред'являються наступні вимоги:

- 1) вільні від люфтів кріплення зразків в затискних пристроях;
- 2) жорсткість до кручення і мала деформованість пристрою;
- 3) наявність вібропроковзуючого руху регульованої частоти та амплітуди;
- 4) наявність контрольованої нормальної сили для створення необхідного тиску в контакті;
- 5) можливість підведення мастильного матеріалу або іншого середовища.

Різні типи контакту мають свої переваги і недоліки. До недоліків контакту площа-площина можна віднести неоднакові умови зношування робочих ділянок зразків, оскільки їх амплітуда переміщень при такій схемі прямо пропорційна відстані від осі обертання. Цей недолік усувається вибором оптимальної геометрії одного із зразків. При інших видах контакту відбувається нерівномірний розподіл тиску в зоні контакту, що приводить до різних умов зношування.

Вибір плоского кільцевого контакту і поворотно-обертального руху поверхонь контакту обумовлений необхідністю контролю нормального навантаження і усунення крайового ефекту [96, 101].

В основу прийнятої методики проведення роботи встановлено комплексне дослідження якісних параметрів тертя трибопар. Схема контакту площина-площина використана на установці МФК - 1, загальний вид якої представлено на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд машини МФК-1 для випробувань на фретинг-корозію.

Основними перевагами методу є:

- 1) можливість швидкої оцінки зносостійкості матеріалів і покриттів в умовах фретинг-корозії;
- 2) задовільна відтворюваність результатів випробувань при мінімальній кількості випробувальних зразків;
- 3) простота методу і відповідного устаткування;
- 4) можливість безступінчатого регулювання частоти, нормального навантаження і амплітуди мікропереміщень;
- 5) проведення випробувань із застосуванням пластичних і рідких змащувальних матеріалів;
- 6) реєстрація сили тертя в процесі випробувань.

Суть методу полягає в тому, що рухомий циліндричний зразок (контрзразок), дотичний торцем з нерухомим циліндричним зразком при заданому тиску приводиться в поворотно-обертальний рух із заданими амплітудою і частотою. Вимірюється знос нерухомого зразка за задану кількість циклів, по значенню якого визначається зносостійкість досліджуваного матеріалу.

Схема установки приведена на рис. 2.3. Установка працює таким чином: електродвигун 2 передає обертальний рух ексцентрику 3 з регульованим ексцентриситетом. Частота обертання і кількість обертів реєструється приладом 1. Ексцентрик 3 через шатун 4, пов'язаний з кулісою 6 валу 7 приводу поворотно-обертального руху контрзразка 8. Амплітуда переміщення контрзразка 8 регулюється ексцентриком 3 і пристроєм 5. Нерухомий зразок 9 закріплюється в цанги 10, що центрується, встановленої на валу рухомої бабки 11. Навантаження зразків здійснюється динамометром 14 і навантажувальним пристроєм 15. Величина осьового навантаження на зразки реєструється за допомогою динамометра ЗІП 02-79 типа ДОСМ-3-0,2 з діапазоном вимірювань від 0,2 до 2 кН. Реєстрація сили тертя проводиться приладом 13 через підсилювач 12 за допомогою тензобалки 11. Кількість циклів випробувань контролювали по лічильнику, встановленому на передній панелі установки.

Амплітуда коливань регулюється зміною ексцентриситету ексцентрика (грубо) і зміною довжини плеча горизонтального шатуна (точно). Грубе регулювання амплітуди дозволяє змінювати її величину від 10 до 1000 мкм, точна – від 5 до 15 мкм. Амплітуда відносного переміщення визначається як різниця амплітуд коливання рухомого і нерухомого зразків. Вимірювання амплітуди проводиться безпосередньо на зразках за допомогою оптичного біноккулярного мікроскопа МБС-2 (при збільшенні від 8 до 56 крат), використовуючи стробоскопічний ефект.

Машина для дослідження процесів фретинг-корозії дозволяє проводити випробування при наступних параметрах [90, 101]:

- навантаження зразків в осьовому напрямку силами 200 – 5500 Н;

– поворотно-обертальний рух контрзразка, щодо нерухомого зразка з частотою 3 – 30 Гц і амплітудою 10 – 500 мкм для стандартного зразка;

– вимірювальна система установки забезпечує в процесі випробувань безперервну реєстрацію кількості циклів поворотно-обертального руху контрзразка з похибкою не більше 50 циклів.

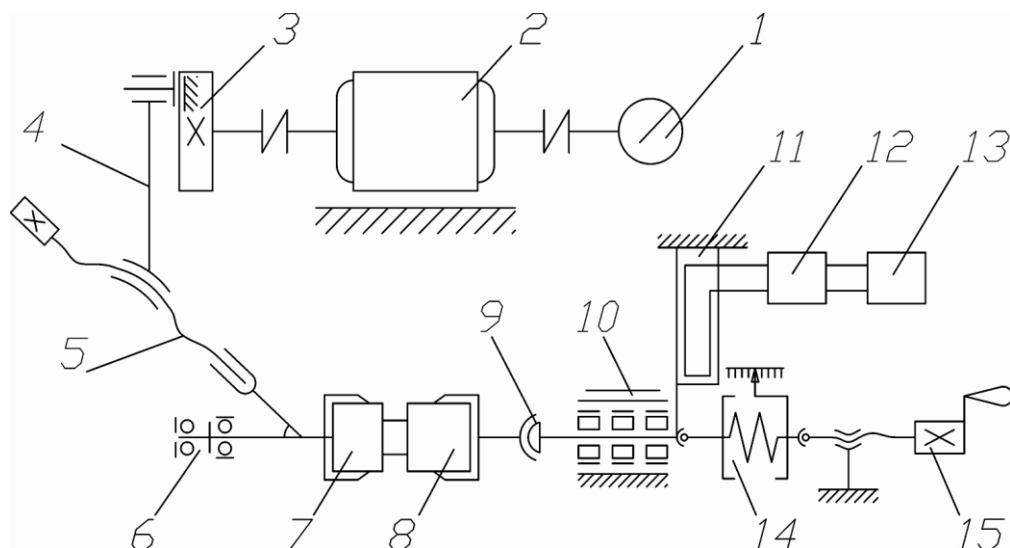


Рис. 2.3. Схема машини для дослідження процесів фретинг-корозії: 1 – лічильник обертів; 2 – електродвигун; 3 – ексцентрик; 4 – вертикальний шатун; 5 – налаштувальний пристрій; 6 – горизонтальний шатун; 7 – рухомий зразок; 8 – нерухомий зразок; 9 – самоорієнтуюча цанга; 10 – рухома бабка; 11 – тензобалка; 12 – підсилювач; 13 – реєструюча апаратура; 14 – динамометр; 15 – навантажувальний пристрій.

Аналіз умов роботи ШП ПС [55, 56] показує, що більшість часу трибопари працюють в дещо відмінних умовах за звичайну фретинг-корозію. Це збільшені відносна амплітуда переміщення зразків та зменшені швидкість ковзання та частота коливань.

Отже, модернізація установки МФК-1 включає:

1. Зміна ексцентрика установки для збільшення достатньої амплітуди $\pm 15^\circ$, що відповідає реальним умовам роботи ШП діаметрів 6, 8, 10 та 12 мм.
2. Зміна пристрою, що навантажує ШП до 550 кг в радіальному напрямі.
3. Виготовлення спеціальних зажимів для утримання ШП при ресурсних випробуваннях.

4. Зниження частоти а відповідно і швидкості ковзання підшипників до 1 – 3 качаній за секунду, що реалізована за рахунок установки додаткового редуктору та збільшення потоку охолодження електричного двигуна машини для дослідження процесів фретинг-корозії.

Спеціальні утримувачі представлено на рисунках 2.4 та 2.5. Утримувачі дозволяють проводити випробування реальних ШП до 12 мм.

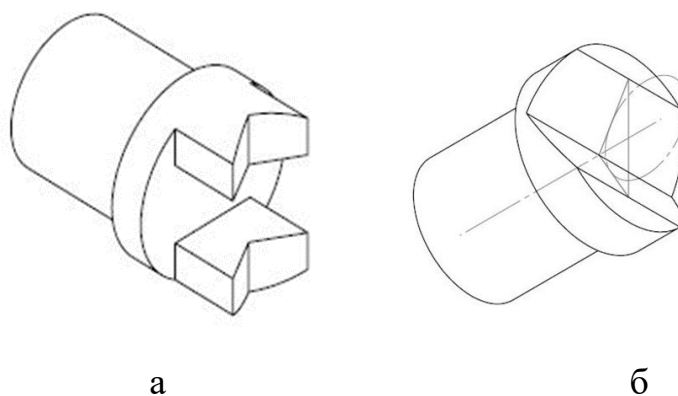


Рис. 2.4. Схеми тримачів внутрішньої (а) та зовнішньої (б) обойм шарнірних підшипників.

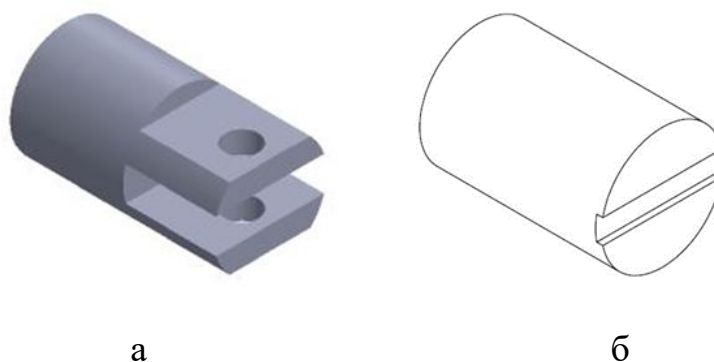


Рис. 2.5. Схеми тримачів внутрішньої (а) та зовнішньої (б) обойм шарнірних підшипників.

Тримачі дозволяють надійно утримувати ШП в процесі ресурсних випробувань та швидко проводити їх заміну (рис. 2.6). Випробування згідно [90] також дозволяє проводити дослідження в різних газових середовищах та температурах. Випробування металополімерних та полімерних КМ, що застосовуються для виробництва підшипників ковзання, можна також проводити при відповідних температурах, наближених до експлуатаційних, оскільки цей параметр є основним дієвим фактором, що впливає на ресурс.

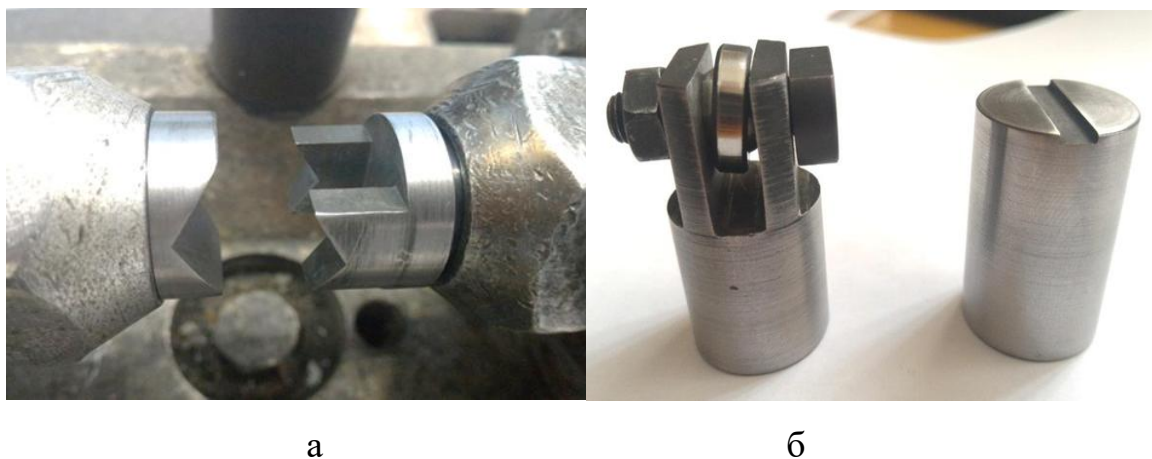


Рис. 2.6. Фото тримачів на установці (а) та їх зовнішній вигляд (б) для проведення випробувань шарнірних підшипників до 12 мм на модернізованій машині для дослідження процесів фретинг-корозії.

Відповідно до умов роботи ШП на ПС температура їх роботи знаходиться в межах $\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо розглядати умови роботи гелікоптерів, що працюють на африканському континенті, то діапазон температур становить від 0 до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отже, оцінка температури при випробуванні металополімерних та полімерних КМ є важливим етапом, оскільки даний параметр впливає на зносостійкість матеріалів. Підігрів матеріалів для випробувань до температури $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувався за допомогою звичайного фену, який впродовж декількох хвилин прогрівав зразки перед стартом та працював протягом всього випробування. Можлива і реалізація випробувань при від'ємних температурах (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) за допомогою рідкого азоту. Але в роботі передбачена задача дослідити матеріали ШП ковзання саме для умов африканського регіону.

Схема випробувань матеріалів в різних газових середовищах представлена на рис. 2.7. Зразки вміщуються в камері 2, через яку пропускається газ. Надмірний тиск газу в камері контролюється водяним манометром 1. При проведенні експериментів газову камеру необхідно очистити від повітря продуванням випробовуваним газом, рівним 15-20 об'ємам камери, що забезпечує її повне очищення.

Методика згідно [90] дозволяє проводити вимірювання також і коефіцієнту тертя. Так, при модернізації машини для дослідження процесів фретинг-корозії

зберігається і можливість контролювати крутний момент. Оцінка кінетики зміни тертя дозволяє проконтролювати перехідні процеси зношування. Наприклад, для металополімерних композиційних покриттів можливо визначити період роботи кожного наступного шару.

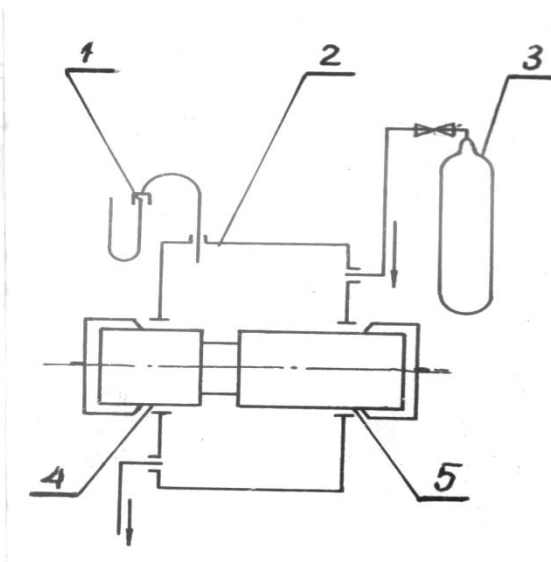


Рис. 2.7. Камера для випробувань матеріалів та покриттів в різних газових середовищах [90, 101]: 1 – манометр, 2 – камера, 3 – балон с газом, 4, 5 – зразки.

Також відомо, що коефіцієнт тертя в процесі припрацювання зазвичай вище встановленого коефіцієнта тертя, що характеризує фрикційні властивості конкретної трибопари. В даній роботі проаналізовані коефіцієнти тертя трибопар при тому або іншому навантаженні та амплітуді для певної ділянки напрацювання досліджуваних зразків.

Зразки для випробувань представлені на рис.2.8. Робоча поверхня, що представляє собою замкнуте кільце з номінальною площею контакту $0,5 \text{ см}^2$, внутрішнім діаметром 11 мм і зовнішнім діаметром 13,6 мм. На робочу поверхню зразка наноситься або наклеюється певний металополімерний або полімерний КМ якій тестується в умовах вібрацій.

Вимірювання зносу зразків проводилося за допомогою профілометр-профілограф HANDYSURF 550 згідно ISO 17025:2017 шляхом зняття профілограм з восьми рівнобічних робочих поверхонь зразка в радіальному напрямку та визначалося згідно рис.2.9.

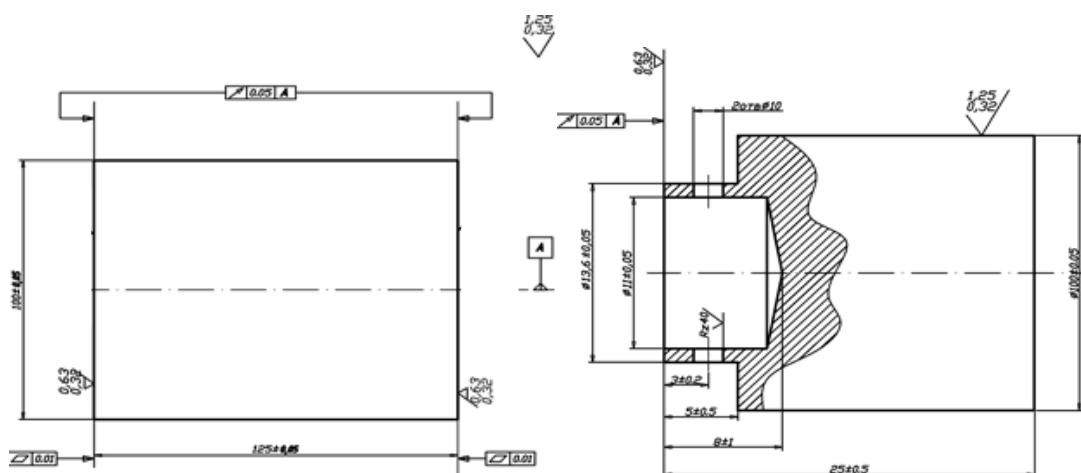


Рис. 2.8. Зразки для випробувань матеріалів та покриттів на вібраційне навантаження згідно [90].

Знос зразка h_j визначаємо за формулою (2.1):

$$h_i = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} \quad (2.1)$$

де: h_j – відстань на профілограмі доріжки тертя між середніми лініями профілю вихідної та робочої поверхні.

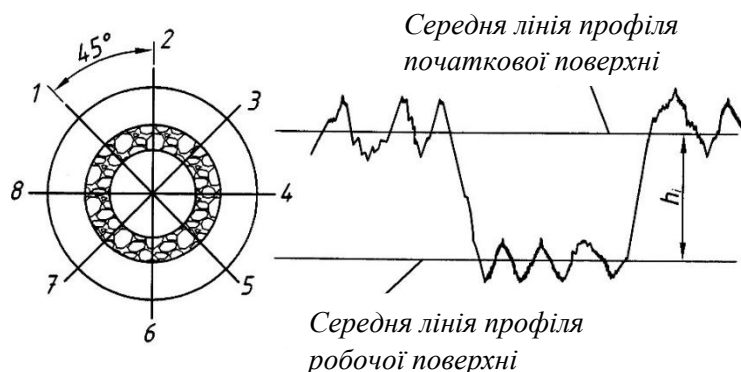


Рис. 2.9. Схема визначення зносу зразків при трибодослідженнях в умовах вібрацій [90].

Важливою перевагою визначення зносу лінійним методом [101, 102] є те, що величина зносу не залежить від питомої ваги матеріалу та можливих змін маси зразків.

2.3. Розробка методики досліджень матеріалів та покриттів при низькочастотних реверсивних рухах.

Модернізація машини для випробувань матеріалів в умовах фретинг-корозії має багато переваг, але в роботі стояла задача проведення випробувань ШП в умовах, максимально наближених до реальних. Найважливішою умовою, що реалізована під час досліджень, - це рух ШП ковзання під час роботи.

У попередньому розділі згадувалось, що ШП ковзання із металополімерними трибопарами використовуються в рухомих та нерухомих з'єднаннях. Для нерухомих з'єднань на першій стадії досліджень дуже добре підходить для випробувань машина МФК та її модернізація, що була описана в розділі 2.2. Однак, для наближення випробувань та умов навантаження до реальних, необхідно розробити пристосування для реалізації саме реверсивних рухів під дією навантаження, які були б максимально приближені до реальних умов, згідно аналізу [55, 56, 90] та вимог СТП 651.02.061-92.

Для розробки методики випробувань ШП в умовах реверсивних рухів було модернізовану вузол контакту машини на базі МФК-1 та розроблений спеціальний пристрій для навантажування і утримування зразків для випробувань.

Зразок на який наносився або приклеювався матеріал для випробувань на реверсивне тертя, представляє собою шестикутник з плоскими робочими поверхнями, який представлено на рис. 2.10, а. Цей зразок закріплювався в зажимному пристрої і був нерухомий. Рухомим відповідним контрзразком приймалося кільце шириною 5-10 мм, що вирізалось із реального підшипника ковзання діаметром 30 мм. Матеріалом контрзразка були високолеговані сталі 95X18Ш або 12X18Н9Т, з яких виготовляють ШП.

Матеріал контрзразка можна оброблювати різними методами для визначення оптимальної трибопари. В звичайних умовах у стандартних підшипниках ковзання типу ШН - це полірований матеріал 95X18Ш. Але є варіанти з полірованим покриттям хрому та керамічними покриттями.

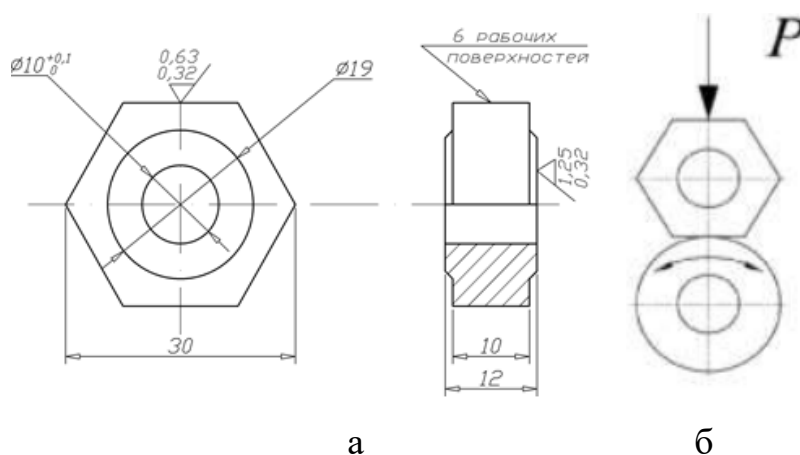


Рис. 2.10. Зразок для випробувань матеріалів та покриттів при реверсивному русі (а) та схема навантаження (б) при випробуваннях.

Оцінку зносостійкості металополімерів проводили за максимальною глибиною пошкодження матеріалів. Вимірювання проводили за допомогою профілометр-профілограф HANDYSURF 550 згідно ISO 17025:2017 шляхом визначення максимального пошкодження матеріалу із 5 ділянок робочої поверхні зразка. Випробування проводилися не менше, ніж по три досліди на кожну точку.

Схема вузла контакту зразків установки для досліджень матеріалів та покриттів при низькочастотних реверсивних рухах представлена на рис. 2.10, б.

Для утримування шестигранних зразків в робочій зоні розроблено спеціальний пристрій, що дозволяє навантажувати та періодично спостерігати за поверхнею тертя зразків під час досліджень. Дуже важливо спостерігати за контрактом поверхонь тертя під час випробувань, але не кожна установка чи пристрій дозволяє це робити. Проблема в тому, що трибоконтакт повинен бути в одному і тому ж місці, без зміщень. Даний пристрій дозволяє періодично розвантажувати систему та візуально спостерігати за поверхнями контактуючих зразків, не змінюючи кріплення зразка та контрзразка. Наприклад, в класичній схемі установки МФК-1 така можливість відсутня. Фотографії вузла, що навантажує зразки, представлено на рис. 2.11.

Слід зазначити, що за схемою контактування зразків в розробленому пристосуванні можливо проводити дослідження до температур +60 °С. Тобто перевага випробувань модернізованого пристрою, що було описано в розділі 2.2.

зберігається. Підігрів матеріалів для випробувань можливий за аналогічною методикою, що було описано вище.

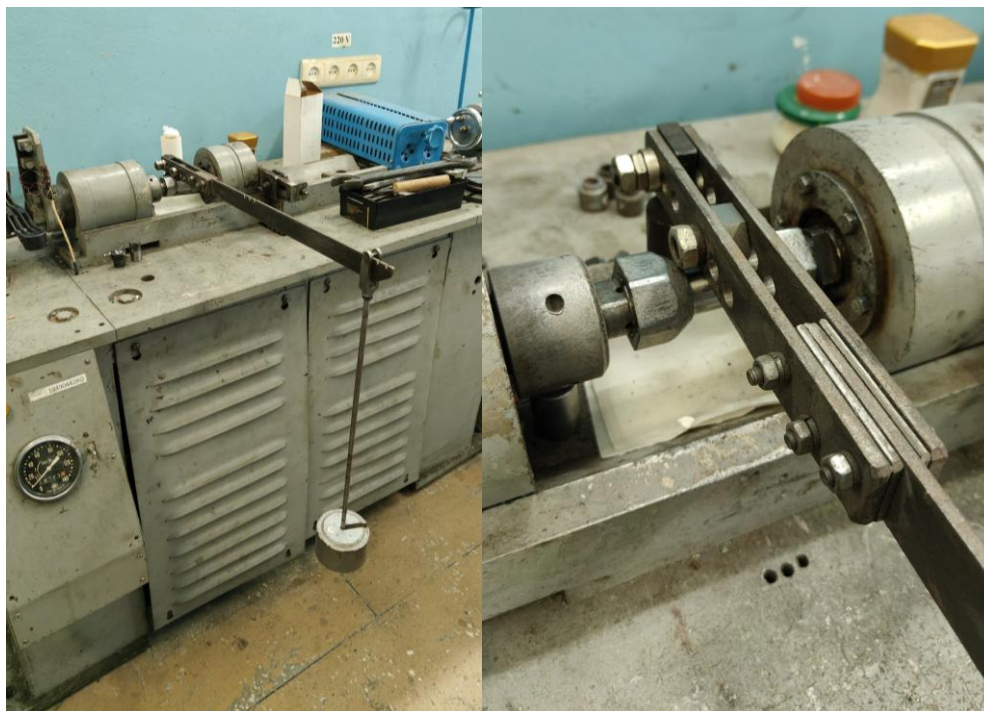


Рис. 2.11. Фотографії пристосування, що утримує та навантажує зразки при випробуваннях на реверсивне тертя.

2.4. Розробка методики для лабораторних ресурсних випробувань шарнірних підшипників ковзання.

Для випробування ШП діаметром від 15 до 30 мм було розроблено установку, яка імітує спеціальні умови роботи підшипників в широкому діапазоні навантажень. Особливістю цієї установки є випробування готових ШП із геометричними розмірами згідно DIN ISO 12240-1 (DIN 648) та ГОСТ 3635-78 (навантаження та кількість циклів напруцювання, порядок контролю зазорів) та вимог СТП 651.02.061-92 (навантаження для ШП, база випробувань на ресурсні дослідження, умови проведення випробувань) які були визначені при розробці цієї установки як базові.

Установка була розроблена згідно трьохстороннього договору № 1049-X16 «Розробка методики та вдосконалення обладнання для випробувань шарнірних підшипників» між Національним авіаційним університетом, ДП Завод Антонов та ООО «Укртехавіа». Проектування та розробка була виконана автором

дисертаційної роботи під керівництвом конструкторів конструкторського бюро ДП Завод «Антонов».

Схема установки та основного вузла представлена на рисунку 2.12. Установка дозволяє проводити випробування ШП в умовах реверсивного руху при комбінованому (радіальному та осьовому) навантаженні до 200 кН.

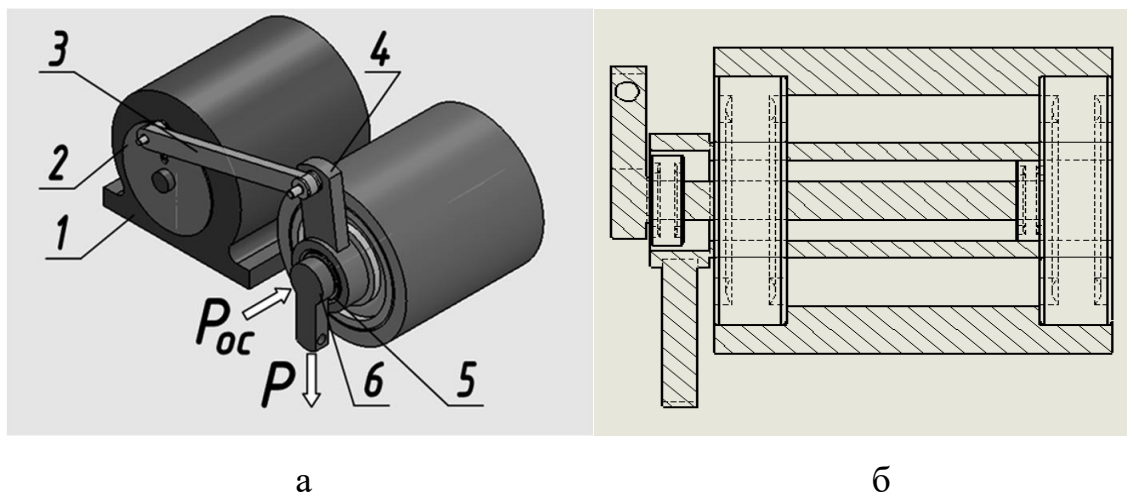


Рис. 2.12. Схема розробленої установки (а) для ресурсних випробувань шарнірних підшипників з навантаженням до 200 кН та конструкція корпусу, який дозволяє утримувати та навантажувати підшипник (б): 1 – електричний двигун-редуктор, 2 – диск для зміни кута коливань, 3 – важіль передачі зусиль, 4 – утримувач зовнішньої обойми підшипника, 5 – корпус (основний вузол), де розташовується шарнірний підшипник, 6 – важіль внутрішньої обойми шарнірного підшипника.

Установка працює наступним чином. Електричний двигун-редуктор 1 типу МЦ2С-80 приводить в дію диск 2, на якому закріплено важіль 3. Швидкість обертання дорівнює від 1 до 5 качаній в секунду та її можна змінювати за допомогою зміни швидкості обертів електричного двигуна. На диску 2 знаходяться прорізи. Переміщення шарніра важеля 3 в прорізах диску 2 будуть задавати кут, на який буде зміщуватись ШП під час ресурсних випробувань. Кут, на який зміщується підшипник, регулюється за допомогою шарнірів та диском 2, що встановлюється на двигун-редуктор 1 і дорівнює від 15 до 90°. Утримувач 4, на якому закріплюється зовнішня обойма ШП, сприймає навантаження від важеля 3 і перетворює його у зворотно-поступальний рух. Утримувач 4 знаходиться в

корпусі 5 і має вільний обертовий рух. Корпус 5 тримає утримувач 4 за допомогою двох підшипників кочення, які розташовані на двох кінцях валу. Важіль внутрішньої обойми ШП 6 представляє собою вал, де з одного боку тримається в корпусі ШП 7, що досліджується, а з іншого боку у звичайному підшипнику кочення. На важіль внутрішньої обойми ШП 6 прикладається розрахункове навантаження, яке задається гідравлічним домкратом типу ДГС-10 в 50 кН та за допомогою важеля підвищується до 200 кН. Тиск контролюється в процесі ресурсних випробувань за допомогою манометру.

Специфічною особливістю даних випробувань є те, що для кожного типорозміру ШП діаметром від 15 до 30 мм необхідно виготовляти перехідні втулки. При великих навантаженнях необхідно надійно утримувати ШП в вузлах установки.

Існує можливість випробування підшипника розміром 35 мм. Для цього необхідно виготовити перехідний вал саме для цього типорозміру. Ресурсні випробування на такий тип ШП (35 мм) не проводилось, але можливість така закладена при розробці основного корпусу. Слід зазначити, що навантаження в цьому випадку будуть становити від 50 кН та базі випробувань в 100 тис циклів, тривалість випробувань буде складає більше 10 годин. Слід уважно контролювати навантаження, тому що при тривалих випробувань і великих тисках відбувається зменшення дії гідравлічного домкрату за рахунок гідравлічних втрат.

Згідно [47, 55, 56] умови навантаження для ШП під час випробувань є комбінованими. Тобто має проявлятися одночасна дія радіального та осьового зусилля. В розробленій установці передбачена така можливість. Існує додатковий пристрій, який завантажує тримач 4 внутрішньої обойми ШП (рис. 2.11, б) та прикладає за допомогою важеля певне зусилля. Згідно нормативних документів, осьове зусилля при комбінованому навантаженню складає 10 % від радіального.

Отже, розроблена установка для ресурсних випробувань ШП типорозмірів від 15 до 30 мм дозволяє проводити дослідження в наступних діапазонах:

1. Частота коливань ШП від 1 до 5 качаній за секунду.
2. Радіальне навантаження ШП до 200 кН.

3. Осьове навантаження ШП до 5 кН.

4. Кут, на який повертається ШП в процесі випробувань від 15 до 90 градусів.

Фото розробленої установки для лабораторних ресурсних випробувань авіаційних ШП ковзання представлено на рис. 2.13. На рис. 2.14 представлено основний вузол для утримування ШП та гідравлічний домкрат для реалізації реальних умов навантаження до 200 кН.

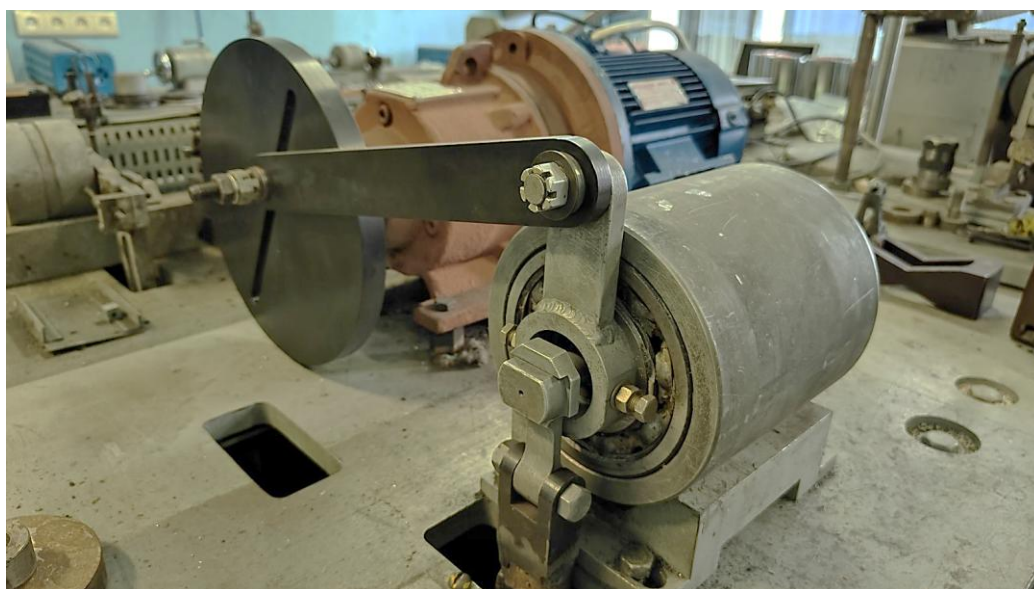
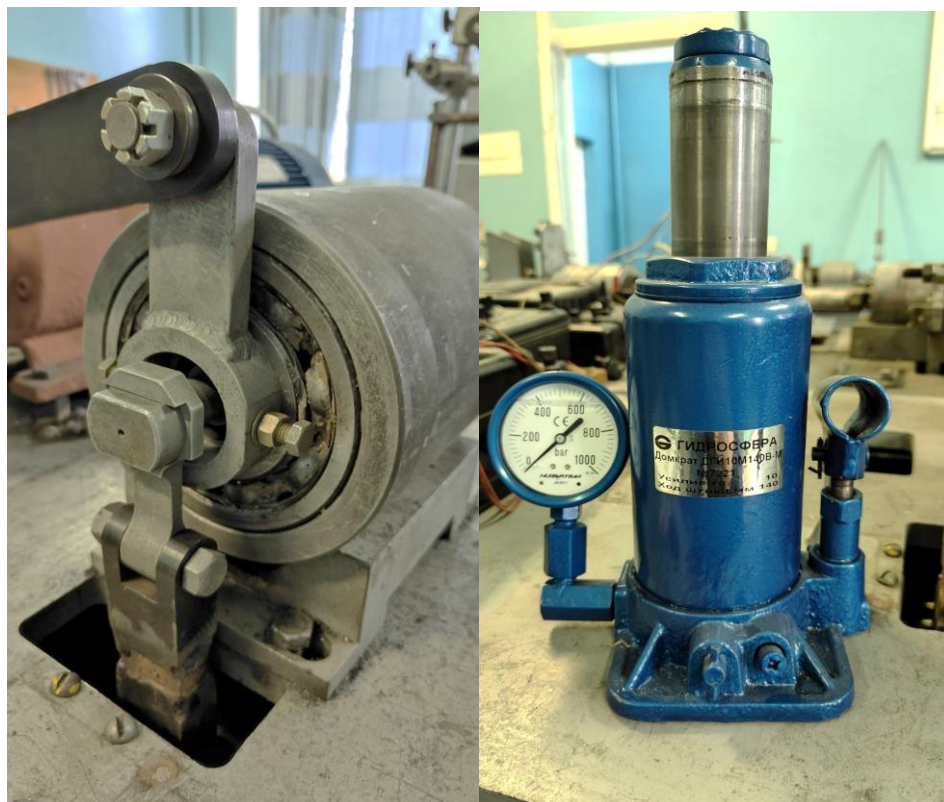


Рис. 2.13. Фотографія розробленої установки для лабораторних ресурсних випробувань шарнірних підшипників ковзання.

Знос при ресурсних випробуваннях контролюється згідно [47] та DIN ISO 12240 (рис. 2.15). Зусилля в осьовому напрямку вибирається індивідуально для кожного типу розміру ШП в залежності від технічної літератури (додаток Е) і складає, наприклад, для підшипника ШН30ЮТ – 20 кг. Вимірювався зазор ШП після випробувань індикатором часового типу за допомогою опори-тримача.

База випробувань ШП може закладатися різною. Мінімальна паспортна кількість повторювань для всіх ШП, що пропонується в відкритому доступі складає 5 тис. циклів. В залежності від умов навантаження та їх напрямлення база випробувань може коливатись від 5 до 100 тис. циклів. Це гарантована кількість циклів, що закладає [47] та DIN ISO 12240 до працездатного стану ШП. За умов досліджень при менших навантаженнях або при дослідженні руйнувань шарів

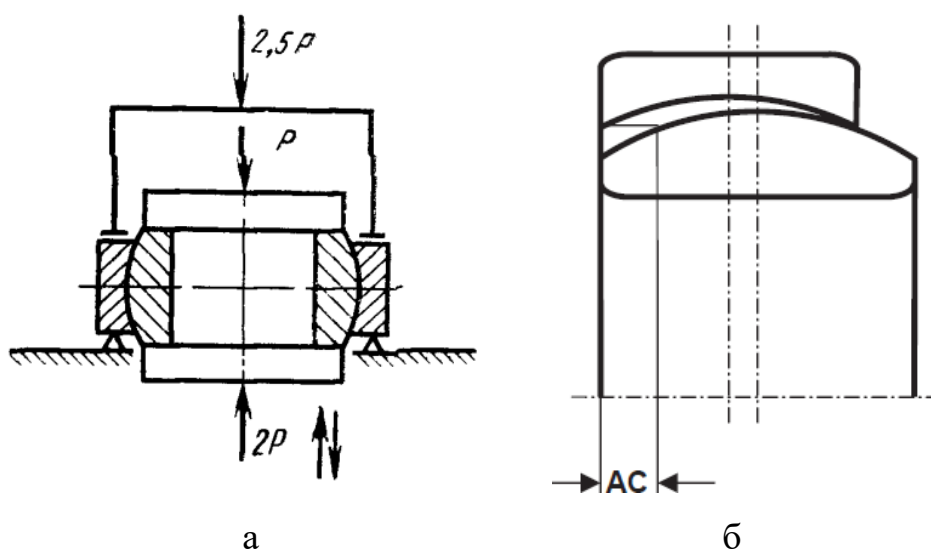
металополімерних та полімерних КМ покриттів, базу випробувань можна збільшувати.



а

б

Рис. 2.14. Фотографія основного вузлу для утримування шарнірних підшипників (а) та гідравлічного домкрату (б) який задає навантаження при випробуваннях.



а

б

Рис. 2.15. Схема визначення (а) осьового зазору (б) шарнірного підшипника згідно [47] та DIN ISO 12240.

2.5. Планування експерименту та статистична обробка результатів при випробуваннях матеріалів в умовах вібрації.

Математичну обробку результатів досліджень виконували за допомогою методики математичної теорії планування експерименту [93, 100, 103], яка дозволила використовувати математичний апарат не тільки при обробці результатів досліджень, а також і при підготовці та проведенні дослідів, що істотно скоротило час при виконанні дослідницької роботи [104, 105].

Розрахунки проводилися за допомогою програми "MathCAD", що дозволяє створювати рівняння регресії та обробляти статистику. У додатках представлено розрахунок середнього, стандартного відхилення, треті та четверті моменти, коефіцієнти кореляції та стандартні помилки коефіцієнтів кореляції.

Як приклад, наведено розрахунок оцінки впливу питомого навантаження P та амплітуди переміщення A при випробуванні на зносостійкість вакуумно-дугового покриття молібдену (для внутрішньої обійми ШП) в парі зі сталлю 95X18Ш.

В якості математичної моделі, що показує процес, була обрана квадратична модель, яка використовується для практичного опису більшості технологічних процесів [94, 95]:

$$y = \sum_{u=0}^N b_u X_u + \sum_{u \leq j} b_{uj} X_u X_j + \sum_{u=1}^N b_{uu} X_u^2 \quad (2.2)$$

де: b_u – коефіцієнти математичної моделі, що показують ступінь даного фактору на функцію відгуку;

X_0 – фіктивне переміщення, що дорівнює одиниці;

b_{uj} – коефіцієнт, що характеризує парну взаємодію.

Коефіцієнти рівняння регресії будуть визначені на основі експериментальних даних – чисельного дослідження.

Значення обраних рівнів факторів, що варіюються, наведені в табл.2.1.

Для отримання оцінок коефіцієнтів рівняння (2.2) використовували повний факторний експеримент типу 2^2 . Матриця планування експерименту з

розрахунковими стовпцями взаємодії факторів представлена в табл. 2.2. Кожен дослід рандомізовано за допомогою генератора випадкових чисел.

Таблиця 2.1.

Рівні факторів, що варіюються, та інтервали їх варіювання

Рівні факторів, що варіюються	Кодове значення	P , МПа	A , мкм
		X_1	X_2
Основний рівень	0	25	175
Інтервал варіювання	Δx_i	15	125
Верхній рівень	+1	40	300
Нижній рівень	-1	10	50

Середнє значення параметра оптимізації з паралельних дослідів визначаємо за формулою (2.2).

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{r} \sum_{u=1}^r y_{1u} \quad (2.2)$$

Дисперсію паралельних дослідів визначаємо за формулою (2.3)

$$s_1^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{u=1}^r (y_{1u} - \bar{y}_1)^2 \quad (2.3)$$

Для визначення можливості проведення регресійного аналізу розраховали однорідності дисперсій паралельних дослідів за критерієм Кохрена (2.4)

Таблиця 2.2.

Матриця планування експерименту

№ досл.	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	X_1^2	X_2^2
1	+	-	-	+	+	+
2	+	+	-	-	+	+
3	+	-	+	-	+	+
4	+	+	+	+	+	+
5	+	0	0	0	+	+
6	+	0	0	0	+	+
7	+	0	0	0	+	+
8	+	0	0	0	+	+

$$G_p = \frac{s_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} \quad (2.4)$$

Розрахункове значення критерію порівнювали з табличним для ступенів свободи: чисельником $f_1 = r - 1$, знаменником $f_2 = N$ та відповідно до обраного рівня значущості $\alpha = 0,05$ [93]:

$$G_{\text{табл}} = 0,5157 > G_p = 0,1358$$

Отже, гіпотеза про однорідність дисперсій паралельних дослідів приймається. Звідси дисперсія відтворюваності дорівнює (2.5)

$$s^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N s_u^2 \quad (2.5)$$

Помилка експерименту обчислюється рівнянням (2.6) та відповідає 4%

$$s(y) = +\sqrt{s^2(y)} \approx 4,0\% \quad (2.6)$$

Розрахунок коефіцієнтів рівняння (2.2) проводимо за формулою (2.7) з урахуванням матриці планування експерименту (табл. 3.4.)

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{1u} y_u \quad (2.7)$$

Чисельне значення коефіцієнтів дорівнює:

$$\begin{array}{ll} b_0 = 863,8 & b_{12} = 716,2 \\ b_1 = 731,6 & b_1^2 = 3,0 \\ b_2 = 836,4 & b_2^2 = 3,3 \end{array}$$

Після розрахунку всіх коефіцієнтів, рівняння (2.2) набуває вигляду:

$$y = 863,8 + 731,6X_1 + 836,4X_2 + 716,2X_1X_2 + 3,0X_1^2 + 3,3X_2^2$$

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів проводили з допомогою t – критерію. Для повного факторного експерименту помилки всіх коефіцієнтів рівні між собою та визначаються рівнянням (2.8)

$$s(b_i) = \frac{s(y)}{\sqrt{N_r}} \approx 0,82 \quad (2.8)$$

Далі визначаємо довірчий інтервал $2\Delta b_i$, за формулою (2.9)

$$\Delta b_i = t_{\kappa p} s(b_i) \approx 1,74 \quad (2.9)$$

Критичне значення $t_{кр}$ вибирали по таблиці [96] для числа ступенів свободи $N(r - 1) = 16$ та прийнятому рівні значимості 0,05. Всі коефіцієнти рівняння (2.2) визначились статистично значимими.

Далі рівняння (2.2) перевіряємо на адекватність.

Адекватність рівняння визначаємо за допомогою F – критерія за формулою (2.10)

$$F_{1,p} = \frac{s_{1AA}^2}{s^2(y)} \quad (2.10)$$

Так як $F \approx 0,6 < 1$, то рівняння (2.2) можна вважати адекватним.

Таким чином, аналізуючи рівняння (2.2), можна стверджувати, що найбільш значним фактором при зношуванні матеріалів в умовах вібрацій, є амплітуда взаємного переміщення зразків, тобто швидкість ковзання.

Висновки до розділу 2.

1. Розроблено методику та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості. Випробування матеріалів та підшипників на цілому ряді установок дозволяє отримати спеціальний сертифікат додаткового типу STC (supplemental type certificate), який видається при наявності ресурсних лабораторних та промислових випробувань.

2. Розроблено структурну логічну схему досліджень впровадження металополімерних та полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в авіації. Послідовність дій в схемі направлена на результат впровадження сучасних антифрикційних та зносостійких композиційних матеріалів у підшипники, що дозволяє дещо розширити номенклатури використання необслуговуваних шарнірних з'єднань і дозволити переведення деяких авіаційних компонентів на обслуговування за фактичним станом.

3. Розроблено методику дослідження металополімерних та полімерних 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.

4. Розроблено методику та лабораторну установку для ресурсних випробувань авіаційних шарнірних підшипників, що дозволяє випробовувати реальні готові підшипники 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).

РОЗДІЛ 3

ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ

3.1. Вибір антифрикційних матеріалів для авіаційних шарнірних підшипників.

В розділі 1.3. представлено аналіз антифрикційних полімерних матеріалів, які використовуються для трибомеханічних систем зокрема, в машинобудуванні, та потенційно можуть використовуватися в авіаційній галузі.

В роботі [78] було визначено, що полімерні матеріали, як правило, не використовують в чистому вигляді. В їх склад вводять різного роду модифікатори, які формують в матеріалі спеціальні властивості. Модифіковані полімерні матеріали є КМ, які складаються з наповнювачів різного виду та полімерної матриці. Модифікатори забезпечують міцність, жорсткість, зносостійкість, коефіцієнт тертя КМ, а полімерна матриця – створення монолітного матеріалу і формоутворення виробів. Наповнювачі мінімізують недоліки полімерів і надають їм нові властивості. В якості полімерної матриці використовують як різні термопластичні, так і термореактивні пластики.

Вплив наповнювачів-модифікаторів на структуру та властивості КМ було досліджено в роботах [84, 106, 107]. Наповнювачі поділяються на металеві та неметалеві. До металевих наповнювачів відносять порошки різних металів (бронза, олово, мідь та ін.) та окисли (MgO , TiO_2 , Ti_2O , Cu_2O та ін.). До неметалевих модифікаторів відносяться порошки або волокна таких матеріалів як: інші полімерні матеріали, смоли, мінерали, тверди змащувальні матеріали, вуглеволокна, скловолокна, наноматеріали та ін.

Так, в роботі [84] було досліджено оптимальний вміст наповнювачів в матеріалі PTFE. Автори визначили, що найбільша зносостійкість досягається в матеріалі PTFE із вмістом: 20 % коксу (зносостійкість підвищується в 600 разів) [82, 89], 15 % скловолокна (зносостійкість збільшується в 250 разів) [82, 86], 15 %

графіту (зносостійкість збільшується в 500 разів) [106], 20 % дисульфиду молібдену та коксу (зносостійкість збільшується в 1000 разів) [88, 107], 10 % вуглецевих волокон (зносостійкість збільшується в 100 разів) [89], бронза [78, 106] та полімерні наповнювачі [78, 84] повністю змінюють властивості матеріалу PTFE, а його зносостійкість залежить в цьому випадку від додаткових факторів. Підвищення зносостійкості показано в порівнянні із чистим PTFE.

Автори робіт [65, 74, 75, 78], дослідивши зносостійкість 6 полімерних матеріалів та 28 модифікацій із наповнювачами встановили, що найбільш бажаним матеріалом для підшипників кочення є матеріал PTFE.

Інші досліді [78, 88, 107] показують, що найбільш вдалою композицією із цим матеріалом є комбінація – PTFE+15% C+5% MoS₂. Політетрафторетилен або фторопласт, або тефлон із додаванням 15 % коксу або графіту та 5 % дисульфиду молібдену - це найбільш оптимальний матеріал з позиції зносостійкості та низького коефіцієнту тертя (матеріал Ф-4К15М5). Але цей матеріал в чистому вигляді м'який та не витримує великий тиск. Тому для збільшення варіантів застосування цієї композиції матеріалу в його склад додають бронзу (бабіт) або наносять на напилений газотермічними методами бабіт.

Аналіз робіт [108, 109] показує, що матеріал Б-83 володіє найкращими антифрикційними властивостями серед бронзи, які використовуються для створення підшипників ковзання в машинобудуванні. За складом матеріал Б-83 складається із 83 % олова, 6 % міді та 11 % сурьми. Бабіт Б-83 не крихкий матеріал, це важливо при виробництві різних підшипників ковзання. Його застосовують в парових турбінах, компресорах, дизельних двигунах та інших установках, де існує значне навантаження і високі швидкості ковзання. Існує тільки один недолік у даного сплаву – невисока опірність втоми металів.

Для виробництва ШП типу ШН із металополімерним наповнювачем зазвичай використовують металфторопластову стрічку (МПС). Вона складається із: поверхні з PTFE+MoS₂ завтовшки 0,01-0,05 мм, шару бабіту (наприклад Б-83) завтовшки 0,20-0,5 мм, сталевій основи з низьким вмістом вуглецю завтовшки 0,25-2,70 мм. Властивості металополімерного матеріалу поєднують у собі механічну

міцність сталі та низький коефіцієнт тертя тefлонового поверхневого шару. Проміжний шар і бронзи забезпечує надійне зчеплення між шарами, покращує відведення тепла, що виробляється в процесі експлуатації.

Таким чином **першим** і базовим матеріалом для нашого дослідження є матеріал PTFE+15 % C+5 % MoS₂ або Ф-4К15М5 нанесений на бабітову основу Б-83.

Аналізуючи матеріали серії Zedex необхідно відмітити, що компанія пропонує для використання підшипників ковзання, під наші умови роботи ШП, переважно два матеріали: ZX-100K та ZX-324.

Базовий матеріал ZX-100K пропонується використовувати до температур +110 °С. Цей матеріал створено на основі PET з модифікуючими наповненнями, які становлять секрет компанії. Якщо порівнювати його із PTFE, то матеріал має наступні відмінності: більша стійкість розмірів під навантаженням (не холодоплинний); більш висока зносостійкість за рахунок міцності (в 5 разів міцніший за фторопласт); менше і показники максимальної робочої температури (у PTFE +250°С проти +110°С у ZX-100K); менша хімічна стійкість, ніж у PTFE.

Матеріал ZX-324 також пропонується компанією для використання підшипників ковзання. Термопластичний полікристалічний полімер ZX-324 розроблено як модифікація РЕЕК і володіє всіма перевагами цього полімеру. Матеріал ZX-324VMT є модифікацією цього матеріалу для складних умов роботи. Матеріал може тривало експлуатуватися при температурах від -50 до +250°С, зберігаючи високі механічні властивості. Цей полімер характеризують висока межа міцності при розтягуванні і межа витривалості при вигині для знакозмінного циклу.

Таким чином можна сказати, що матеріал ZX-100K це аналог матеріалу Ф-4К15М5, а матеріал ZX-324VMT - це аналог МПС. В нашому випадку **другим** матеріалом для досліджень було обрано ZX-324VMT, як аналог проміжного матеріалу між обіймами ШП.

Матеріали фірми IGLIDUR поділяється на наступні базові матеріали: G, A350, M250, P210, J, TX1, X, P, J260, J350, J3, L250, R, D, Z. Всі ці матеріали можуть працювати як повноцінні підшипники ковзання, але в залежності від умов роботи

та навантаження, необхідно визначити найоптимальніший матеріал для досліджень. У лінійці матеріалів IGLIDUR є як чисті полімерні матеріали PTFE, PEEK, PEK, PA, так і їх комбінації з різними наповнювачами.

Проаналізувавши характеристики матеріалів та умови роботи ШП, визначено, що найбільш підходять для подібних умов роботи матеріали IGLIDUR G (для важких умов експлуатації, статичне навантаження до 200 МПа, динамічне навантаження 140 МПа, висока зносостійкість та стабільність геометрії, хороша стійкість до рідких середовищ) та IGLIDUR TX1 (винятково тривалий термін служби в екстремальних умовах, зносостійкість і стійкість до ударів навіть при високих навантаженнях і температурах, висока зносостійкість, особливо при високих навантаженнях, висока термостійкість, матеріал рекомендовано для екстремальних навантажень).

Для використання в ШП ковзання, враховуючи умови роботи та навантаження, які сприймає підшипник оптимальним з розглянутих буде матеріал IGLIDUR TX1, який обрано **третім** матеріалом для досліджень.

Компанія FLURO спеціалізується саме на виробництві ШП ковзання та шарнірних головок. Підшипники цього виробника працюють у сучасних машинах по всьому світі: діапазон робочих температур становить від -50 до +150 °C. Матеріали FLUROGLIDE поділяються на два типи: WEAR SOLID (для максимальних статичних та динамічних навантажень) та MEDIA SOLID (для великих динамічних навантажень). Наприклад підшипник GE30EW-2RS - це повний аналог авіаційного підшипника ШН30ЮТ. Відмінною особливістю всіх ШП є те, що спеціальний матеріал FLUROGLIDE працює в контакті полірованого хромового покриття, який наноситься на внутрішню обойму підшипника.

Таким чином, **четвертим** матеріалом для дослідження було обрано матеріал FLUROGLIDE WEAR SOLID, який максимально відповідає умовам роботи ШП в авіаційній промисловості.

Отже для дослідження були обрані наступні матеріали:

1. Металополімерна стрічка із матеріалом PTFE+15%C+5%MoS₂, із бабітом (Б-83) на сталевій стрічці.

2. Матеріал ZX-324VMT, що являє собою полімерний КМ з матрицею PEEK армовану нановуглеволоком з додаванням PTFE, MoS_2 та іншими функціональними добавками.

3. Матеріал IGLIDUR TX1 – це полімерний КМ (інженерний пластик), армований довгими волокнами із додаванням функціональних добавок. За своїм складом схожий на конструкцію матеріалу ZX-324VMT.

4. Матеріал FLUROGLIDE - це КМ: армована тканина, в склад якої входить матеріал PTFE та інші наповнювачі які становлять секрет компанії.

На рис. 3.1 представлено зовнішній вигляд вибраних металополімерних та полімерних КМ для випробувань.

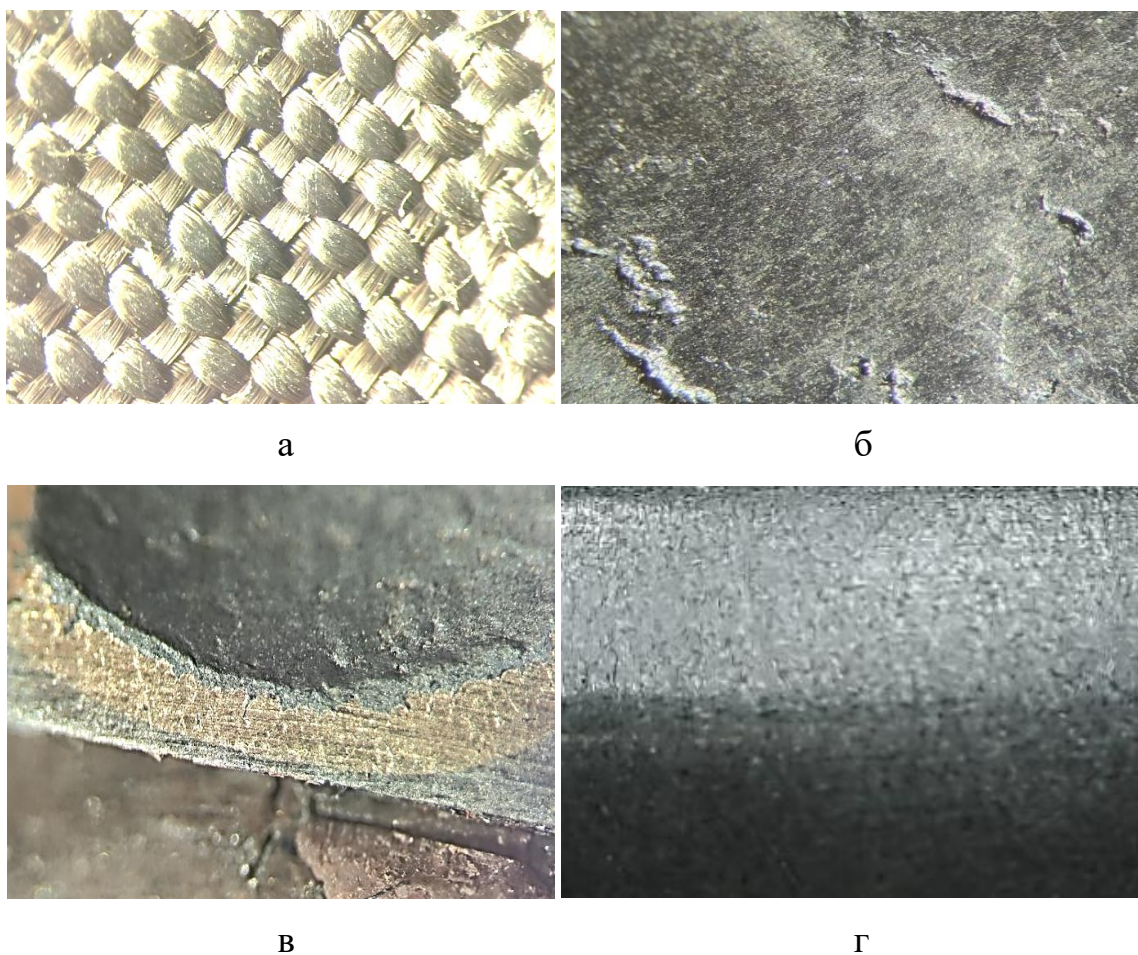


Рис. 3.1. Фото поверхонь композиційних матеріалів для трибодосліджень: а – матеріал FLUROGLIDE, б – матеріал ZX-324VMT, в – металополімерна стрічка, г – матеріал IGLIDUR TX1.

3.2. Дослідження антифрикційних композиційних матеріалів при зношуванні в умовах вібрації.

На першому етапі наших триботехнічних досліджень необхідно було проведення оцінку зносостійких характеристик вибраних матеріалів.

При виборі методики та установки для дослідження необхідно врахувати той факт, що отримані результати зносостійкості композиційних матеріалів мають бути співставленні з іншими методиками та дослідженнями [14, 25, 34, 50, 51, 76, 110-113] для випробувань зносостійкості КМ.

Більшість цих методик відтворюють однонаправлене тертя ковзання. Однак умови роботи ШП в ПС показують, що одним із впливових факторів, який кардинально впливає на зносостійкість це реверсивний рух. Отже, для трибодослідження металополімерних та полімерних КМ обрана методика [90]. Але зазначена стандартна методика не дозволяє провести трибологічні випробування в умовах, які відповідають роботі ШП.

Отже, ця методика була модернізована і більш повно описана в розділі 2.2. Модернізація установки МФК-1 полягала у наступному: заміна ексцентрика (позиція 3 в див. рис. 2.2) для збільшення амплітуди взаємного переміщення зразків та зміни обертів електричного двигуна до 3 коливань за секунду (встановлюється додаткове охолодження електричного двигуна позиція 2 див. рис. 2.2).

Зразки для випробувань – циліндричні ролики діаметром 20 мм (див. рис. 2.7) на які були наклеєні пластинки із металополімерних або полімерних КМ. Матеріал контрзразків був такий самий, із якого виготовляють обойми ШП ковзання – 95Х18Ш із твердістю HRC 54-58 одиниць.

Частота коливань в 3 Гц була визначена в ході досліджень [55, 56] та вираховувалась із умов роботи ШП важелів зміни кута атаки лопотів несучого гвинта автомату перекошу гелікоптера. Наприклад, номінальні оберти несучого гвинта гелікоптера Мі-8МТВ-1 складають 192 ± 2 об/хв, що відповідає показникам по приладам 95,3 % та частоті коливань біля 3 Гц.

Дослідження по визначенню лінійного зносу та інтенсивності зношування металополімерних та полімерних КМ виконували на повітрі при терті без

мастильного матеріалу. Всі зразки перед проведенням дослідів протирались ганчіркою зі спиртом, щоб мінімізувати вплив пилу та наявність мастильних матеріалів. Температура зразків при випробуваннях відповідала 16-20 °С. Вологість повітря в ході проведення дослідів не контролювалась і відповідала стандартним умовам 40-60%.

З метою підвищення точності та достовірності результатів досліджень, кількість зразків що випробовувались складало не менше як три на один ідентичний експеримент. Коефіцієнт тертя вимірювався згідно [90], данні реєстрації моменту тертя зберігаються на комп'ютері. Амплітуда взаємного переміщення зразків складала 500 мкм, а база випробувань становила 100 тис. циклів. Питоме навантаження зразків становило 5, 10 та 12 МПа.

Результати зміни лінійного зносу металополімерних та полімерних КМ в залежності від навантаження представлено на рис. 3.2.

Дослідженнями встановлено, що при постійній кількості циклів досліджень, рівній 100 тис., в діапазоні навантажень від 5 до 12 МПа КМ характеризуються наступними особливостями: при 5 МПа знос становить 23...27 мкм; при підвищенні контактного навантаження до 10 МПа спостерігається незначне зростання лінійного зносу в середньому 6...12 мкм; при збільшенні навантаження до 12 МПа знос значно зростає. Але характер зносу МПС дещо інший. Знос МПС при навантаженні 5 МПа більше, ніж у матеріалів Zedex та Iglidur і на 18 % і 7 % перевищує знос Fluroglide. При навантаженнях в 10 МПа результати зносу майже однакові у всіх матеріалів (32...34 мкм). На цьому етапі матеріал Iglidur має знос більше, ніж у МПС, проте результати зносу інших матеріалів знаходяться нижче. Картина зносу повністю змінюється при підвищенні навантаження до 12 МПа. Із гістограми (рис. 3.2) видно, що лінійний знос МПС має найменше значення, знос зростає на 15 %, проте як у всіх інших матеріалів знос підвищується на 25 % для Fluroglide, 30 % для Zedex та 32 % для Iglidur, в порівнянні з показниками зносу при 10 МПа.

Характер зношування матеріалів Zedex та Iglidur майже однаковий. Це пояснюється складом цих матеріалів. По конструкції будови ці матеріали схожі:

полімерний матеріал із армованими волокнами та багатофункціональними добавками. Зносостійкість цих матеріалів визначається присутністю в них твердих мастильних матеріалів в поєднанні з пластиком PTFE в якості армуючого матеріалу. Така тенденція поєднання матеріалів продовжується і поглиблюється останніми роками. Розширення технічних областей застосування таких матеріалів [114, 115] досягається завдяки високій несучій здатності, зносостійкості, демпфуючим якостям та відсутності в необхідності ТО полімерних антифрикційних КМ, які знаходять застосування практично у всіх галузях машинобудування.

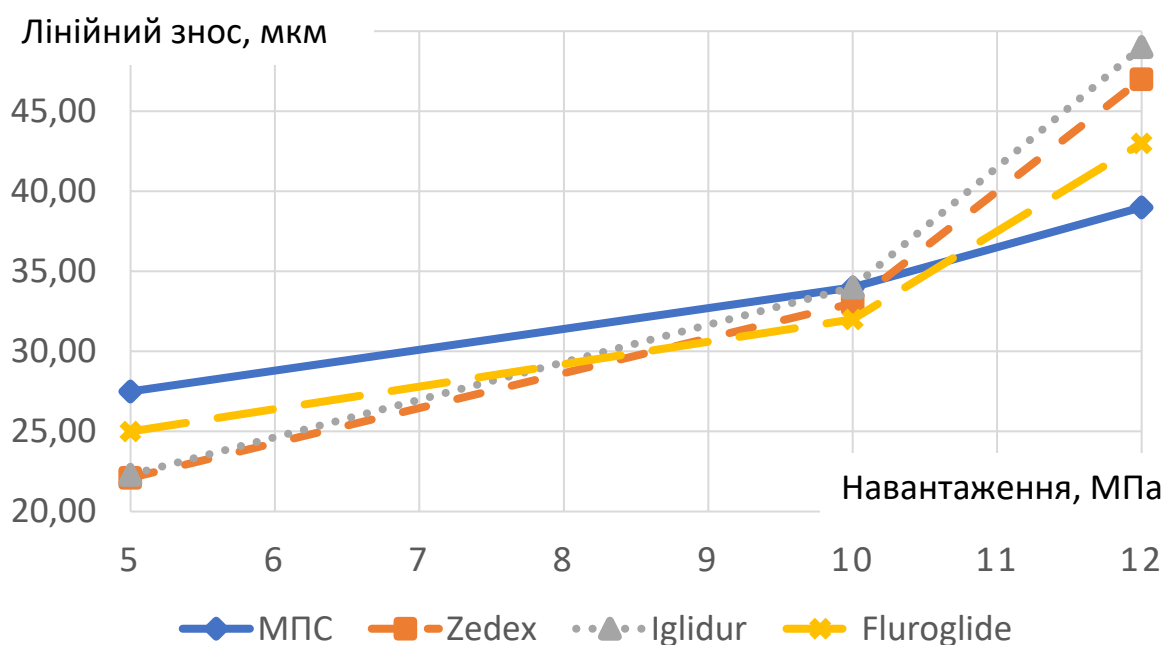


Рис. 3.2. Залежність лінійного зносу металополімерної стрічки (МПС) та полімерних композиційних матеріалів від питомого навантаження в умовах вібрацій. Умови випробувань: (A-500 мкм, ν – 3 Гц, N – 10^5 циклів, T – 293 K).

Результати зносу МПС при навантаженні в 5 МПа показали найбільшу величину, в порівнянні з іншими матеріалами. Природа МПС така, що при навантаженні спочатку іде обжимання (стирання) матеріалу PTFE+15%C+5%MoS₂ до певного значення, а потім навантаження на себе сприймає бабіт на металевій стрічці. Полімерний шар в структурі МПС має сумарну товщину, в залежності від умов використання та навантаження, від 20 до 100 мкм. За своєю природою ця суміш матеріалів є основою для припрацювання пар тертя та використовується в

багатьох втулках та підшипниках ковзання [116, 117]. Міцність полімерного шару матеріалів споріднена із міцністю бабітового матеріалу, а триботехнічні характеристики визначаються матеріалом PTFE+15%C+5%MoS₂. Оскільки знос МПС при 5 МПа склав 27 мкм, то спрацьовується, перш за все, верхній шар МПС. Найвищу інтенсивність спрацьовування полімерного композиційного шару МПС, в порівнянні з іншими досліджуваними полімерними КМ можна пояснити, ймовірно, тим, що дана композиція не містить в своєму складі армуючих волокон, а лише дрібнодисперсні наповнювачі С та MoS₂.

При аналізі зносу МПС при 12 МПа характер зношування змінюється. В цьому випадку відбувається припрацювання матеріалів, що знаходяться на металевій стрічці, з більшою швидкістю а далі вже навантаження сприймається металевою стрічкою із проміжним антифрикційним шаром бабіту. Тобто при збільшенні навантаження на пари тертя ключову роль відіграє в характері зношування саме бабіт на сталевій основі. Проміжний шар на поверхні розмазується на контртіло та при розрахункових «паспортних» навантаженнях забезпечує нормальну роботу деталей протягом всього терміну служби. Таким чином, МПС показала найкращі результати по зносу при навантаженнях в 12 МПа.

Покриття Fluroglide відрізняється за своєю структурою від всіх інших матеріалів та нагадує матеріал у вигляді тканини із вдавленим в неї полімерним матеріалом із наповнювачами. Така структура є типовою для ШП типу ШЛТ, де контакт матеріалу є сталь-органоволокніт. Склад тканини в нашому випадку - це вуглецеві волокна переплетені із волокнами PTFE та покриті полімерним матеріалом із функціональними добавками. Повний склад матеріалу Fluroglide є запатентованим та тримається компанією в секреті.

Аналізуючи зносостійкість цього матеріалу, можна сказати, що результати зносу (рис. 3.2) займають проміжне положення між матеріалами Zedex, Iglidur та МПС. При навантаженнях в 5 МПа результат зношування цього матеріалу середній. Пояснюватись це може щільністю тканини та її будовою. Тобто при навантаженні в 5 МПа матеріал Fluroglide має меншу початкову жорсткість ніж, інші полімерні КМ Zedex та Iglidur і більшу, ніж МПС. Характер зношування

змінюється при навантаженні в 10 МПа. Тут вже працює весь матеріал, включаючи і демпфуючі властивості вуглецевих волокон та PTFE. Але при підвищенні навантаження до 12 МПа знос підвищується та знаходиться посередні між матеріалами МПС та Zedex, Iglidur.

На рис. 3.3 представлені топографії поверхонь тертя МПС та матеріалу Fluroglide після випробувань в умовах вібрацій. На фото видно, що при випробуваннях в умовах вібрацій спостерігалось роздавлювання полімерного матеріалу та видавлювання його із зони тертя. Найбільше це спостерігалось у МПС з огляду на те, що поверхневий шар полімерного матеріалу найменш міцний серед матеріалів, що досліджуються. Менш за все цей ефект спостерігався у матеріалів Zedex та Iglidur. При дослідженні матеріалу Fluroglide завдяки своїй структурі спочатку відбувалось зміцнення (здавлювання) армованих волокон а потім вже процес їх пошкодження.



Рис. 3.3. Топографії поверхонь тертя матеріалів: металополімерної стрічки (а), Fluroglide (б), після випробувань в умовах вібраційних навантажень. Умови випробувань ($A=500$ мкм, $\nu=3$ Гц, $P=10$ МПа, $N=10^5$ циклів, $T=293$ К).

Питоме навантаження є фактором, який істотно впливає на площу фактичного контакту та глибину поверхневих шарів матеріалів, які приймають участь в процесі тертя та руйнування. Крім того, величина питомого навантаження визначає умови доступу зовнішнього газового середовища в зону тертя, що теж частково, впливає на характер та інтенсивність зношування. Мається безліч різних

варіантів залежностей зносу матеріалів від питомого навантаження. За даними одних авторів [118], залежність має лінійний характер, за даними інших авторів [119] – параболічний, пов'язаний зі зменшенням істинної амплітуди переміщення при вібрації. У деяких ранніх роботах взагалі відмовляються від впливу питомого навантаження на характер та інтенсивність руйнування контактних поверхонь при вібраціях.

З підвищенням навантаження, релаксація напруги, в місцях контакту при ефективному розсіюванні коливань енергії в матеріалі матриці призводить до більш рівномірного їх розподілу за загальним об'ємом, в тому числі і в армуючих волокнах полімерного матеріалу та може зменшити небезпеку руйнування. З іншої сторони – при високих демпфуючих властивостях полімерних матеріалів забезпечується рівномірне прилягання поверхонь контакту внаслідок демпфування коливань, що призводить до збільшення площі фактичного контакту і, як наслідок, до зменшення локальних тисків. У результаті, після певного зростання місцевих контактних напружень і пошкоджень в полімерних КМ, процес перенесення матеріалу може мати затухаючий характер (при умові не підвищення температури в зоні контакту) внаслідок зростання числа центрів релаксації. Однак, якщо матеріал не володіє запасом мікропластичності, то з підвищенням навантаження деформаційні процеси в контакті, в умовах важкої релаксації, будуть призводити до постійного зростання ступеня пошкоджуваності пари тертя [118, 119]. Але, як правило, при випробуваннях на зносостійкість полімерних матеріалів, переважають теплові процеси в зоні тертя, які безумовно призводять до зменшення жорсткості полімерів та збільшення ділянок схоплення.

Результати випробувань погоджуються з даними робіт [119, 120]. Так, автори роботи [120], досліджуючи матеріали, отримали схожу залежність в умовах вібрацій та реверсивного руху. Автори встановили, що коефіцієнт тертя матеріалів при терті з БрАЖ 9-4 набагато вище, ніж у пари з 30ХГСА. Були визначені оптимальні умови навантаження для ряду матеріалів при терті в парі із 30ХГСА. Встановлено, що при терті матеріалів із бронзою, отримують розвиток різні поєднання механічних, фізичних і хімічних процесів. В роботі [121] при

дослідженні матеріалів на основі нікелю при вібраціях, автори отримали лінійні залежності.

Однією із основних характеристик роботи трибосистеми є коефіцієнт тертя. Графік зміни коефіцієнта тертя від кількості циклів вібрації представлено на рис. 3.4.

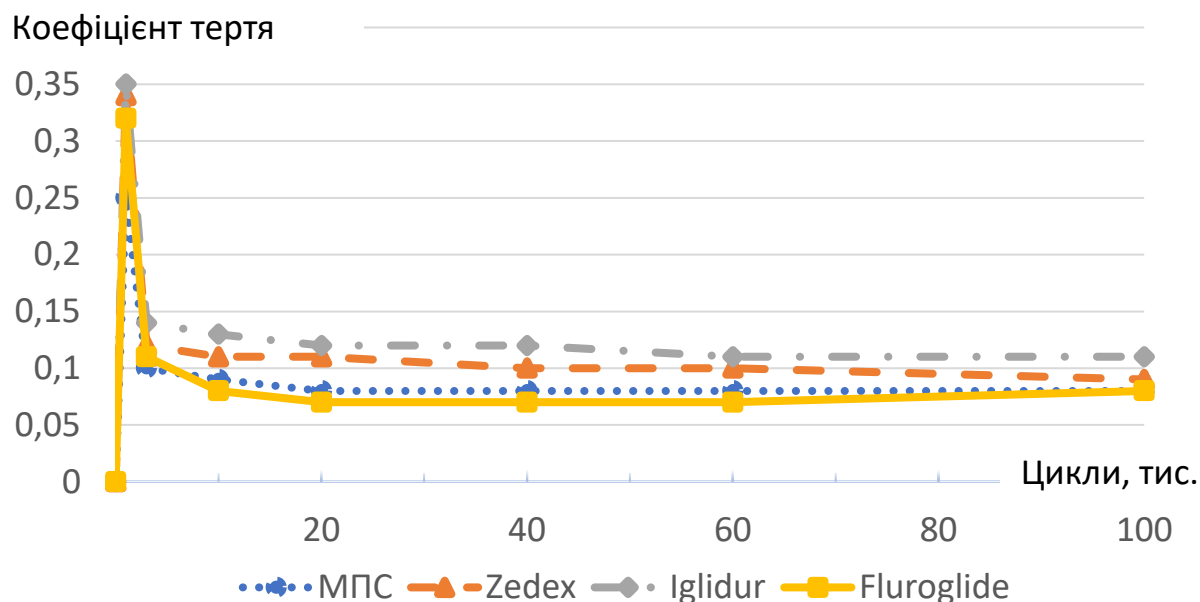


Рис. 3.4. Залежність зміни коефіцієнтів тертя матеріалів, що досліджуються від кількості тисяч циклів вібрації. Умови випробувань ($A=500$ мкм, $\nu=3$ Гц, $P=10$ МПа, $N=10^5$ циклів, $T=293$ К).

Аналізуючи графіки зміни коефіцієнту тертя можна зробити висновки, що найнижчим коефіцієнтом тертя 0,07-0,08 володіють матеріали, на поверхні яких знаходяться PTFE із твердими мастильними матеріалами. Конструктивно саме у МПС та матеріалу Fluroglide фторопласт першим контактує з контртілом і сприяє самоорганізації процесів в зоні тертя. У інших КМ фторопласт лише у вигляді домішок, а основу (матрицю) складає матеріал PEEK і відповідно, коефіцієнт тертя вищий. Збільшення коефіцієнту тертя для полімерного КМ Iglidur обумовлено наявністю в поліамідній матриці вуглецевих армованих волокон більшого розміру.

У початковий період припрацювання випробуваних покриттів після невеликої кількості циклів коефіцієнт тертя дещо зростає. Однак, при подальшому збільшенні тривалості випробувань, коефіцієнт тертя різко падає. Етап

першочергового зростання коефіцієнту тертя може знаходитися в межах від 100 до 1000...3000 циклів коливань. Тривалість періоду, при якому коефіцієнт тертя зберігається на високому рівні, збільшується з ростом навантаження. При малих навантаженнях початковий приріст коефіцієнта тертя не спостерігався, а спостерігався його спад відразу з початком випробувань [122, 123]. Неоднозначність зміни коефіцієнта тертя вже на ранніх стадіях в умовах вібрацій свідчить про те, що при зміні параметрів навантаження, відбувається зміна провідних процесів контактної взаємодії, природа яких залишається недостатньо досліджуваною [118, 124].

Досліджувані покриття в діапазоні до 1 тис. циклів знаходяться на стадії припрацювання з контрзразком. Цей період характеризується нестабільним коефіцієнтом тертя. Механізм зношування покриттів може змінюватися багато разів, доки стане стабільним [120]. У роботі [125], при дослідженнях в умовах вібрації, цей період роботи взагалі не беруть до уваги. Найменші коефіцієнти тертя, що встановилися, мають МПС та Fluroglide, що пояснюється наявністю на поверхні матеріалу PTFE та наповнювачів у вигляді твердих мастильних матеріалів.

Таким чином, вибір антифрикційного КМ із високими реологічними дисипативними властивостями дозволить знизити коефіцієнт тертя трибопари, збільшити кількість циклів напрацювань до руйнування матеріалу та його інтенсивності зношування.

Отже, аналізуючи результати випробувань в контакті площина-площина можна сказати, що стандартні зразки для випробувань в умовах вібрацій згідно [90] не повно розкривають трибохарактеристики антифрикційних КМ, і необхідно проведення додаткових випробувань.

3.3. Дослідження трибохарактеристик антифрикційних композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах.

Для наближення результатів випробувань до реальних результатів довговічності ШП була розроблена методика проведення досліджень при реверсивному терті, яка детально була описана в розділі 2.3. Перевагою цієї

розробленої методики є те, що установка імітує рухи, які відбуваються під час роботи ШП ковзання. Змінюючи діаметр роликів при відповідній частоті коливань, можна імітувати саме реальні швидкості та умови роботи ШП.

Особливістю установки є контакт зразків в зоні тертя. ШП застосовуються для передачі великих зусиль при контакті поверхні площина-площина. Ці зусилля є суттєвими до 200 кН та накладають жорсткі вимоги до обладнання. Таким чином, для досліджень та випробувань при низькочастотних реверсивних рухах було вибрано контакт циліндр-площина. Цей контакт дозволяє проведення випробувань металополімерних та полімерних КМ та покриттів при значно меншому навантаженні та швидше, ніж при ресурсних випробувань на реальних ШП.

Дослідження зносостійкості проводили на зразках (див. рис. 2.9) у вигляді шестигранників на сторони яких були прикріплені фрагменти антифрикційних металополімерних та полімерних КМ. В якості рухомого контрзразка було кільце шириною 5 мм, яке вирізалось із зовнішньої обойми підшипників. Матеріал контрзразка аналогічний матеріалу ШП – 95Х18Ш.

Для підвищення достовірності дослідження випробування проводили не менше, як по три рази на кожен стовпчик на гістограмі. Критерієм зносостійкості матеріалу була максимальна усереднена глибина пошкодження. Існують роботи [126], де в подібних контактах при випробуваннях фактором зносу служить об'єм матеріалу, який зносився під час випробувань. Наприклад, в роботах [127] цей фактор використовують для аналізу зношування газотермічних покриттів та матеріалів на основі кобальту. В нашому випадку досліджувані матеріали на полімерній основі, тому використовували саме лінійний знос.

Умови досліджень були наступні:

- частота коливань 3 Гц;
- база випробувань 100 тис. циклів;
- навантаження на трибопару 30 Н;
- діаметр контрзразка 30 мм;
- ширина ролика 5 мм.
- лінійна швидкість ковзання 0,033 м/с.

Отримані результати випробувань представлені на рис. 3.5. Аналізуючи результати випробувань, можна стверджувати, що МПС має найбільшу зносостійкість в даних умовах випробувань. Оскільки всі досліджувані матеріали характеризуються багатокомпонентною структурою, саме вона буде визначати зносостійкість матеріалу. Тому проаналізуємо одержані результати лінійного зносу з позиції типу сполучника та типу армуючого матеріалу (волокна, наповнювачі, структура та ін.).

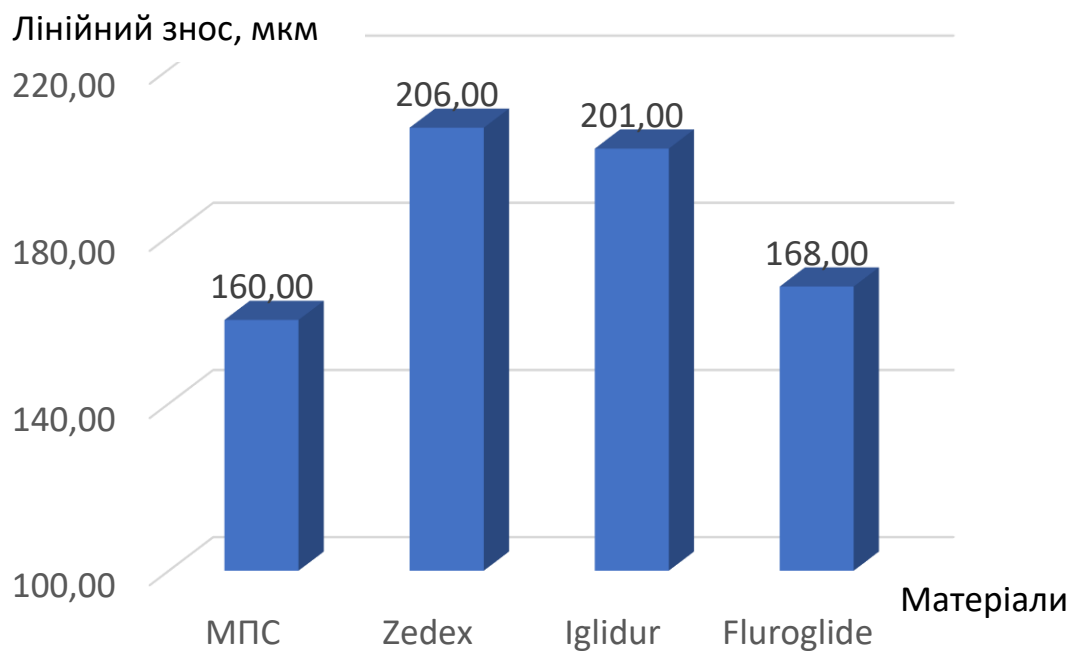


Рис. 3.5. Зносостійкість металополімерних та полімерних композиційних матеріалів при низькочастотних реверсивних рухах. Умови випробувань ($V = 0,033$ м/с, $\nu = 3$ Гц, $P = 30$ Н, $N = 10^5$ циклів).

При зношуванні МПС матеріал РТФЕ+15%С+5 %MoS₂, який знаходиться на поверхні, в першу чергу вступає в процес контакту із металевим зразком. Цей шар полімерного КМ зазвичай для авіаційних ШП не перевищує 100 мкм і вважається шаром для припрацювання. Тобто під дією навантаження цей матеріал, роздавлюючись, заповнює всі пори та нерівності внутрішнього шару МПС матеріалу бабіту (Б-83), на який нанесено композиційний полімер. Та вже після припрацювання вступає в контакт тертя матеріал бабіту який і виступає основним матеріалом для роботи в МПС в авіаційних ШП. В цьому випадку в процесі тертя вже працює весь матеріал, із чого складається МПС. Таким чином в процесі

зношування МПС задіяні і тверди мастильні матеріали (С та MoS_2), і елементи сполучника (матеріал PTFE), і в основному матеріал бабіту. Підвищення зносостійкості МПС з зазначеними складовими компонентами досягається за рахунок підвищеної стійкості до зносу армованого С та MoS_2 PTFE та бабіту на основі олова, який характеризується високою теплопровідністю на рівні $65 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Матеріал Fluroglide показує наступний найкращий результат по зносу, в порівнянні з досліджуваними матеріалами. Різниця в показниках між МПС знаходиться в межах похибки 5 %. Зносостійкість цього матеріалу визначається його конструкцією із армуванням. Полімерний матеріал із функціональними добавками, що входить в склад КМ, працює майже так само, як на МПС. На початковій стадії випробувань під дією великих контактних навантажень полімерний матеріал PTFE роздавлюється та розподіляється між армованими волокнами, зменшуючи питомий тиск в зоні контакту. Таким чином, період припрацювання характеризується збільшенням фактичної площі контакту за рахунок механодеструкції полімерної матриці, що сприяє рівномірному розподілу контактного навантаження в зоні тертя, яке сприймається переважно армуючою складовою полімерного КМ Fluroglide. В той же час, полімерний матеріал з наповнювачем забезпечує високі антифрикційні властивості даного полімерного КМ.

Якщо порівнювати механізми зношування металополімерного матеріалу із полімерним КМ на основі тканини, то можна сказати, що основну роль в зносостійкості відіграє саме каркас матеріалів. І тут вже можна порівнювати зносостійкі характеристики матеріалу бабіту, який було створено в 1841 році і нормовано ГОСТ 1320-74, та сучасних багатофункціональних армованих полімерних КМ.

Аналіз робіт [128-131] показує, що зносостійкість сучасних полімерних КМ при певних умовах роботи перевищує зносостійкість матеріалів на основі бабіту. Зносостійкість бабіту пояснюється механічними характеристиками цього матеріалу, який за своїми властивостями нагадує основні полімерні матеріали без

додавання функціональних добавок та армованих волокон. Також велика перевага бабіту є у відведенні тепла, в порівнянні із полімерними КМ. При збільшенні температури в зоні тертя до 232 °С олово, яке складає основну частку бабіту Б-83, розплавлюється та виступає в ролі змащувального матеріалу. Основний механізм зносостійкості бабіту при помірних навантаженнях – це низький опір зсуву, що забезпечує реалізацію ефекту «самозмащування».

У полімерних матеріалів механізм при терті дещо інший. Армування полімерних матеріалів та додавання в них спеціальних додаткових елементів формують певні властивості КМ для заданих умов роботи.

Так, в роботі [129] показано, що при експлуатаційних випробуваннях підшипники ковзання будівельних та дорожніх машин, які виготовлені з полімерів і працюють в абразивному середовищі, як правило, показують вищі антифрикційні властивості, ніж бронза. Зносостійкість їх на 40...50 % вище бронзових, причому сталеві сполучені деталі зношуються на 50...60 % менше, ніж при роботі з бронзовими підшипниками.

В роботі [130] показано, що підшипники, виготовлені з наповненого хаотично орієнтованими графітованими волокнами поліаміду, надійно працюють при тиску до 28,5 МПа і мають зносостійкість при 50 і 315 °С відповідно в 7 і 1,5 рази більшу, ніж у разі направленої орієнтації графітових волокон. Для роботи в умовах криогенних температур застосовують поліаміди, заповнені дисперсними частками бронзи. Фірма «Баден» (США) розробила самозмащувальні підшипники, працездатні в інтервалі температур від -50 до +260 °С. Сепаратор цих підшипників виготовляють з пористих поліамідних матеріалів SP-8 і SP-8I. Недоліком матеріалів на основі поліамідів є велика швидкість газовиділення, що в деяких випадках обмежує їх використання у вакуумній техніці, а також крихкість, що необхідно враховувати при технологічних процесах обробки деталей. Крім того, ці матеріали мають високу вартість.

Автори [131] довели, що полімерні вкладиші атегміт АТМ-2, фторопласт, текстоліт, капрон, нейлон, деревощарові пластики та ін. мають дуже низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість (в 5...6 разів вище, ніж у бронзи). Вкладиші

із полімерів добре приробляються, стійкі до заїдання. Їх застосовують у підшипниках гідротурбін, насосах, хімічній промисловості, машинах, що працюють у запиленому середовищі.

Результати лінійного зносу полімерних КМ Zedex та Iglidur (рис. 3.5) свідчать про зростання на 20 % зазначеного параметру, в порівнянні з МПС та Fluroglide. Структури цих полімерних КМ схожі між собою (армування матриці волокнами та наповнювачами), та різниця становить в типі матриці, кількісному складі армуючих волокон та матеріалах, які використовуються в якості наповнювачів. Зносостійкість цих матеріалів визначається саме їх конструкцією. Ми маємо в основі полімерний матеріал, зміцнений армуванням. На початковому етапі припрацювання, при формуванні робочої топографії поверхні відбувається, перш за все, механіко-термічна деструкція полімеру. Зазначені полімерні КМ характеризуються теплопровідністю на рівні $0,24 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що, імовірно, знижує їх зносостійкість, в порівнянні з МПС. Однак, величина лінійного зносу цих полімерних КМ знаходяться в межах допуску допустимого зносу в осьовому зазорі, який становить 300 мкм. Зносостійкість полімерних КМ Zedex та Iglidur визначається наявністю в їх структурі каркасу армованих волокон, завдяки чому дані матеріали характеризуються межею міцності при розтягу відповідно 0,14 та 0,22 ГПа та модулем пружності при розтягу 7,8 та 12 ГПа. Незначне збільшення даних показників для полімерного КМ Iglidur обумовлює зменшення лінійного зносу даного матеріалу на 2,5 % в порівнянні з полімерним КМ Zedex.

Висновки, які були зроблені при аналізі зносу МПС та полімерних КМ в роботі підтверджують і топографії поверхонь тертя, які представлені на рис. 3.6.

Слід зазначити, що випробування металополімерних та полімерних КМ було проведено при реверсивному русі ковзання при статичному навантаженні. В реальних умовах навантаження часто змінюється від від'ємних значень навантаження до максимальних. Це все впливає на умови роботи ШП та їх експлуатаційне призначення.

В роботах [126, 132] було досліджено вплив динамічного фактору на пару тертя та проведено порівняльний аналіз його із статичним навантаженням. Автори

стверджують, що зноси від циклічного знакозмінного ковзання значно перевищують зноси від динамічного навантаження із проковзуванням. Динамічний фактор дуже впливає на зносостійкість полімерних КМ при підвищенні температури та при динамічному навантаженні, коли значення імпульсу перевищує границю міцності полімерного матеріалу.

В цілому автори [118, 132] зазначають, що при відносному русі ролика, поверхня покриття зазнає імпульсних (вібраційних) навантажень, в результаті чого в поверхневих шарах поширюються затухаючі хвилі деформацій – напружень. Механічна енергія, що підводиться при зовнішньому терті, передається в матеріал покриття за допомогою зазначених хвиль, що обумовлено непружними явищами і характеризує здатність матеріалу незворотно розсіювати енергію механічних коливань, перетворюючи її в тепло [118, 124].



Рис. 3.6. Топографії пошкоджень поверхонь тертя металополімерної стрічки (а) та полімерного композиційного матеріалу Fluroglide (б) після випробувань на зносостійкість. Умови випробувань ($V = 0,033$ м/с, $\nu = 3$ Гц, $P = 30$ Н, $N = 10^5$ циклів).

В умовах динамічного (імпульсного, ударного) навантаження провідну роль набувають такі реологічні характеристики, як чутливість матеріалу до концентрації напружень (здатність до релаксації напружень), які тісно пов'язані з непружними явищами. Релаксація локальних напружень в металах та сплавах залежить від щільності дислокацій, їхньої рухливості та розподілу атомів впровадження. Мікропластичність надає визначальну роль релаксації напружень, які мають дислокаційну природу. Підвищення мікропластичності матеріалу підтверджується

суттєвим зростанням внутрішнього тертя, що пов'язане зі значним підвищенням густини незакріплених рухомих дислокацій [133].

Релаксаційні процеси даного роду реалізуються в проміжному шарі МПС – бабіті. Полімерні КМ які до 35...65 % в своєму складі містять полімерний сполучник, характеризується іншим механізмом релаксації напружень. При терті, в результаті припрацювання досліджуваних полімерних КМ, формується оптимальна топографія поверхні, внаслідок чого відбуваються рівномірний розподіл контактних напружень в локальних зонах армування. При швидкодійних низькочастотних реверсивних рухах кількість тепла, яка виділяється, за рахунок механічних втрат, не призводить до критичного нагрівання сполучника (матриці), робоча температура якого в полімерних КМ Fluroglide, Iglidur та Zedex може становити відповідно 150, 120 та 250 °С. За таких умов в досліджуваних полімерних КМ реалізується стала деформація повзучості (в'язкопружності), що сприяє нормальній роботі матеріалів, при якій відбувається рівноважне руйнування [134].

3.4. Дослідження трибохарактеристик матеріалів для внутрішньої обойми шарнірних підшипників.

Аналізуючи ШП та досвід передових компаній у виробництві підшипників можна стверджувати, що матеріали трибопари, які застосовуються у контакті метал-полімер змінюються.

Так наприклад, для підшипників типу ШН використовують для виробництва внутрішньої обойми ШП сталі марок 95X18Ш та 12X18Н9Т. До цих матеріалів пред'являються жорсткі вимоги, особливо щодо корозійного впливу, що актуально в авіаційній галузі. Контакт полірований метал-полімер - це ідеальне поєднання для тривалої роботи при умові правильно підібраних КМ. Але якщо на поверхні тертя з'являються зони корозійного впливу середовища, то поверхня руйнується із зміненням шорсткості. Корозійні виразки призводять до значної зміни мікрогеометричних характеристик поверхні. І як наслідок, зміна профілю внутрішньої обойми призводить до катастрофічного руйнування полімерного матеріалу в процесі роботи підшипника.

Деякі виробники використовують захисне покриття на поверхнях металів при виробництві своїх підшипників. До таких покриттів можуть відноситись покриття, одержані в процесі фосфатування, хромування та ін., покриття дисульфиду молібдену. Всі ці покриття призначені або для підвищення корозійної стійкості матеріалів, або для підвищення зносостійкості пар тертя. Для авіаційної галузі актуальне питання як щодо корозійної стійкості, так і для підвищених характеристик зносостійкості ШП.

Наприклад, компанія FLURO для деяких серій своїх ШП використовують покриття хрому. Вважається, що трибопара хромове покриття-металополімерний матеріал це запорука надійної роботи та підвищених характеристик щодо зносостійкості. Інші компанії наносять на свої підшипники керамічні покриття [135], що теж підвищує довговічність ШП.

Також існують роботи [132, 136], де автори показують переваги впровадження титанових матеріалів в вузли авіаційних конструкцій за рахунок своїх унікальних характеристик (висока питома міцність, корозійностійкість, широкий діапазон робочих температур). Але спроби впровадження для авіаційних підшипників титанових матеріалів не використовувалось. Титанові матеріали дуже погано працюють за умов тертя ковзання. В роботах [132, 137] показано, що чистий титановий матеріал BT-22 працює в 5 раз гірше по зносостійкості, ніж матеріал 95X18Ш.

Таким чином, потрібно, з одного боку впровадження легких та міцних матеріалів в авіаційну галузь, а з іншого боку підвищення зносостійкості цих матеріалів. Отже, актуальним напрямком при виробництві внутрішніх обойм авіаційних ШП є впровадження легких та міцних матеріалів на кшталт титанових матеріалів (надають легкість конструкції) які будуть модифіковані зносостійкими покриттями.

В роботах [132, 138] зазначається, що використання покриття молібдену підвищує зносостійкість пар тертя в 1,5-2 рази. Автори проводили дослідження зносостійкості молібдену та порівнювали його із різними матеріалами. Визначено, що товщини гальванічного покриття молібдену в 0,1 мм достатньо для

забезпечення зносостійкості основних матеріалів на весь термін служби пари тертя. В роботі [139] показується позитивний вплив молібдену для відновлення пошкоджених поверхонь, які були нанесені газотермічними методами.

Гуртуючись на аналізі зносостійкості та корозійної стійкості матеріалів, для трибологічних дослідженнях матеріалів для внутрішніх обойм ШП було обрано наступні матеріали:

1. Покриття молібдену.
2. Покриття хрому.
3. Сталь 95X18Ш.
4. Титановий сплав BT-22.

Матеріал 95X18Ш - це базовий матеріал, який є основою для підшипників типу ШН. Титановий сплав BT-22 обрано в якості альтернативи сталі з метою зменшення ваги підшипника в цілому; для використання сплаву BT-22 як трибоелементу проводилось модифікування шляхом зміцнення поверхневого шару покриттями. Вибір матеріалу BT-22 визначили згідно досліджень [136, 140] як найбільш зносостійкий титановий сплав серед досліджуваних в роботі титанових сплавів. Також доцільність вибору цього матеріалу показує і аналіз його застосування в авіаційній галузі останнім часом. Наприклад, його використовують для заміни авіаційної сталі 30ХГСН2А. Літак Ан-148 має повністю титанове шасі із сплаву BT-22. Але титанові сплави в чистому вигляді не використовуються в парах тертя внаслідок їх підвищеної схоплюваності [141]. Їх завжди модифікують зносостійкими покриттями.

Для модифікуванні поверхневих шарів сплаву BT-22 обрано покриття хрому та молібдену.

Покриття хрому було нанесено гальванічним та вакуумно-дуговим методами. Справа в тому, що гальванічне покриття хрому використовується в машинобудуванні в якості антифрикційного та зносостійкого покриття починаючи із 60-х років попереднього століття. З введенням екологічних норм ISO 14001:2015 та ISO 19011:2018, від гальванічного методу нанесення хромових покриттів намагаються відійти та перейти на більш екологічні. В якості альтернативи

гальванічному покриттю хрому використовується покриття, що нанесене вакуумно-дуговим методом. Цей метод дозволяє створити майже такі ж самі за структурою покриття, як і гальванічні, але із поліпшеними прогнозованими характеристиками. Таким чином, покриття які досліджувались на зносостійкість, наступні:

1. Електролітичний хром $Cr_{гв}$ (електролітичний метод нанесення).
2. Твердий хром $Cr_{тв}$ (вакуумно-дуговий метод нанесення).
3. М'який хром $Cr_{м}$ (вакуумно-дуговий метод нанесення).
4. Молібден Mo (вакуумно-дуговий метод нанесення).

Хром твердий та хром м'який відрізняються структурою розташування зерен на основному матеріалі. При твердому хрому структура покриття нагадує електролітичне і зерна розташовуються в горизонтальній площині. Покриття хрому м'якого має вертикальне розташування зерен. Діапазон товщини досліджуваних покриттів, які були випробувані, представлена в таблиці 3.1. Коливання товщини пов'язане із механізмом нанесення покриттів у вакуумній камері під дією електромагнітного поля. Робота виконувалась в рамках науково-дослідної роботи № 549-X08 (АН01-60(08) «Проведення досліджень та видача рекомендацій по вибору покриттів вузлів шасі» [141] між Національним авіаційним університетом та ДП Завод Антонов.

Таблиця 3.1

Товщина покриттів, що досліджували

Матеріал основи	Вакуумно-дугові покриття			Електролітичний хром
	Хром твердий	Хром м'який	Молібден	
ВТ-22	95-220 мкм	115-205 мкм	70 мкм	12-24 мкм
95X18Ш	95-185 мкм	95-180 мкм	70 мкм	12-24 мкм

Випробування на зносостійкість проводилися на установці, яка імітує вібрацію згідно [90] за схемою контакту площа-площина (див. розділ 2.2). Сутність методу полягає в тому, що циліндричний рухливий зразок, що стикається торцем з нерухомим циліндричним зразком при заданому навантаженні,

приводиться в умовах коливань із заданими амплітудою і частотою.

Дослідження виконувалися при постійному контактному навантаженні, що відповідали 20 та 30 МПа. Частота коливань та амплітуда взаємного переміщення зразків залишалася незмінною і складала 30 Гц та 175 мкм відповідно. База випробувань складала $5 \cdot 10^5$ циклів. Температура зразків під час випробувань дорівнювала 20 С.

В якості контрзразка використовували сталь 95Х18Ш із твердістю HRC 54-58. Змащування контактних поверхонь здійснювалось мастилом Aero Shell Griess 33. Такі умови обрано для стандартних ШП з поверхнею ковзання сталь-сталь, призначені для сприйняття важких, ударних або статичних навантажень (наприклад, ШП у механізмах управління ПС та вузлів шасі).

Вимірювався знос нерухомого зразка за задану кількість циклів, за значенням якого визначається зносостійкість матеріалу, який досліджувався. Для підвищення достовірності одержаних результатів використовували на одну гістограму не менш як по три випробування.

Результати випробувань зносостійкості вакуумно-дугових та електролітичного покриттів наведено на рис.3.7, 3.8 та в таблиці 3.2.

Одразу слід зазначити, що фактичний знос гальванічного покриття хрому при випробуваннях в 30 МПа знаходиться близько 1-2 мкм переважно по всій контактуючій поверхні. У випадку матеріалу основи сплаву ВТ-22 лінійний знос покриття хрому складав 1 мкм з виривами в декількох місцях глибиною до 20 мкм (рис. 3.9, а). Якщо відбувається знос гальванічного покриття хрому на титановому сплаві ВТ-22, то різко збільшується інтенсивність зношування матеріалу за рахунок підвищеної дії титанового сплаву до схоплення з контрзразком (рис. 3.10). У випадку матеріалу основи сталі 95Х18Ш лінійний знос покриття хрому складав 1-2 мкм з виривами в декількох місцях глибиною до 100 мкм (рис. 3.9, б).

Аналізуючи зносостійкість покриттів на сплаві ВТ-22 та сталі 95Х18Ш в умовах вібрацій, можна сказати, що вакуумно-дугові покриття твердого хрому та молібдену показали найбільш зносостійкі характеристики, як при випробуваннях в 20 МПа, так і при випробуваннях в 30 МПа (див. рис.3.7, 3.8).

Лінійний знос випробуваних покриттів та матеріалів

Матеріал основи	Навантаження МПа	Покриття	Знос зразка, мкм
BT-22	20 МПа	-	15,1 мкм
		Cr _{ТВ} вД	близько 0,1 мкм
		Cr _М вД	2,5 мкм
		Мо вД	0,3 мкм
		Cr _{ГВ}	близько 0,3 мкм
	30 МПа	-	22,9 мкм
		Cr _{ТВ} вД	1,4 мкм
		Cr _М вД	6,7 мкм
		Мо вД	1,5 мкм
		Cr _{ГВ}	4,1* мкм
95X18Ш	20 МПа	-	1,2 мкм
		Cr _{ТВ} вД	близько 0,6 мкм
		Cr _М вД	5,0 мкм
		Мо вД	0,8 мкм
		Cr _{ГВ}	близько 0,5 мкм
	30 МПа	-	1,6 мкм
		Cr _{ТВ} вД	3,0 мкм
		Cr _М вД	9,7 мкм
		Мо вД	1,8 мкм
		Cr _{ГВ}	7,1** мкм

* – фактична фретингостійкість 1 мкм з виривами до 20 мкм

** – фактична фретингостійкість 1 мкм з виривами до 100 мкм

Тверде вакуумно-дугове покриття хрому характеризується найвищою зносостійкістю, в порівнянні з іншими типами покриттів цього матеріалу. При навантаженні в 20 МПа поверхня тертя твердого вакуумно-дугового хрому на титановому сплаві BT-22 майже не зношувалася – лінійний знос дорівнює 0,1 мкм (рис. 3.11). Лише в деяких місцях ледь помітно сліди спрацювання покриття зі сталлю 95X18Ш. Тверде вакуумно-дугове покриття хрому на сталі 95X18Ш показало нижчі параметри по зносостійкості (місця припрацювання були більшими, ніж на титановому сплаві BT-22 (рис. 3.11), мінімальний знос покриттів становив 0,6 мкм.

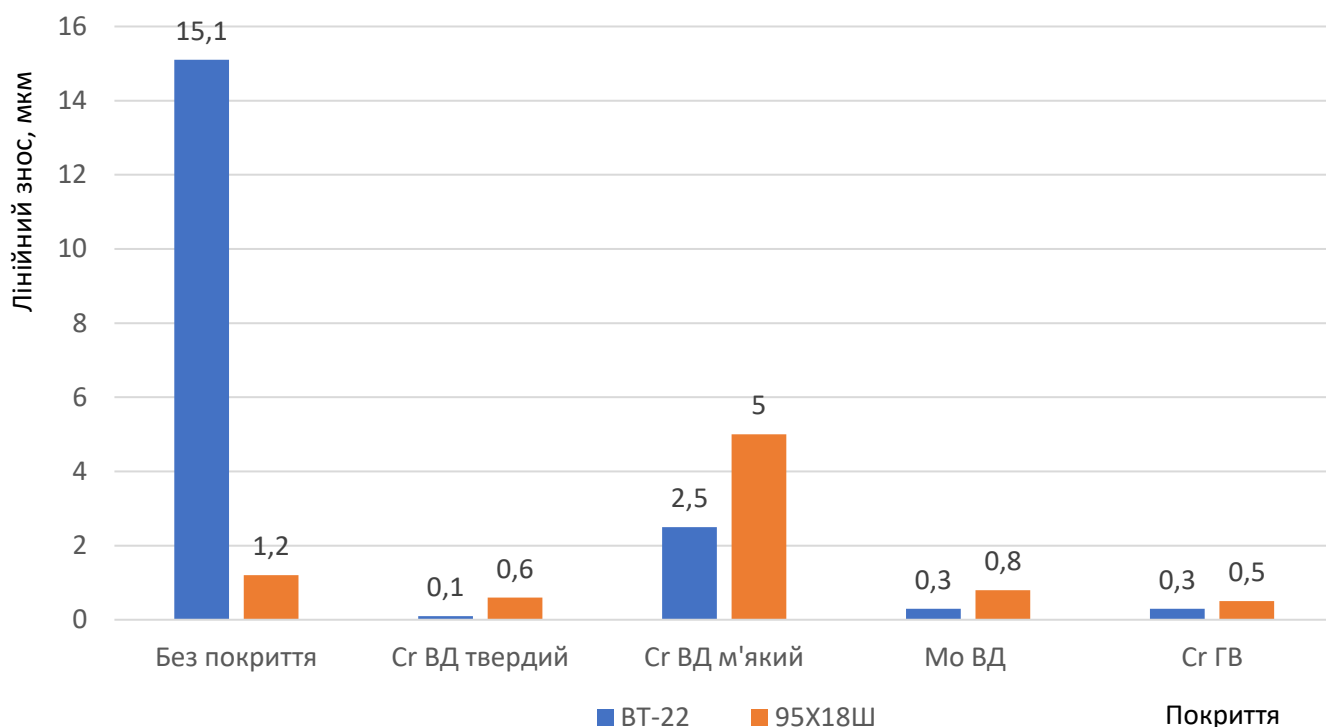


Рис. 3.7. Залежність лінійного зносу вакуумно-дугових та гальванічного покриттів при навантаженні в 20 МПа. Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

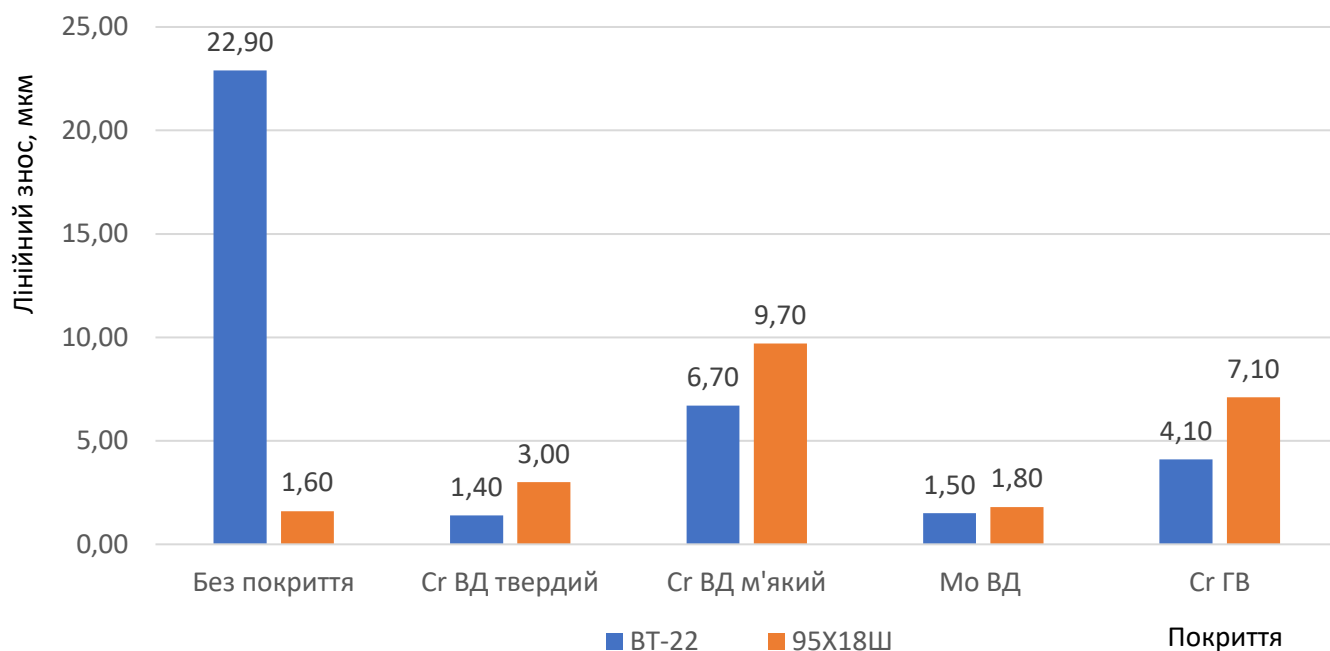


Рис. 3.8. Залежність лінійного зносу вакуумно-дугових та гальванічного покриттів при навантаженні в 30 МПа. Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

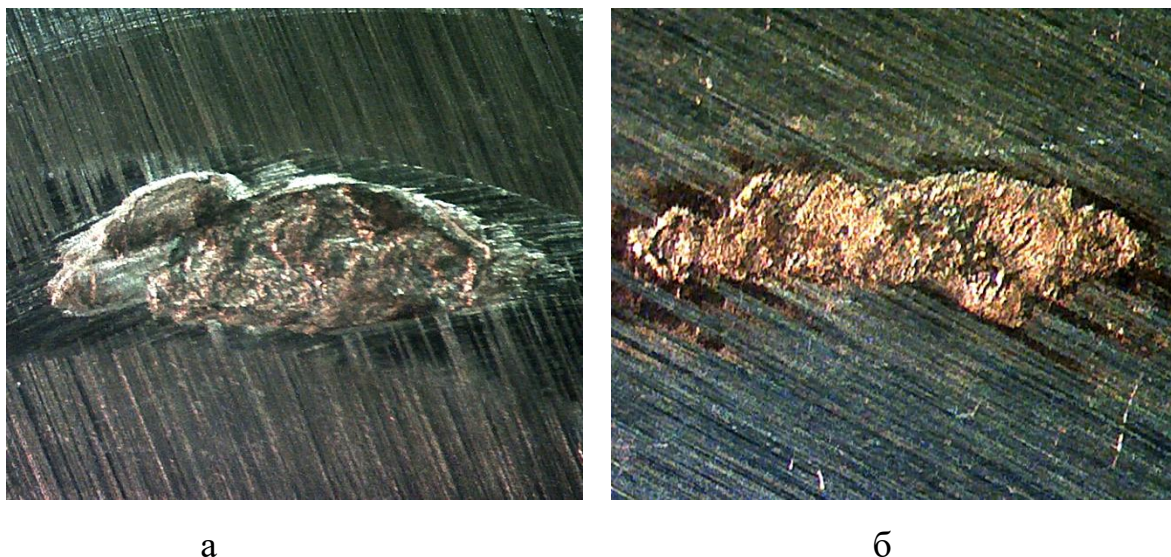


Рис. 3.9. Вириви гальванічного покриття хрому, внаслідок схоплення зі сталлю 95Х18Ш на титановому сплаві ВТ-22 (а) та сталі 95Х18Ш (б) при навантаженні в 30 МПа (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $P - 30$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

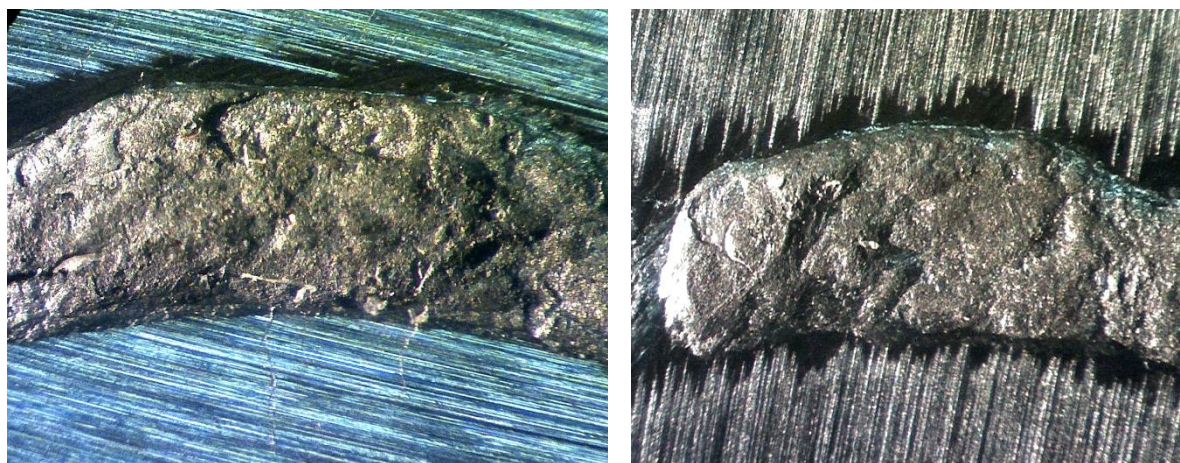


Рис. 3.10. Катастрофічне руйнування поверхні тертя гальванічного хрому на сплаві ВТ-22 при повному зношенні покриття (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $P - 30$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

При навантаженні в 30 МПа зносостійкість твердого вакуумно-дугового покриття хрому на сплаві ВТ-22 є більшою, ніж на сталі 95Х18Ш майже в два рази. Подібний ефект спостерігається і при випробуваннях інших видів вакуумно-дугових покриттів. Ймовірно, в процесі тертя покриття, що нанесені на більш м'яку титанову основу, здатні більше поглинути мікроудари, які виникають в процесі вібрації і демпфувати (розсіювати) їх в сплаві ВТ-22.

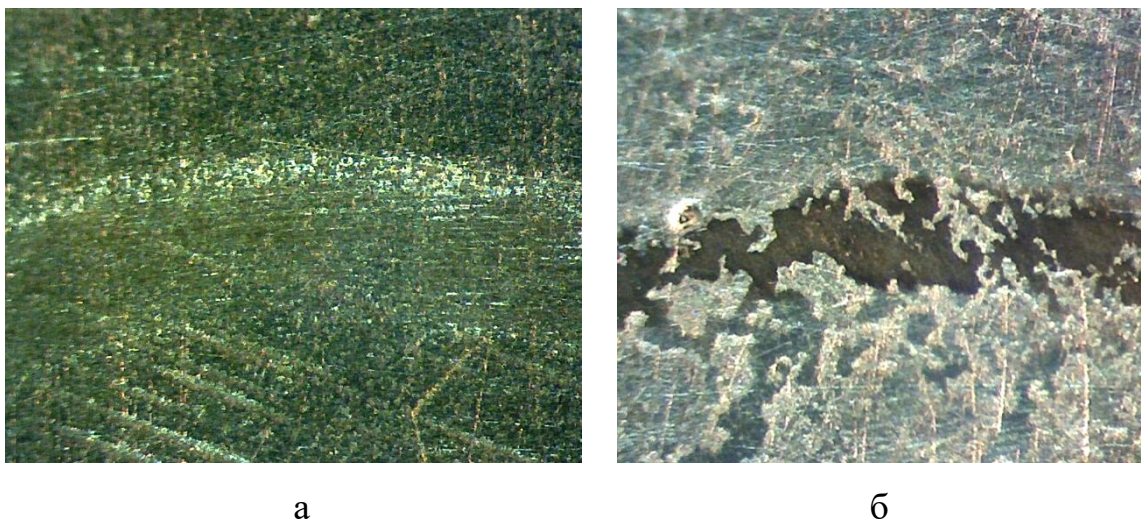


Рис. 3.11. Доріжки тертя твердого вакуумно-дугового хрому на сплаві ВТ-22 та сталі 95Х18Ш при навантаженні в 20 МПа (а) та 30 МПа (б) (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $P - 20$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

Суттєвим недоліком твердого вакуумно-дугового покриття хрому є висока твердість цього покриття. При випробуваннях в поодиноких місцях схоплювання відбувався вириг цього покриття та перенесення його на матеріал контрзразка, що свідчить про недостатньо високу міцність зчеплення твердого вакуумно-дугового покриття хрому з поверхнею основи. Така картина спостерігалася як при випробуваннях покриття з основою титанового сплаву, так і при випробуваннях на сталі 95Х18Ш (рис. 3.12). Також на поверхні тертя спостерігалася зношування покриття в деяких місцях внаслідок схоплювання з контрзразком.

Наступне досліджуване покриття це – м'яке вакуумно-дугове покриття хрому. Фретингостійкість цього покриття досить низька, якщо співставляти його з покриттями, які зазначені вище. Покриття хрому, нанесене на титановий сплав ВТ-22, майже в два рази більш зносостійке, ніж при нанесенні його на сталь 95Х18Ш. М'яке покриття хрому на сталі 95Х18Ш показало найгірші результати по зносостійкості, порівняно з іншими покриттями, як при навантаженні в 20 МПа, так і при навантаженні в 30 МПа. При навантаженні в 30 МПа м'яке вакуумно-дугове покриття хрому по зносостійкості навіть гірше за основний матеріал 95Х18Ш.

Поверхня тертя м'якого вакуумно-дугового покриття хрому, нанесеного на сплав ВТ-22, відрізняється від поверхні тертя, нанесеного на сталь 95Х18Ш. У

випадку, коли основою є титановий сплав, поверхня покриття є гладкою з невеликими виривами по поверхні тертя (рис. 3.13, а). У випадку, коли основою є сталь 95Х18Ш, вириви більш рівномірні, але їх значно більше (рис. 3.13. б).



а



б

Рис. 3.12. Сколи (а) та місця зносу (б) твердого вакуумно-дугового покриття хрому при терті в парі з 95Х18Ш при навантаженні в 30 МПа (х56). Умови навантаження ($A - 175$ мкм, $P - 30$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).



а



б

Рис. 3.13. Поверхня тертя м'якого вакуумно-дугового покриття хрому на сплаві ВТ-22 (а) та на сталі 95Х18Ш (б) при терті з 95Х18Ш (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $P - 30$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

Вакуумно-дугове покриття молібдену при випробуваннях показало одні із найкращих результатів по зносостійкості. Спостерігається подібна залежність, що і на інших покриттях – на сплаві ВТ-22 знос менший ніж на сталі 95Х18Ш. При

навантаженні 20 МПа зносостійкість молібденового покриття на сплаві ВТ-22 в 2,6 рази перевищує зносостійкість даного покриття на сталі 95Х18Ш (див. рис. 3.7). При збільшенні навантаження до 30 МПа знос покриття молібдену на сплаві ВТ-22 та сталі 95Х18Ш зростає в 5 та 2,25 разів. Однак, і при 30 МПа лінійний знос даного покриття на титановому сплаві менше в 1,2 рази, в порівнянні з даним покриттям на сталі 95Х18Ш.

Характер руйнування поверхні молібденового покриття схожий з характером руйнування м'якого вакуумно-дугового покриття хрому. При навантаженні в 20 МПа, характер руйнування поверхні – рівномірний. При збільшенні навантаження збільшуються і місця схоплювання покриття молібдену з матеріалом контрзразка. Суттєвих різниць руйнування поверхні покриття на титановому сплаві ВТ-22 і на сталі 95Х18Ш практично немає. Слід зазначити, якщо відбувається знос вакуумно-дугового покриття молібдену на основі титанового сплаву ВТ-22, то майже одразу, внаслідок високої схильності титанового сплаву до налипання і схоплювання, відбувається перенос матеріалу ВТ-22 на поверхню контрзразка, що тягне за собою швидке руйнування поверхні. Характерні місця руйнування поверхні вакуумно-дугового покриття молібдену на різних матеріалах основ, представлено на рис.3.14.

В роботі проведено випробування матеріалів, на які наносилися покриття – титановий сплав ВТ-22, сталь 95Х18Ш (див. рис. 3.7, 3.8). З графіків видно, що сталь 95Х18Ш в 10-15 разів більш зносостійка, ніж титановий сплав ВТ-22. Причому титановий сплав має високий лінійний знос як при навантаженні в 20 МПа, так і при навантаженні в 30 МПа. Майже в чотири рази сплав ВТ-22 перевищує знос найменш зносостійкого покриття – вакуумно-дугового покриття м'якого хрому.

Поверхня тертя титанового сплаву ВТ-22 має однаковий характер руйнування як при 20 МПа, так і при 30 МПа. Пошкодження поверхні рівномірне, з невеликими ямками в центрі доріжок тертя, які утворилися внаслідок неможливості видалення продуктів руйнування пари тертя в зв'язку зі специфікою вібрації (рис. 3.15, а). При збільшенні навантаження до 30 МПа характер

руйнування поверхні не змінився. Зміна відбулась лише у збільшенні глибини руйнування поверхні титанового сплаву.

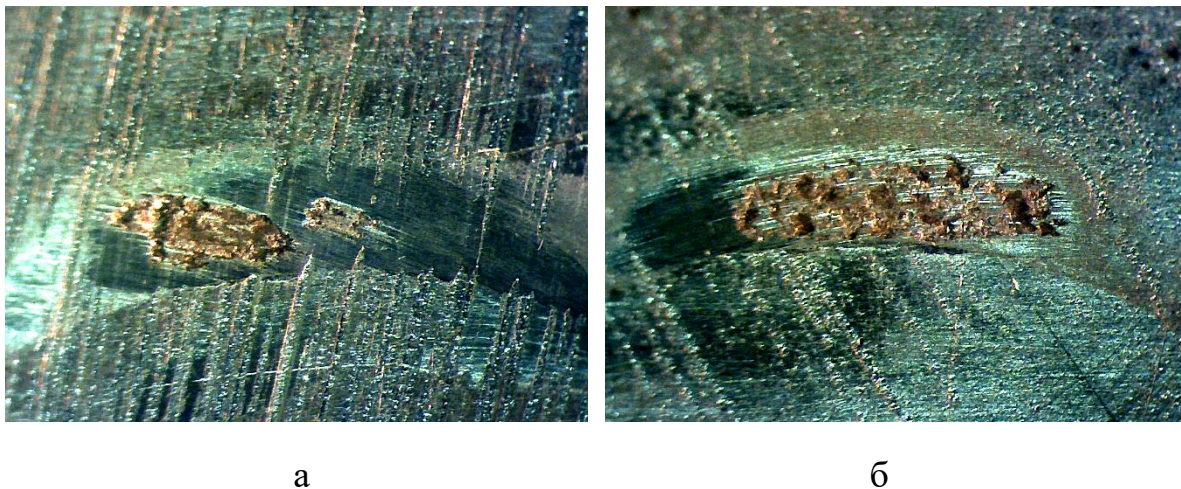


Рис. 3.14. Місця схоплення поверхонь тертя вакуумно-дугового покриття молибдену на сталі 95X18Ш (а) та сплаві ВТ-22 (б) при терті з 95X18 (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

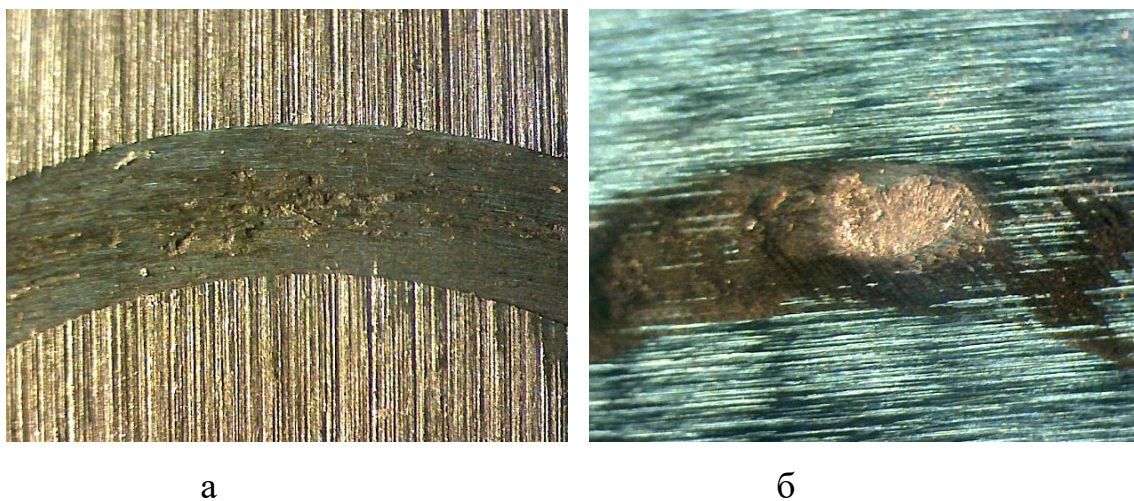


Рис. 3.15. Поверхня тертя титанового сплаву ВТ-22 (а) та сталі 95X18Ш (б) при терті з 95X18 при навантаженні в 30 МПа (х56). Умови випробувань ($A - 175$ мкм, $P - 30$ МПа, $\nu - 30$ Гц, $N - 5 \cdot 10^5$ циклів).

Зносостійкість сталі 95X18Ш при випробуваннях дуже висока. Даний показник перевищує зносостійкість всіх вакуумно-дугових покриттів на сталі при навантаженні в 30 МПа, а при 20 МПа - перевищує по зносостійкості лише вакуумно-дугове покриття м'якого хрому.

Такий ефект пояснюється тим, що при випробуваннях сталі 95X18Ш не відбувалося схоплення матеріалу з поверхнею контрзразка з аналогічного матеріалу. У випадку, коли випробовувалось покриття на сталі 95X18Ш, відбувалось схоплювання трибопари з подальшим варивом покриття з поверхні. Тобто, утворювались досить глибокі вириви, що і впливали на значення лінійного зносу вакуумно-дугових покриттів. Лише в деяких місцях на поверхні сталі 95X18Ш, при навантаженні в 30 МПа, утворювались місця схоплювання (рис. 3.15, б).

Аналізуючи зносостійкість покриттів молибдену, хрому і матеріалів основ - титану та сталі, слід враховувати і амплітудно-температурні залежності матеріалів при вібраціях. Проаналізуємо зносостійкість матеріалів молибдену як матеріалу з найвищою зносостійкістю за одержаними результатами та сталі 95X18Ш з позиції реології контактної взаємодії.

Враховуючи, що при збільшенні амплітуди знакозмінного ковзання в умовах вібрації підвищується амплітуда деформації та температура в поверхневих шарах, розглянемо амплітудні та температурні залежності внутрішнього тертя, які визначають механізми перетворення механічної енергії та релаксації напружень при динамічному навантаженні [118].

Контактна міцність металів при вібраціях визначається не тільки їх твердістю, як, наприклад, у покриттях хрому. Динамічний характер контактної взаємодії в умовах вібрації застосовує підвищені вимоги до матеріалів трибосистеми згідно такої вимоги, як здатність до релаксації локальних пікових напружень, що визначає здатність розвитку поверхневого руйнування [118, 142].

Процеси релаксації контактних напружень при вібраціях тісно пов'язані з механізмами внутрішнього тертя, які контролюють найбільш важливі теплові види дисипації (втрати) механічної енергії, які пов'язані з проявом неідеальної пружності та мікропластичності контактуючих матеріалів [118]. Тому важливим фактором зниження динамічної напруженості трибосистеми в умова вібрацій та реверсивного тертя є дія релаксаційних, гістерезисних та мікропластичних механізмів внутрішнього тертя, які визначають характер амплітудної залежності

внутрішнього тертя та формування температурних піків затухання [143]. При високому внутрішньому терті деформаційні процеси та тепловиділення локалізуються в більш тонких поверхневих шарах, що спричиняє позитивний градієнт механічних властивостей [144]. Такі умови перешкоджають пошкодженню глибинних шарів матеріалу.

При значних реверсивних рухах та навантаженнях (умови роботи шарнірних підшипників) релаксація напружень в матеріалах в першу чергу залежить від щільності та рухомості вільних дислокацій, які з'являються як в процесі обробки матеріалу, так і безпосередньо при терті. При реверсивному русі відбувається дислокаційна релаксація. Чим більше щільність незакріплених рухомих дислокацій, тим більше мікропластичність матеріалу, що проявляється у збільшенні амплітудної залежності внутрішнього тертя. Матеріал з високим амплітудо-залежним внутрішнім тертям здатен більш ефективно релаксувати локальні пікові динамічні напруження.

Співставлення амплітудних залежностей внутрішнього тертя молібдену, титану та ряду конструкційних сталей на основі заліза показані на рис. 3.16 [145]. Молібден, в порівнянні з іншими матеріалами, характеризується більш інтенсивним внутрішнім тертям із підвищенням амплітуди циклічних напружень. Це свідчить про формуванні в молібдені в процесі деформації більшої щільності легкорухомих дислокацій, що характеризує високій рівень внутрішнього тертя (механічних втрат) за рахунок дислокаційного затухання. Підвищення температури супроводжується додатковим збільшенням внутрішнього тертя, що можливо пов'язати зі зменшенням рівноважної концентрації домішкових атомів на лініях дислокацій в залежності з формулою Коттрелла [142]:

$$C = C_0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \quad (3.1)$$

де C_0 – середня концентрація атомів домішок;

Q – енергія взаємодії атомів домішок із дислокацією.

Із підвищенням температури тепловий рух призводить до відриву дислокацій від атомів, що блокують їх, чому сприяє понижена енергія зв'язку атомів домішок із дислокаціями. Вказані фактори повинні сприяти об'єднанню

дислокацій домішкованими атомами і росту їх рухомості. В той же час представлені нижче данні свідчать і про інші фактори, які впливають на зміну внутрішнього тертя матеріалів, що досліджуються, при збільшенні температури.

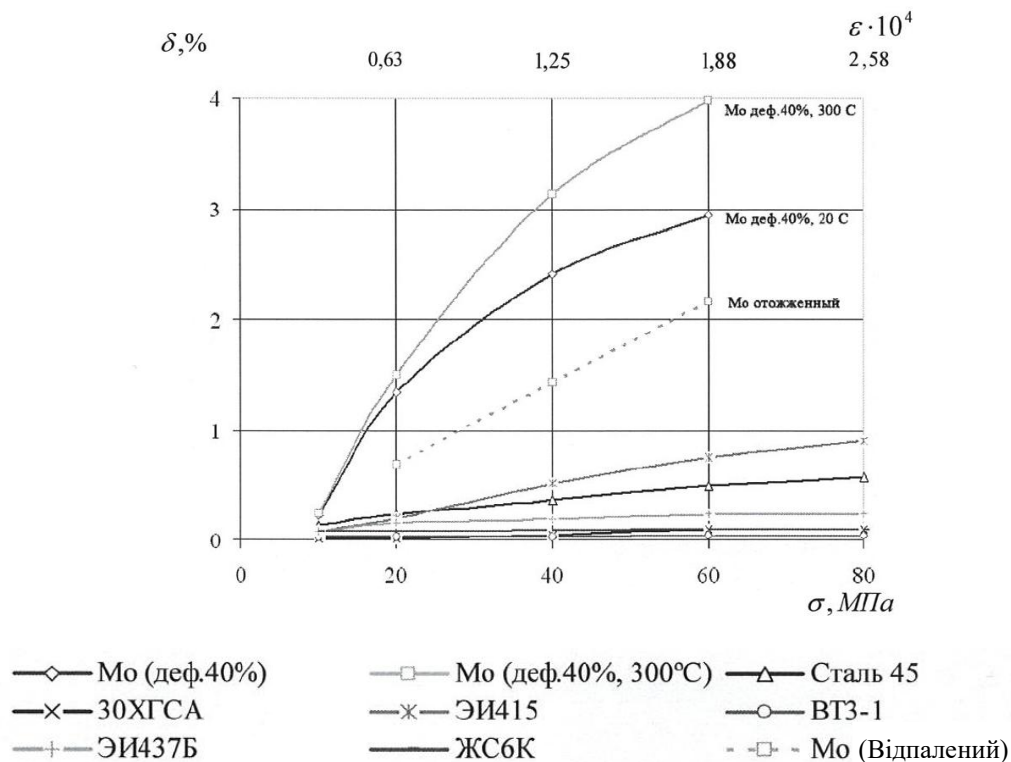


Рис. 3.16. Амплітудні залежності внутрішнього тертя деяких конструкційних матеріалів [145].

Загальна схема зміни внутрішнього тертя при деформуванні матеріалів представлено на рис. 3.17. Перша стадія відповідає ділянці, що є амплітодозалежною від внутрішнього тертя. При значеннях амплітуди циклічної деформації вище першої критичної ($\varepsilon'_{кр}$) внутрішнє тертя стає амплітодозалежним, що відповідає стадіям II та III (рис. 3.17, б). На ділянці $\varepsilon < \varepsilon'_{кр}$ прикладання знакозмінного напруження не змінює характеристик дислокаційної структури при внутрішньому терті, а петля механічного гістерезису (рис. 3.17 а, 2, 3) замкнена. Даний вигляд амплітодозалежного внутрішнього тертя прийнято називати внутрішнім тертям [142, 145, 146].

В межах амплітуд деформацій вище $\varepsilon'_{кр}$ ріст внутрішнього тертя пов'язаний з невідворотнім рухом дислокацій, що супроводжується зміною дислокаційної структури, ростом зміщення дислокацій за цикл дії напружень.

Оскільки при цьому в матеріалі реєструється залишкова мікродеформація (відкривається петля гістерезису 4, рис. 3.17, д), внутрішнє тертя в цій ділянці амплітуд називається мікропластичним внутрішнім тертям. При цьому підвищується і фон внутрішнього тертя (δ_0 , рис. 3.17, б).

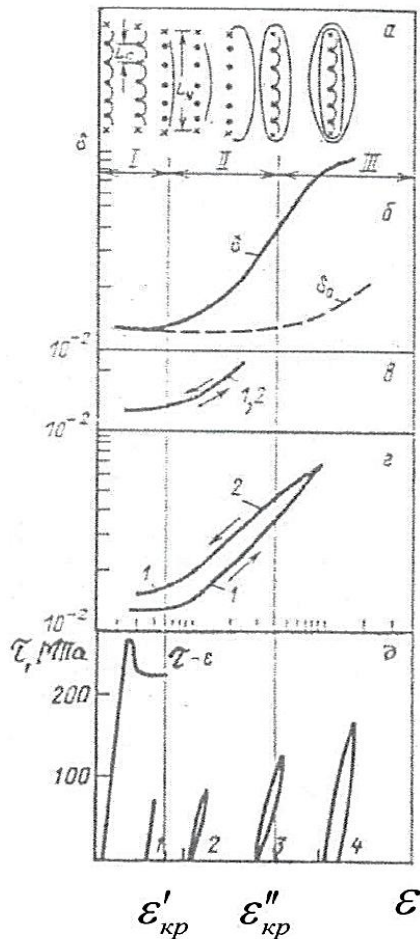


Рис. 3.17. Амплітудна залежність внутрішнього тертя: а – дислокаційна модель; б – зміна декременту δ та зони затухання δ_0 ; в, г – амплітудна залежність декременту при підвищенні амплітуди (1), після зняття навантаження (2) при $\varepsilon < \varepsilon''_{кр}$ (в) та $\varepsilon > \varepsilon''_{кр}$ (г); д – деформація $\varepsilon'_{кр}$ відповідає дійсній межі пружності та проявляє себе у створенні закритих петель гістерезису (2, 3), а при деформаціях $\varepsilon > \varepsilon''_{кр}$ створюються петлі гістерезису (4).

Розділення кривої амплітудозалежного внутрішнього тертя на гістерезисну та мікропластичну зону носить умовний характер (розмноження та незворотне зміщення дислокацій можливо і при амплітудах деформацій, менших за $\varepsilon''_{кр}$). Наявність меж зерен та різноманітність орієнтацій останніх зумовлює неоднорідність діючих локальних напружень, що в поєднанні з температурною активацією призводить до можливості одночасного прояву як механізмів гістерезисного, так і мікропластичного внутрішнього тертя. Високий рівень амплітудозалежного внутрішнього тертя зумовлює підвищену здатність матеріалу до релаксації напружень.

В роботах [145, 146] Гранато та Люке розглядали дислокації, як подібно струні, закріплені вузлами дислокаційної сітки (довжина відрізка L_N). Домішки та атоми розподіляються вздовж дислокацій і також створюють локальні закріплення (сегменти L_C), які мають меншу міцність, ніж закріплені на кінцях дислокаційного відрізка L_N (рис. 3.17, а). Робота закріплення має порядок енергії зв'язку дислокацій з атомами домішок. При малих змінних навантаженнях дислокаційні сегменти L_C , які розташовані між найближчими домішкованими атомами, створюють зворотні коливання, даючи вклад в фон внутрішнього тертя в зв'язку з подоланням сил Пайерлса в кристалічній решітці при зворотньо-поступальному русі (стадія I, рис. 3.17, а, б).

При підвищенні деформації до $\varepsilon'_{кр}$ відбувається відрив дислокацій від домішкових атомів та перехід до амплітудозалежної ділянки внутрішнього тертя внаслідок підвищення гістерезисних втрат (стадія II, рис. 3.17, а, б). Розсіювання енергії пов'язано з відставанням по фазі від прикладених напружень деформацій, що визвано переміщенням дислокаційних сегментів або дислокаційних відрізків. У міру збільшення амплітуди напружень кривизна відрізків дислокацій L_N підвищується і коли вона стане більшою кривизни напівкола, дислокації відриваються від вузлів сітки та переміщуються в матеріалі, спричиняючи мікропастичну деформацію (стадія III, рис. 3.17, а). Згасання такого виду зумовлено подальшим незворотнім переміщенням дислокацій та роботою джерел Франка-Ріда [144, 145]. Таким чином, амплітудозалежна ділянка внутрішнього тертя пов'язана зі відривом дислокацій від атомів домішок та колюванням дислокаційних сегментів в полі напружень.

З урахуванням вище зазначеного, припускаємо, що підвищену стійкість покриття молібдену до зношування можна пояснити тим, що при певних амплітудно-температурних режимах роботи пари тертя молібден частково зміцнюється за рахунок динамічного деформаційного старіння, зберігаючи при цьому достатньо високе внутрішнє тертя, що зумовлено наявністю значної щільності рухомих дислокацій, які неперервно генеруються в процесі дії контактних навантажень. Завдяки такому процесу знижується динамічна

напруженість зони тертя, зменшується небезпека виникнення крихких релаксаційних тріщин та ділянок схоплювання. В покритті молібдену формується оптимальне співвідношення високої щільності заблокованих малорухомих дислокацій та кількості рухомих точкових і лінійних дефектів кристалічної структури, що забезпечує підвищену контактну міцність, зносостійкість внаслідок достатньої динамічної релаксаційної здатності.

В роботі [147] підтверджено, що поява в твердому розчині на основі молібдену атомів впровадження (*C*, *N*, *O*) визиває появу на залежності внутрішнього тертя релаксаційного максимуму складної форми (рис. 3.19). Релаксаційні процеси, зумовлені міграцією атомів впровадження в поле діючих напружень, формують піки Сноєка. Крім того, ймовірні релаксаційні процеси, що зумовлені взаємодією атомів домішок (рис. 3.18). Суперпозиція цих релаксаційних явищ і обумовлює широкий максимум внутрішнього тертя в межах температур 60 – 400°C (при частоті коливання біля 1 Гц).

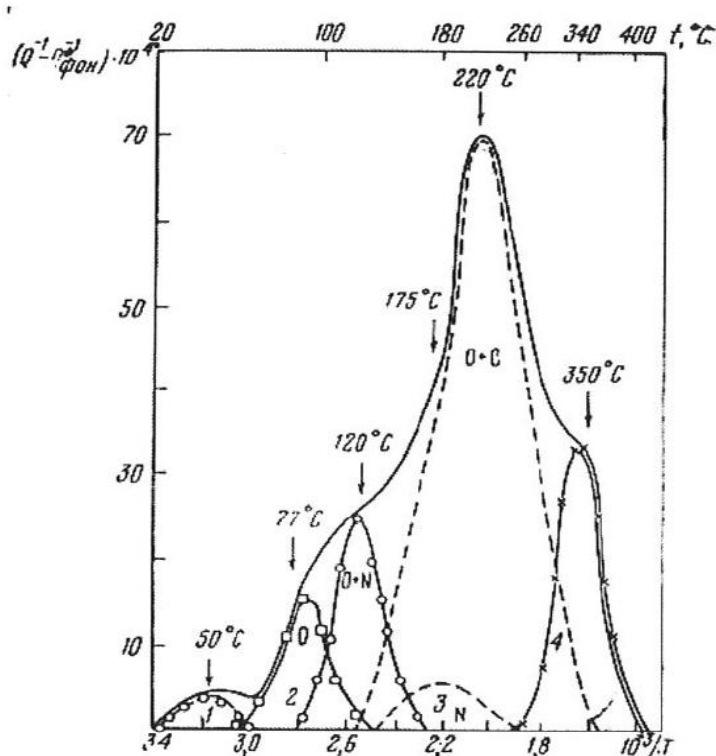


Рис. 3.18. Графічне розкладення піку внутрішнього тертя на зразках молібдену з підвищеним вмістом домішок впровадження при частоті в 2 Гц [147].

Таким чином, покриття молибдену, який є міцним тугоплавким матеріалом (висока енергія міжатомного зв'язку $E = 32 \cdot 10^4$ МПа), в процесі циклічних навантажень, проявляє високу мікропластичність, яка впливає на підвищений рівень амплітудозалежної ділянки внутрішнього тертя. Невисока енергія зв'язку атомів домішок з дислокаціями, низьке порогове напруження старту роботи дислокаційних джерел приводить до швидкого розмноженню легкорухомих дислокацій при дії циклічних навантажень. Механізми гістерезисного та мікропластичного внутрішнього тертя забезпечує дисипацію підведеної механічної енергії з переводом її в теплоту, одночасно є механізмом дислокаційної релаксації напружень, тобто фактором зниження динамічної напруженості поверхонь тертя. На фоні дії дифузійних механізмів релаксаційного внутрішнього тертя (піки Сноєка та Кестера) та можливого розвитку зміцнення внаслідок динамічного деформаційного старіння, молибден проявляє високу дислокаційну релаксаційну властивість в широкому діапазоні амплітуд ковзання при знакозмінному терті.

В матеріалі 95Х18Ш при відносно низьких амплітудах циклічного напруження та невисоких температурах формуються інтенсивні максимуми (рис. 3.19) на амплітудних та температурних залежностях внутрішнього тертя, які зумовлені магнітопружним гістерезисом. Однак, всі фактори, які сприяють зниженню рухомості меж магнітних доменів та знижують внутрішнє тертя, пов'язані із магнітопружним гістерезисом.

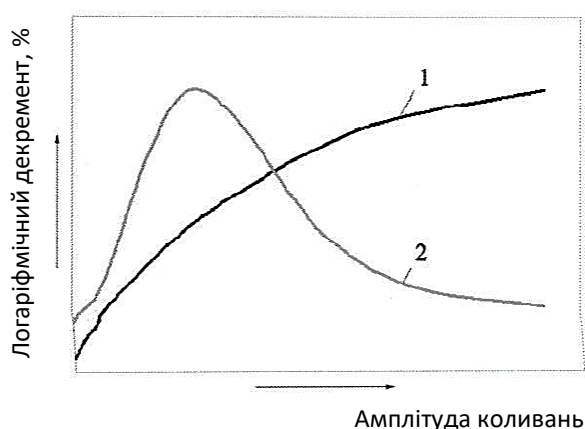


Рис. 3.19. Залежність демпфуючої здатності молибдену (1) та матеріалу 95Х18Ш (2) від амплітуди коливань.

При використанні покриття на внутрішній обоймі ШП ковзання в умовах динамічного навантаження та знакозмінного руху покриття молибдену зберігає

достатню релаксаційну здатність в широкому діапазоні навантажень. Сталь 95X18Ш в жорстких умовах роботи в значній мірі втрачає ефективність магнітопружного гістерезису, тому покриття молібдену при високій амплітуді знакозмінних навантажень веде себе більш ефективно, що може мати позитивний вплив при нанесенні на внутрішні обойми ШП.

Таким чином, для підвищення зносостійкості та довговічності конструкцій ШП та підвищення їх ефективності використання в авіаційній галузі, пропонується використовувати матеріал ВТ-22 в якості основи із нанесенням на поверхню покриттів молібдену. При використанні ШП у великій кількості (до тисячі штук) в ПС та наявність підшипників великих розмірів (20 – 35 мм) заміна сталевих обойм на міцний та легкий титановий сплав ВТ-22 дозволить зменшити вагу конструкції ПС та підвищити його ефективність, не втрачаючи надійності шарнірних вузлів.

Висновки до розділу 3.

1. 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 підвищують зносостійкість та довговічності шарнірних підшипників а авіаційній галузі.

2. Визначено, що при контактному навантаженні 5 МПа при вібраційних випробуваннях із малою частотою визначальну роль у зношуванні композиційних матеріалів відіграють армуючі компоненти. Найбільший лінійний знос металополімерної стрічки обумовлений відсутністю в верхньому полімерному композиційному шарі армуючих волокон, а лише є дрібнодисперсні наповнювачі С та MoS_2 . Полімерні композиційні матеріали Fluroglide, Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 проявляють високу зносостійкість за рахунок наявності в їх структурі каркасу армованих волокон.

3. Встановлено, що армуючі компоненти та наповнювачі в композиційних матеріалах відіграють першочергове значення в забезпеченні

зносостійкості полімерних композиційних матеріалів при підвищенні 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. Армовані волокна матеріалу Iglidur TX1 та нановуглеволоконна матеріалу Zedex ZX-324VMT забезпечують високі показники межі міцності та модуля пружності полімерних композиційних матеріалів, при терті відбувається рівномірний розподіл контактних напружень в локальних зонах армування.

4. Визначено, що в діапазоні навантаження 5-12 МПа в умовах вібрацій металополімерна стрічка (PTFE+15% C+5% MoS₂ – 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, що знаходиться в межах допустимого зносу в осьовому зазорі шарнірних підшипників (до 300 мкм).

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. Встановлено, 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.

7. Визначено, 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.

8. 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.

9. 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.

10. Для підвищення довговічності конструкцій шарнірних підшипників 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 шарнірних підшипників у великій кількості (до тисячі штук) в повітряних суднах та наявність підшипників великих розмірів (20 – 35 мм) заміна сталевих внутрішніх обойм на поверхнево зміцнений покриттям легкий титановий сплав ВТ-22 дозволить зменшити вагу конструкції літального апарату та підвищити його ефективність, не втрачаючи надійності шарнірних вузлів.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ

4.1. Вплив теплофізичних властивостей на зносостійкість композиційних матеріалів.

На трибологічні та інші властивості полімерних КМ в більшій чи меншій мірі впливає температура. Найбільше це стосується модуля Юнга, який є одним із основних важливих факторів полімерних КМ, оскільки характеризує їх жорсткість. Його помітне зниження під впливом температури може виявляти достатньо значний вплив на контактні та триботехнічні характеристики [77].

Тому дослідженню впливу температури на жорсткість КМ присвячено багато праць [73-75, 77, 114, 115].

В роботі [77] автори досліджували вплив температури на модуль Юнга завдяки розробленому аналітичному методу розрахункової оцінки характеристик контактної міцності та фрикційної стійкості при терті ковзання. Було встановлено, що при підвищенні температури в полімерних підшипників ковзання від 20 до 60 °С спостерігається лінійне зниження модулів пружності поліамідів. Зниження модулів Юнга випробовуваних матеріалів становило в 1,2-1,35 разів, в залежності від типу матеріалу. Також було встановлено, що із зростанням температури в контакт, яка спричиняє зменшення величини модуля Юнга поліамідних КМ РА6+30CF та РА6+30GF, відбувається зниження рівня початкових максимальних контактних тисків, та підвищується несуча здатність полімерних підшипників ковзання до 10 % [78].

Аналізуючи вплив температури на полімерні КМ, можна зробити висновок, що всі КМ, в склад яких входять полімерні матеріали, змінили результат зношування в більшому чи меншому ступені. Це пояснюється тим, що будь-який полімер змінює свої характеристики міцності при підвищенні температури і, як наслідок, ці зміни впливають на результат тертя.

На рис. 4.1 представлено лінійний знос металополімерних та полімерних КМ при температурах 20 та 60 °С. Випробування проводили за методикою описаною, в розділі 2.2.

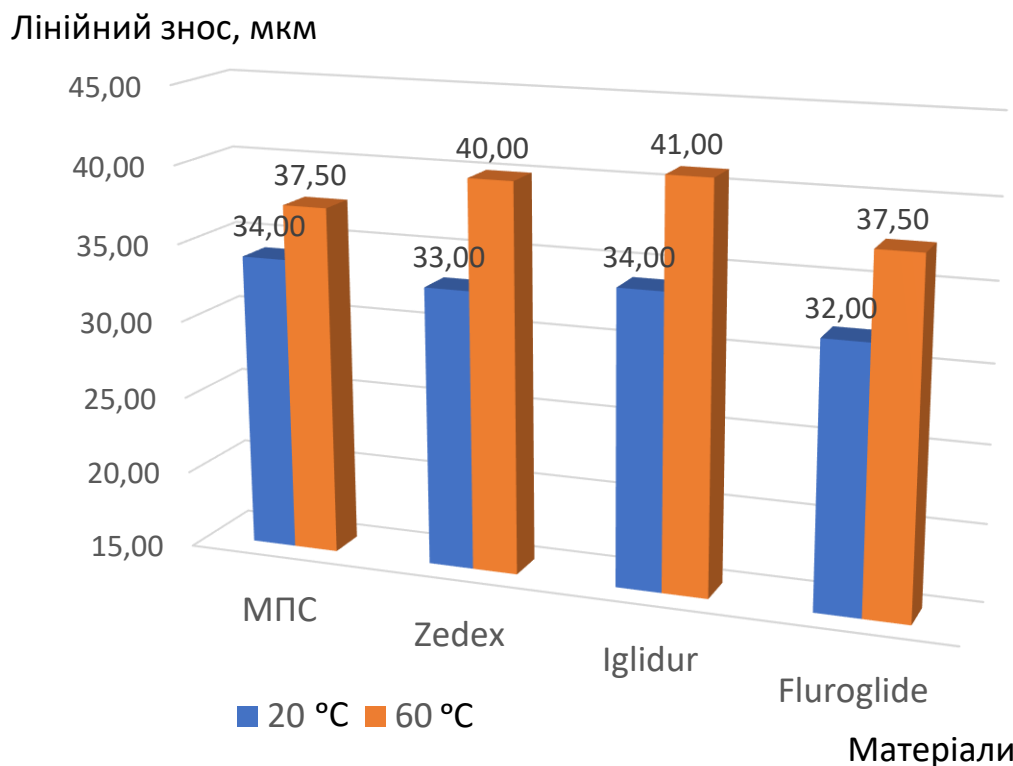


Рис. 4.1. Вплив температури на зносостійкість антифрикційних композиційних матеріалів. Умови випробувань (A-500 мкм, ν – 3 Гц, P – 10 МПа, N – 10^5 циклів).

Збільшення температури від 20 до 60 °С підвищує знос досліджуваних КМ від 9 до 17 %. Оскільки підібрані для випробувань антифрикційні КМ є складною будовою, в структурі якої може міститися більш 5 компонентів із різною структурою та характеристиками, необхідно більш детально проаналізувати їх склад. Робочий діапазон температур у майже всіх матеріалів коливається в межах від -50 до +120 °С, а у полімерного КМ Zedex ZX-324VMT – до 250 °С.

Для МПС встановлено найменше збільшення лінійного зносу (до 9 %) при підвищенні температури з 20 до 60 °С, в порівнянні з іншими досліджуваними полімерними КМ. Підвищення зносостійкості МПС обумовлено її структурними особливостями: поєднання верхнього шару PTFE з наповнювачами та розташованим нижче шаром бабіту Б-83. Додавання наповнювачів в концентрації

15 % C та 5 % MoS₂ не тільки підвищує антифрикційні та протизношувальні властивості полімеру PTFE, а і збільшує його теплопровідність з 0,24 Вт/(м·К) (PTFE) до 0,8 Вт/(м·К) (PTFE з наповнювачами). В процесі тертя, при деформації зростає роль поверхневих явищ на межі розподілу фаз PTFE з наповнювачами – бабіт, інтенсифікуються енергообмінні процеси, підвищується теплопровідність в шарі бабіту ($\lambda = 65$ Вт/(м·К)). Зазначимо, що зменшенню теплонавантаженості контакту сприяє також висока теплоємність бабіту ($C_p = 226$ Дж/(кг·К), на відміну від C_p PTFE, яка становить 1,05 Дж/(кг·К). Тобто, відбувається ефективно відведення температури з зони контакту, що знижує деструктивні процеси в верхньому полімерному КМ.

На матеріал Fluroglide температура впливає в більшому ступені, ніж на МПС, лінійний знос із збільшенням температури підвищується на 14 %. Цей матеріал створений на основі армованих тканин із полімерними матеріалами PTFE з теплопровідністю 0,24 Вт/(м·К) і температурний вплив збільшує деструкцію матеріалу під дією навантаження в період припрацювання. Однак, каркас КМ з армованих тканинних матеріалів ефективно локалізує напруження, що виникають в умовах вібрацій.

Матеріали Zedex та Iglidur показали найбільший приріст показника зносу з підвищенням температури, що становить 17 %. За структурою ці матеріали дуже схожі, а різниця лише в матеріалах та їх кількості (рис. 4.2).

Зазначені матеріали мають сполучник, теплопровідність якого становить 0,24 Вт/(м·К): для полімерного КМ Zedex ZX-324VMT це полієфірефіркетон, для полімерного КМ Iglidur TX1 не зазначено виробником. Наповнювачі, що входять до цієї групи полімерних КМ не впливають на їх теплопровідність. Аналогічно і з армуючими вуглецевими волокнами, теплопровідність яких становить 0,4 Вт/(м·К). Отже, механізми зношування з підвищенням температури для розглянутих полімерних КМ будуть аналогічні, що і для полімерних КМ Fluroglide: збільшення деструкційних процесів в період припрацювання внаслідок термо-механічного впливу, формування оптимальної топографії поверхні, зниження

локальних пікових напружень та оптимальний їх розподіл переважно в армованій складові полімерного КМ.

При терті тепло, яке генерується в зоні контакту, розсіюється в довкілля і температура трибосистеми завжди знаходиться в динамічній рівновазі при постійних режимах роботи та коливається від точки рівноваги в залежності від умов роботи ШП. Особливістю трибопар метал-полімерний КМ в ШП ковзання є велика площа фактичного контакту та низька теплопровідність, яка значно менша, ніж у контакті метал-метал. Як наслідок, відбувається більш інтенсивне тепловиділення, що спричинено дією високих навантажень (статичних, динамічних) роботи підшипників та меншому відводу тепла із зони контакту складових полімерних КМ.

Для ШП ковзання із металополімерними та полімерними КМ одним із найважливіших критеріїв визначення меж застосування покриттів є величина напружень, що руйнує металополімерне та полімерне композиційне покриття. За даними робіт [147, 148] вона пов'язана із температурою лінійною залежністю. Крім того, автори робіт визначили, що із підвищенням температури руйнуючі напруження стискання зменшуються і їх величина залежить від температури більш інтенсивніше, ніж деформація полімерного композиційного покриття.



Рис. 4.2. Фотографія поверхні (а) та структура (б) матеріалів Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1.

В трибопарах ШП з КМ це пояснюється складною конструкцією КМ (PTFE та вуглецеві армовані волокна із додаванням твердих мастильних матеріалів в матриці із іншого полімеру або бабіту). При навантаженні в умовах нормальної

температури покриття деформується, як в'язко-пружний матеріал, оскільки полімерна матриця та вуглецеві волокна забезпечують механічну стійкість КМ. В цьому випадку міцність покриття є відносно високою. Зі зростанням температури досить різко знижуються параметри жорсткості та міцності полімерної аморфної матриці (настає її розм'якшення), у той час як орієнтовані і набагато термічно витривалі вуглецеві волокна практично не змінюють своїх властивостей. При цьому PTFE із функціональними добавками видавлюється між волокон і деформація руйнування полімерного композиційного покриття визначається переважно жорсткістю його армуючого каркаса, ніж матриці.

В роботах [83, 91] визначено, що при експлуатації полімерних композиційних пар тертя полімери можуть знаходитись в умовно крихкому та вимушеному високоеластичному стані. Перехід від одного стану в інший зумовлений комплексними діями температури та навантаження. Також зазначається, що працездатність матеріалу характеризується не когезійними властивостями КМ, а і адгезійними властивостями на межі покриття-основа. Таким чином, межу ймовірного практичного використання металополімерних та полімерних КМ, що досліджувались, окрім межі міцності, в значній мірі визначає і межа вимушеної високоеластичності. Аналіз графіка 4.3 показує, що криві питомої роботи деформування при всіх температурах в залежності від напруження можна розділити на дві ділянки [83, 148].

Перша ділянка кривої (<100 МПа), що відповідає умовно крихкому стану полімерного матеріалу, характеризується невеликими деформаціями і практично рівномірним приростом питомої роботи деформування. Друга ділянка (>100 МПа) характеризується більшим приростом роботи деформування, що відповідає високоеластичному стану матриці. Таким чином, криві на рис. 4.3 дають інформацію про межу існування високоеластичного стану полімерних КМ та про температуру, при якій відбуваються кінетичний перехід в цей стан. Перехід в новий агрегатний стан принципово змінює характер процесів тертя та зношування, як правило погіршує зносостійкість трибопари.

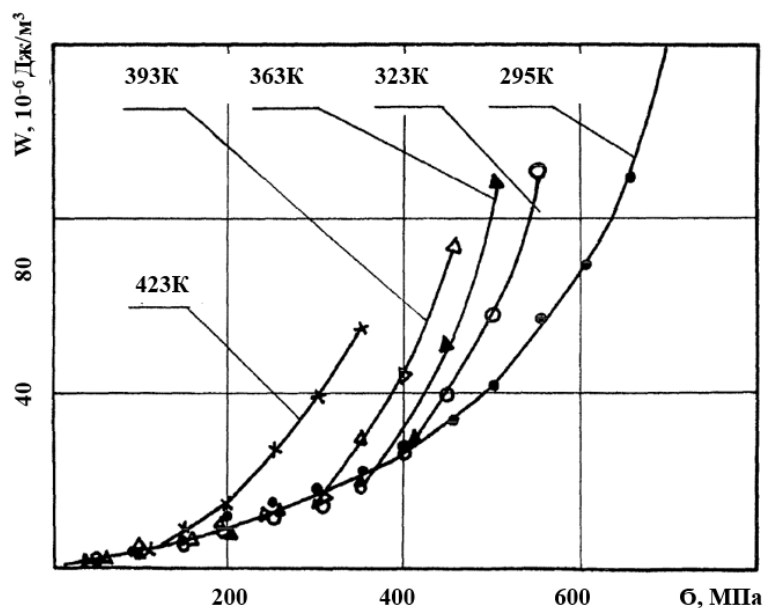


Рис. 4.3. Вплив напружень і температур на питому роботу деформування при стисканні полімерних матеріалів [148].

Іншим важливим наслідком низьких теплофізичних властивостей полімерних КМ є можливість виникнення в матеріалі значних градієнтів температур. Небезпека нерівномірного нагріву полягає у різному термічному розширенні як всього матеріалу, так і окремих компонентів, які входять в склад матеріалу. Чим менше сумарна відмінність у властивостях компонентів полімерних композиційних матеріалів, тим менші подібні складові чутливі до теплової дії, включаючи імпульсне чи динамічне навантаження. Слід зазначити, що не дивлячись на різницю у властивостях, руйнування конструкції полімерних матеріалів настане лише при досягненні найменш міцним компонентом деформацій, які перевищують гранично допустимі.

В роботах [149, 150] автори встановили, що якщо полімерний матеріал зберігає свій твердий агрегатний стан без переходу у межу вимушеної високоеластичності, то підвищення температури в значному ступені впливає на коефіцієнт тертя. Генерація та накопичення тепла є наслідком погіршення процесів тертя при знакозмінному динамічному навантаженні.

На рис. 4.4 представлено вплив навантажень, швидкості ковзання та коефіцієнту динамічності (при знакозмінних навантаженнях) на підвищення

температури в полімерному композиційному покритті [150]. де коефіцієнт динамічності показує приріст навантаження від амплітуди коливань:

$$Kd = \frac{\sigma_o + \sigma_a}{\sigma_o}$$

де σ_o – середнє значення напружень в циклі коливань;

σ_a – амплітудне значення напружень.

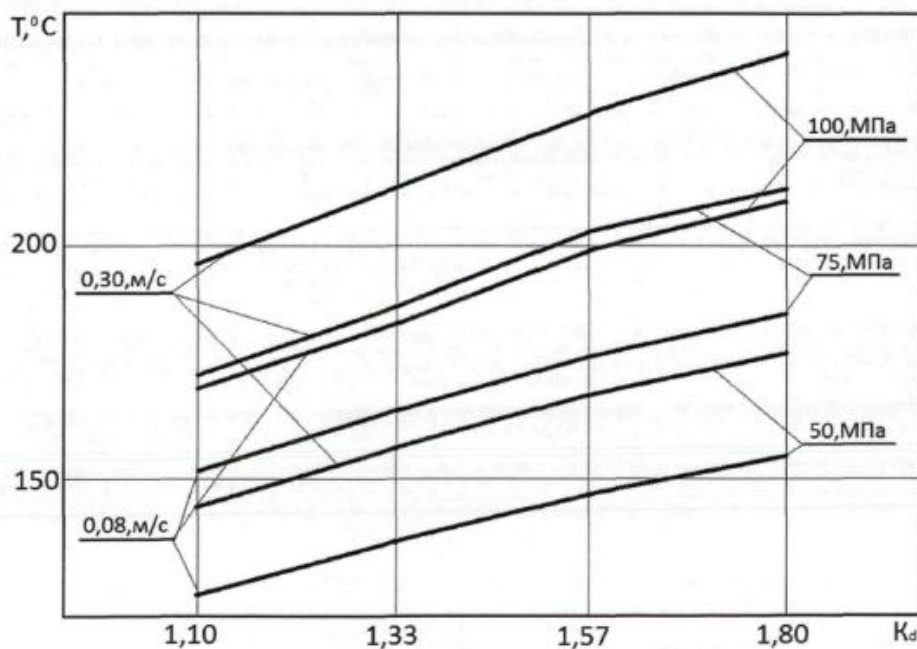


Рис. 4.4. Вплив параметрів навантаження, швидкості ковзання та коефіцієнта динамічності на температуру полімерного композиційного покриття [150].

Аналіз кривих дозволяє зробити висновки, що найбільший вплив на нагрів полімерних КМ спричиняють контактні напруження, потім коефіцієнт динамічності, потім швидкість ковзання. Причому проявляється майже лінійний вплив коефіцієнта динамічності на температуру покриттів. Слід зазначити, що покриття досліджувались при високих контактних навантаженнях та відносно низьких швидкостях ковзання, які відповідали реальним умовам роботи ШП ковзання із полімерними КМ.

Таким чином, високі критичні навантаження, як статичні, так і динамічні, значно знижують зносостійкість полімерних КМ. Найбільший вплив на величину інтенсивності зношування має генерація тепла, викликана як процесом тертя, так і

динамічним навантаженням в результаті реверсивного руху. Слід зазначити, що збільшення статичного навантаження при терті навіть до 200 МПа [83] не викликає такого нагріву, як від динамічного навантаження. Наслідком цього є можливий перехід полімерного КМ в стан вимушеної високоеластичності, і, як наслідок, руйнування матеріалу.

4.2. Моделювання напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними матеріалами

Процес тертя та зношування трибосистем з КМ можна розглядати, як процес послідовної зміни структури та властивостей матеріалів у зоні контакту при зовнішньому енергетичному впливі. Зовнішній вплив складають сили та енергія (механічна, електрична, теплова). Для деяких трибосистем спектр зовнішніх впливів можна описати з досить великою точністю. Але для більшості трибосистем це практично неможливо, тому що сили змінюються у кожній точці системи та в часі [57, 116]. Трибопара (трибологічна система) повинна мати певну структуру і сукупність взаємопов'язаних елементів, що визначають її склад. Дані елементи знаходяться в деякому взаємному співвідношенні, що визначає їх належність до трибосистеми та структуру. Тертя включає комплекс фізико-хімічних процесів і визначається великою кількістю параметрів, тому для спрощення та впорядкування їх опису доцільно застосування системного аналізу [93, 99, 100, 151].

Структурна схема трибологічної системи, що відповідає системному підходу в трибології, представлена на рис. 4.5. Дана структурна схема включає елементи, що знаходяться у відносному русі та взаємні зв'язки між елементами системи. Вхідною характеристикою трибологічної системи є робота, що визначається параметрами механічного впливу на матеріал в зоні контакту. Вихідною характеристикою системи є корисна робота, що реалізується в передачі зусилля ШП та поворотом його на певний кут. Вихідними характеристиками трибосистеми є також результати процесів тертя і зношування, що призводять зрештою до руйнування трибосистеми (відділення частинок зносу, незворотній зміні форми контактуючих елементів, тепловиділення, шум, накопичення дефектів

структури матеріалу та ін.). На трибосистему діють додаткові фактори, наприклад: підвищена температура, вібрація, забруднення, корозія, порушення кінематики руху (наприклад, радіальне биття обертових деталей машин) та ін. Властивості трибосистем визначаються їх складом та структурою і характеризуються зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, теплостійкістю, сумісністю матеріалів трибологічної системи.

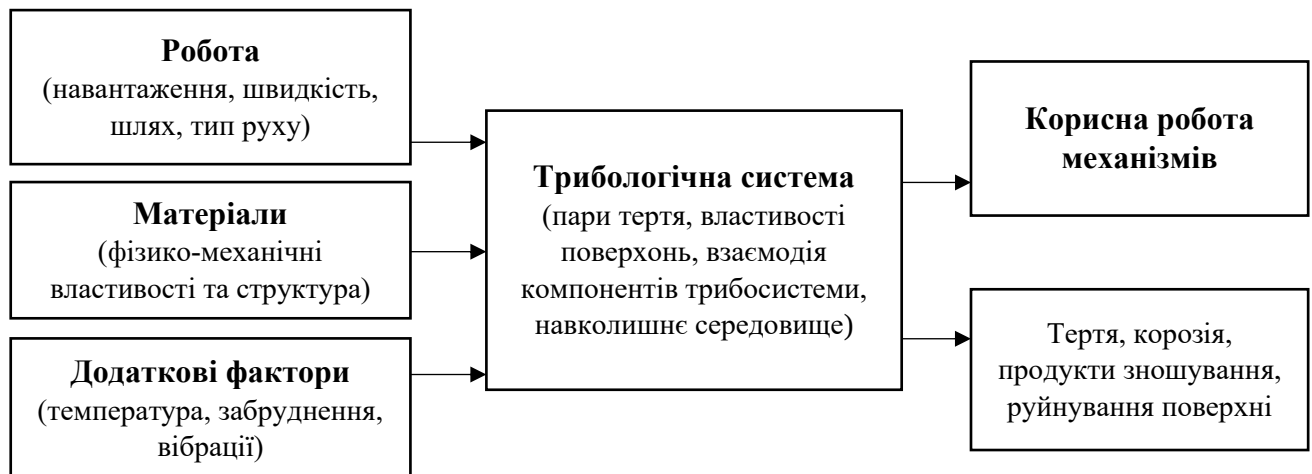


Рис. 4.5. Структурна схема трибологічної системи, що відповідає системному підходу в трибології.

Аналіз трибологічної системи дозволяє визначити внутрішні зв'язки, вхідні та вихідні параметри при реалізації мети її функціонування, якою може бути перетворення руху, енергії, інформації та маси. При цьому система характеризується як відкрита, динамічна, гранично керована система [116]. Трибосистеми, як правило, багатофазні (властивості матеріалів відрізняються) та гетерогенні (властивості неоднорідні). Трибологічні системи можуть бути відкритими або замкнутими. Відкриті системи можуть обмінюватися енергією, речовиною та інформацією з навколишнім середовищем, замкнуті системи - тільки енергією. Існують також ізольовані термодинамічні системи, які не обмінюються з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною. У трибологічних системах реалізуються різні процеси тертя і зношування, характер та інтенсивність яких визначаються функціональними характеристиками матеріалів. У загальному випадку функціональні характеристики описують перетворення вхідних параметрів X у вихідні Y при взаємодії елементів трибологічної системи (рис. 4.6.).

Вхід у трибологічну систему рівнозначний впливу навколишнього середовища на систему, включаючи сукупність механічних та електричних сил, хімічних реакцій та теплового впливу. Зовнішні впливи мають основний вплив на трибологічні процеси і мають енергетичний характер. Механічні впливи безпосередньо впливають на деталі пари тертя і через них на мастильні матеріали (за наявності). Теплові впливи можуть викликати зміни властивостей матеріалів деталей та термохімічні зміни в мастильних матеріалах (за наявності).

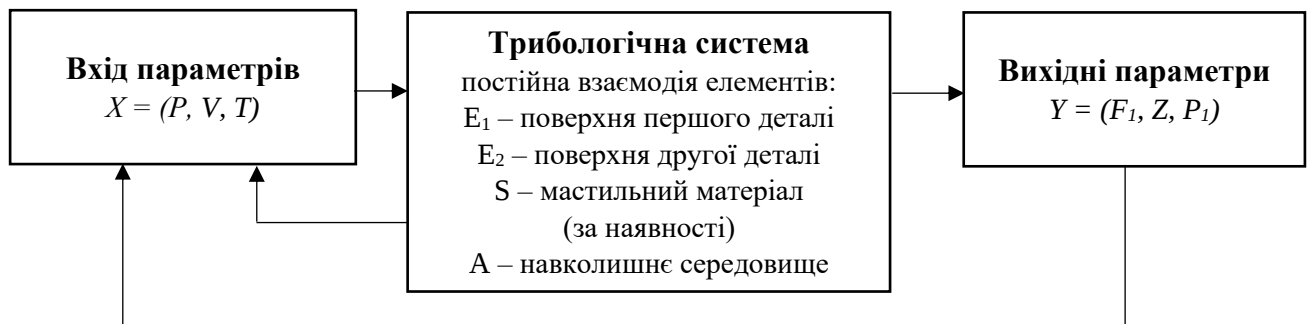


Рис. 4.6. Схема функціонування трибологічної системи

Вихід у трибологічну систему можна розглядати як реакцію системи на зовнішній вплив і як результат трибологічних процесів: опір тертю F_1 , знос Z , супутні процеси P_1 , наприклад, підвищення температури поверхні тертя, трибоелектричні, трибохімічні, термомеханічні та ін. процеси. При енергетичному впливі у зоні тертя у системі відбувається робота тертя і формується фактична поверхня контакту. В результаті взаємодії відбувається дисипація (розсіювання) енергії, яка включає процеси [91, 100, 151]:

1. Накопичення енергії: утворення локальних дефектів та дислокацій, накопичення енергії в деформованому об'ємі матеріалу.
2. Випромінювання акустичних хвиль, світла, електронів (ефект Крамера).
3. Перетворення накопичуваної енергії в теплоту, збільшення виробництва ентропії та розсіювання.

При переході трибологічної системи із статичного стану в динамічний виникають і розвиваються процеси, які впливають на структуру системи. У результаті дії динамічного стану відбуваються зміни властивостей матеріалів

деталей і мастильного матеріалу (за наявності) та їх взаємодії: $Y = (F_1, Z, P_1)$. Між виходом і входом існує зворотний зв'язок, дія якого проявляється у зміні швидкості механо-фізико-хімічних процесів при зміні сили.

Трибологічна система може змінювати свої функціональні характеристики у процесі роботи, при чому змінюється і її стан. Період припрацювання деталей трибологічної системи (перший стан системи) - це нестаціонарний стан. У цей період система автоматично пристосовується до оптимальних умов взаємодії деталей (E_1 та E_2) і його можна назвати періодом саморегулювання (припрацювання). Властивості деталей і взаємодія між ними змінюються таким чином, що при незмінному зовнішньому енергетичному впливові зменшується інтенсивність зношування. У цей період відбуваються формування оптимальної мікрогеометрії сполучених поверхонь і сприятливі зміни структури та властивостей матеріалу деталей, які називаються трибологічними пристосуваннями.

По завершенні періоду припрацювання і пристосування настає період стаціонарного стану з постійною інтенсивністю зношування (другий стан системи). Цей період є основним для трибологічної системи і має найбільшу тривалість, у порівнянні з іншими періодами роботи системи. Чим довше триває стаціонарний стан, тим триваліший період нормальної експлуатації трибосистеми.

При накопиченні дефектів та деградації елементів трибологічної системи, вона переходить у стан, що характеризується високою і зростаючою інтенсивністю зношування (третій стан системи), що може набувати лавинного характеру. Зношування з високою інтенсивністю відбувається внаслідок змін властивостей матеріалів і деталей, що знаходяться у фрикційній взаємодії, змін мастильних матеріалів (старіння), розвитком несприятливих побічних (динамічних) процесів та ін. Надійність і довговічність трибосистем значною мірою залежать від властивостей матеріалів і правильності їх вибору для заданих умов роботи вузла тертя. При виборі матеріалів для трибосистеми необхідно враховувати їх сумісність.

Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) металополімерних та полімерних КМ в ШП застосовувався модуль Simulation, що входить в програмний комплекс SOLIDWORKS. Програма SOLIDWORKS Simulation Premium дозволяє ефективно аналізувати нелінійні та динамічні реакції, динамічні навантаження та КМ у вузлах тертя (ШП), а також включає три додаткові типи досліджень: нелінійне статичне, нелінійне динамічне і лінійне динамічне.

Для моделювання процесів НДС КМ в ШП була розроблена модель підшипника (рис. 4.7) із двома шарами матеріалів між металевими обоймами підшипника. Розкладка основних елементів моделі ШП для моделювань представлена на рисунку 4.8.

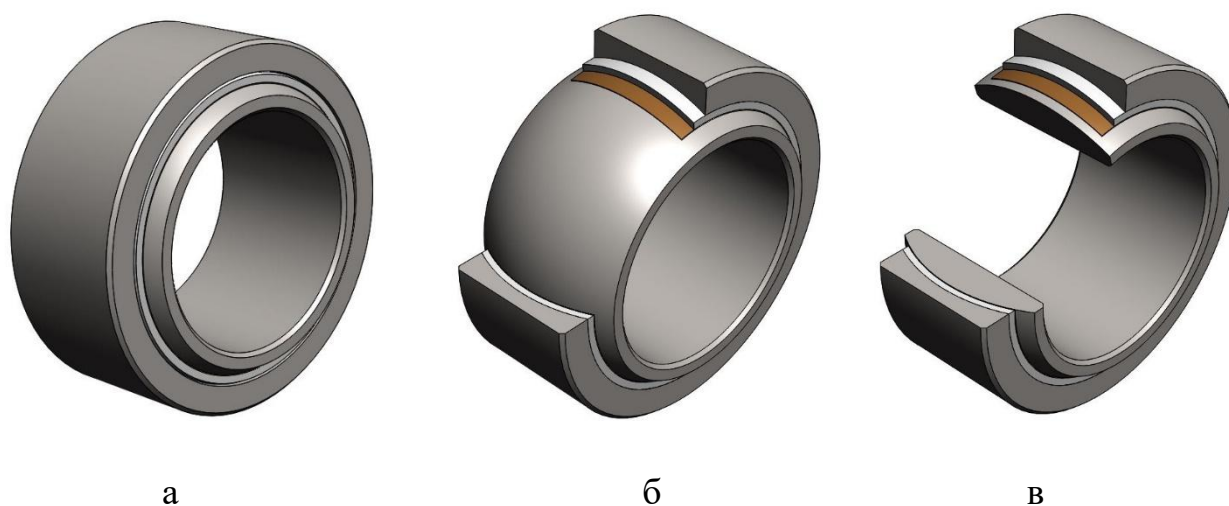


Рис. 4.7. Розрахункова модель шарнірного підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами: а – підшипник в зборі, б – підшипник із перетином зовнішньої обойми та композиційних матеріалів, в – перетин моделі підшипника.

Для спрощення розрахунків та процесів моделювання було визначено, що сумарна товщина антифрикційного КМ складає 1 мм, що відповідає реальному підшипнику GE30EW-2RS або ШН30ЮТ, та складається з двох основних шарів матеріалу. Перший шар матеріалу, який розташований ближче до внутрішньої обойми має товщину в 100 мкм, виконано із матеріалу PTFE та залишається однаковим у всіх варіантах дослідження. Це так званий шар припрацювання, який допомагає у процесах припрацювання КМ та в майбутньому допомагає зменшити

коефіцієнт тертя та момент зміщення підшипника. Другий шар КМ має товщину в 0,9 мм та є основним матеріалом, який працює на тертя під час роботи ШП.

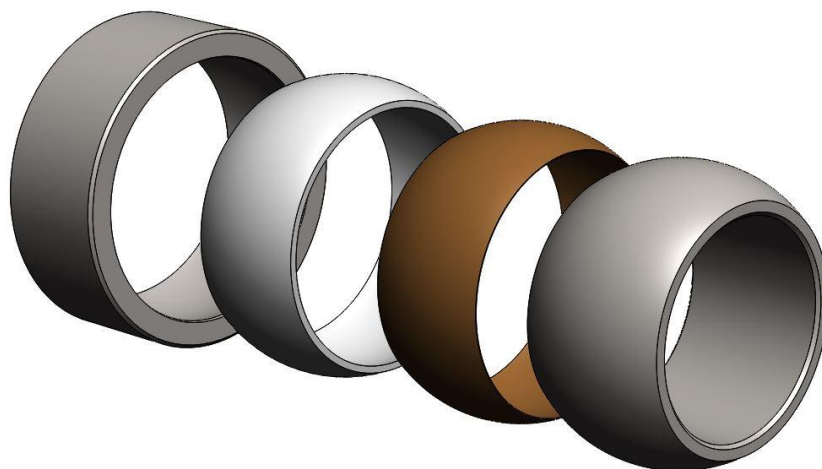


Рис. 4.8. Розкладка основних елементів шарнірного підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами при моделюванні.

4.3. Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану елементів шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами

Для повноти моделювань ШП необхідно визначити окрім комбінацій полімерних КМ ще і варіанти із зміною матеріалів обойм ШП. Тому було визначено для моделювання два комплекти ШП із матеріалами обойм сталі 95Х18Ш та титанового сплаву ВТ-22. Також всі матеріали та комбінації ШП мають бути співставленні із оригінальними ШП на МПС.

На рис. 4.9 представлено шари матеріалів для моделювання процесів в ШП, а в таблиці 4.1 представлено варіанти матеріалів, які ми використовували для моделювання процесів НДС антифрикційних КМ.

Зразок № 1 відповідає реальним ШП які використовують в якості антифрикційного матеріалу МПС та випускаються масово для ПС.

Зразки № 2, 3, 4 – це комбінації вискоефективних антифрикційних КМ для ШП, які знаходяться між стальними обоймами підшипникової сталі 95Х18Ш. Зразки № 5, 6, 7 – це тіж самі матеріали, але зовнішніми та внутрішніми обоймами

виступає титановий сплав BT22. В реальності титановий сплав дуже погано працює на тертя внаслідок його схильності до схоплення. Тому поверхня тертя обойми ШП має бути покрита шаром молібдену, товщиною близько 100 мкм, для підвищення зносостійкості (див. розділ 3.4, та розділ 5.2). Для досліджень НДС ШП покриття молібдену не враховувалось тому, що основна увага буде приділена розподілу навантаження в процесі роботи ШП із антифрикційними КМ.

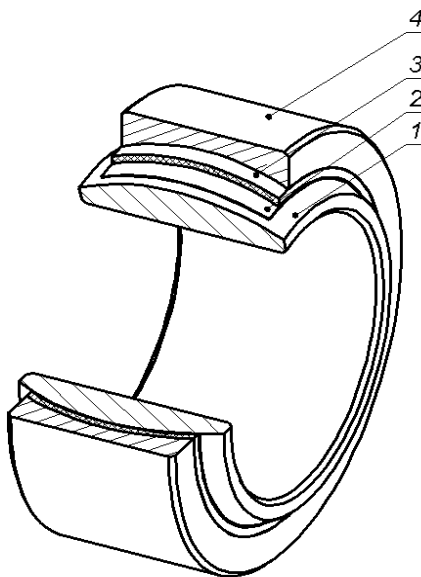


Рис. 4.9. Шари матеріалів для моделювання напружено-деформованого стану в шарнірному підшипнику:

1 – внутрішня обойма підшипника, 2 – внутрішній шар композиційного антифрикційного матеріалу (PTFE), 3 – основний шар композиційного антифрикційного матеріалу, 4 – зовнішня обойма підшипника.

За основу моделі розрахунку НДС варіантів ШП було вибрано підшипник типу GE30EW-2RS або ШН30ЮТ, які розраховували при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН та розмірами 30x47x22 мм. Навантаження на підшипник відбувалось по розподіленій площі від зовнішньої обойми до внутрішньої. Змодельовано розташування ШП на валу із зовнішнім розподіленим навантаженням від важеля конструкції літака. Моделювання НДС КМ відбувалось при реверсивному руху внутрішньої обойми відносно зовнішньої при частоті 3 Гц та амплітуді коливання в $\pm 15^\circ$.

Фізико-механічні властивості матеріалів для моделювання НДС приведені в таблиці 4.2.

Приклад отриманих результатів моделювань ШП та елементів антифрикційних КМ представлено на рис. 4.10 – 4.12 (для зразка № 1).

Таблиця 4.1

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 95X18	PTFE	Бронза олов.	Сталь 95X18
2	Сталь 95X18	PTFE	ZX-324VMT	Сталь 95X18
3	Сталь 95X18	PTFE	TX1	Сталь 95X18
4	Сталь 95X18	PTFE	Вуглеволокна	Сталь 95X18
5	BT22	PTFE	ZX-324VMT	BT22
6	BT22	PTFE	TX1	BT22
7	BT22	PTFE	Вуглеволокна	BT22

Таблиця 4.2

Фізико-механічні властивості матеріалів елементів шарнірних підшипників

Характеристика матеріалів	95X18	Бронза олов.	PTFE	Вугле-волокно	ZX324 VMT	TX1	BT22
Модуль пружності, 10^{10} , Па	20,4	11	00,5	14	0,78	1,2	11,5
Коефіцієнт Пуассона	0,27	0,33	0,4	0,25	0,3	0,3	0,3
Модуль зсуву, 10^9 , Па	-	37	0,75	6,0	-	-	43
Густина матеріалу, кг/м^3	7750	8300	2320	1750	1480	2100	4620
Межа міцності при розтягуванні, МПа	770	262	27	490	142	203	470
Межа міцності при стисканні, МПа	-	-	12	2000	120	220	-
Межа текучості, МПа	420	110	4,24	-	-	184	380

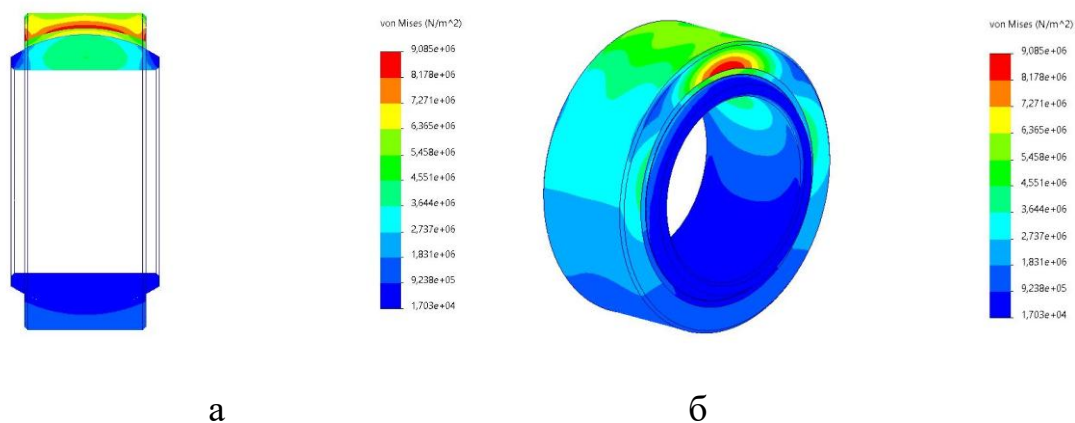


Рис. 4.10. Характер розподілу напружень в моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3 кН: а – переріз моделі, б – повна модель.

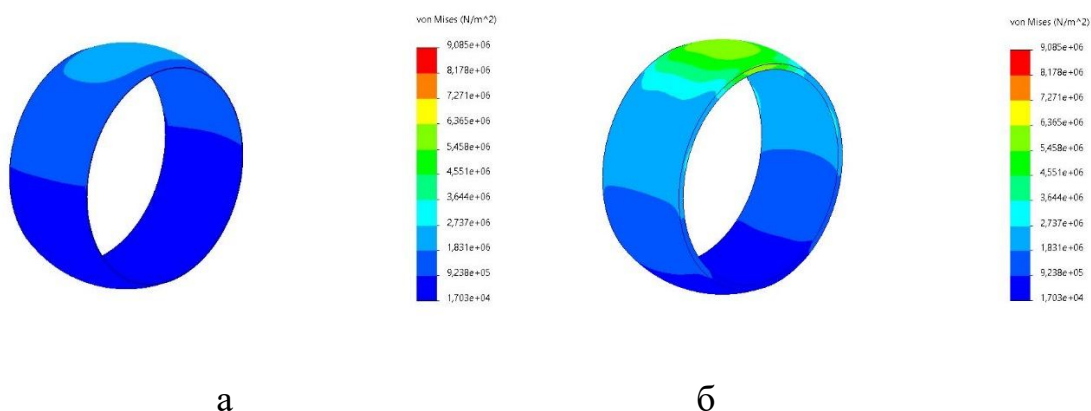


Рис. 4.11. Характер розподілу напружень в елементах композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3кН: а – елемент 2, б – елемент 3.

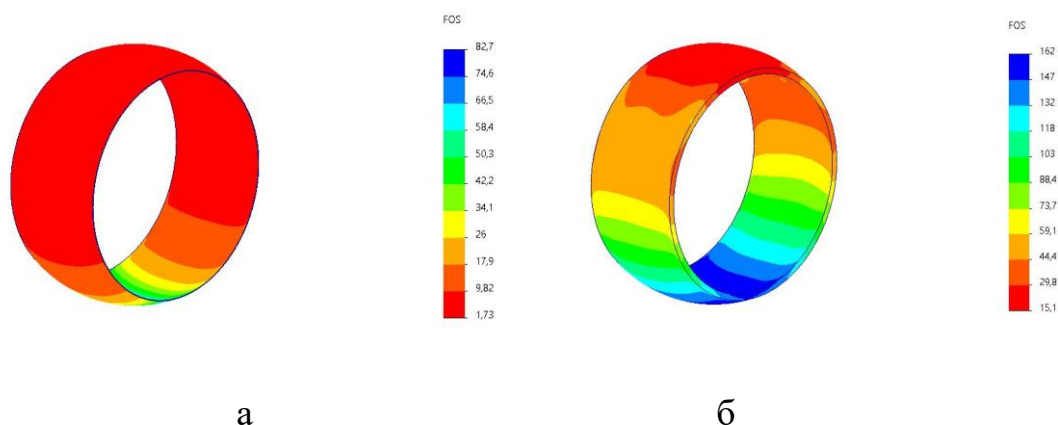


Рис. 4.12. Запас міцності в елементах композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3кН: а – елемент 2, б – елемент 3.

Проаналізувавши отриманні результати НДС моделей ШП із різними варіантами антифрикційних КМ та обойм, можна знехтувати елементом 2 (PTFE) при аналізі розподілу напружень та запасу міцності елементів моделі, оскільки при навантаженнях в 100 та 200 кН матеріал PTFE із товщиною в 100 мкм повністю втрачає свою несучу здатність щодо розподілу навантаження (рис. 4.13) та виступає в реальному ШП, як шар для припрацювання основного КМ (елемент 3).

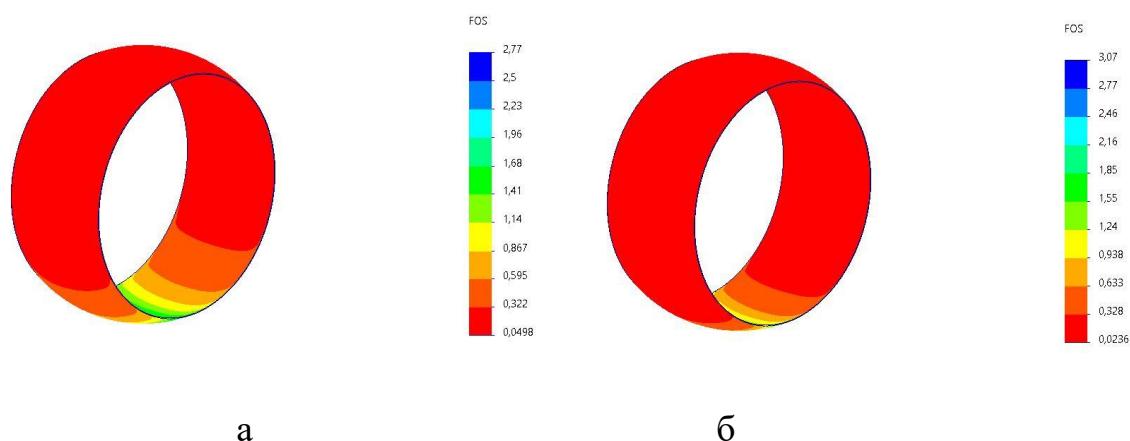


Рис. 4.13. Запас міцності елемента 2 композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 3) при навантаженнях: а – 100 кН, б – 200 кН.

Також при аналізі результатів впровадження титанових обойм в моделях зразків № 5, 6, 7 ми бачимо зменшення питомих напружень у поверхнях ШП, порівняно із матеріалом 95X18Ш для зразків № 2, 3, 4. Такий ефект спостерігається на всіх етапах моделювання НДС ШП при співставленні зразків №: 2-5 (рис. 4.14), 3-6 (рис. 4.15), 4-7 (рис. 4.16) при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН.

При збільшенні навантаження більш ефективно реалізується розподілення напружень по всім елементам ШП із титановими обоймами, ніж зі сталевими. Зменшення напружень в моделях сягає до 15 % при навантаженнях в 200 кН для окремих ділянок елементів моделей ШП.

Такий ефект можна пояснити тим, що, титановий сплав більш пластичний ніж матеріал 95X18Ш (див. табл. 4.2) та більше демпфує та перерозподіляє навантаження серед елементів ШП.

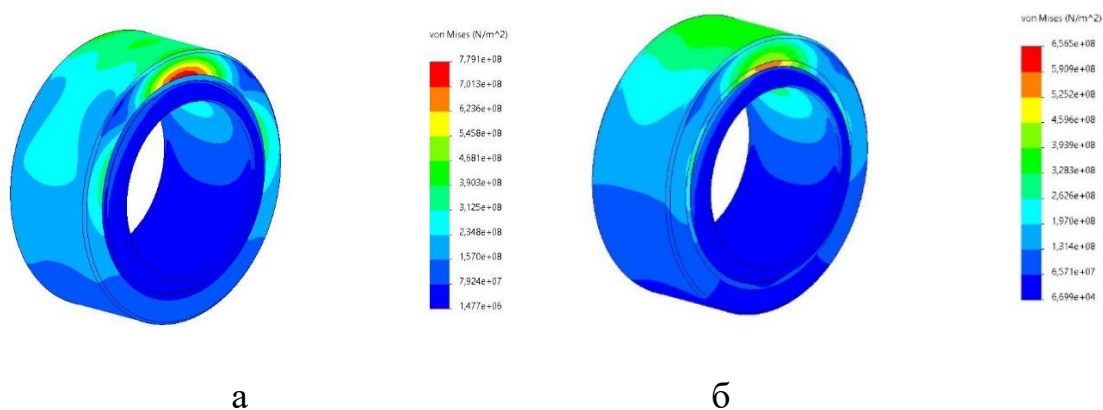


Рис. 4.14. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 2, б – зразок № 5.

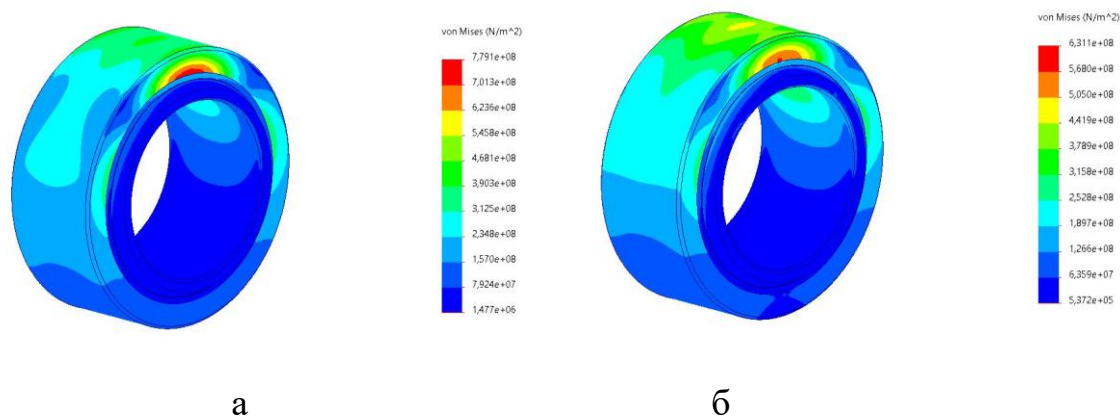


Рис. 4.15. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 3, б – зразок № 6.

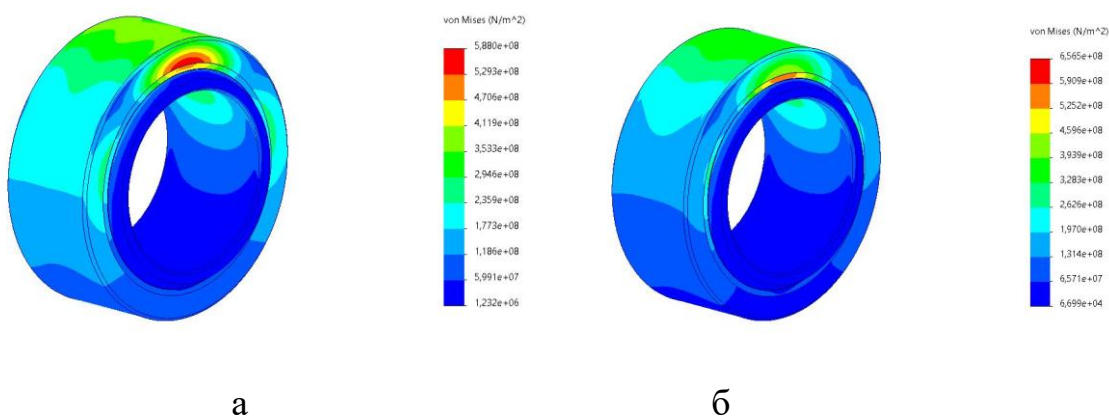


Рис. 4.16. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

В роботах [152, 153] показано переваги титанових матеріалів по розподіленню навантажень під час випробувань на зносостійкість. Так, в роботі

[153] автори досліджували зносостійкість газотермічних покриттів на титановому сплаві та на сталі. В роботі зазначено, що титановий сплав ВТ-22, на який нанесено зносостійке покриття ВКНА, може підвищувати зносостійкість плазмового покриття при навантаженнях до 30 МПа при дослідженнях на фретинг-корозію за рахунок більш пластичної основи (див. розділ 3.4). На більш твердих сталях зносостійкі високоміцні покриття мали меншу зносостійкість при помірних навантаженнях.

Це підтверджується і аналізом напружень (рис. 4.17) та запасом міцності (рис. 4.18) у КМ (елемент 3) при моделюванні НДС ШП, якщо порівнювати обидва із титанового сплаву та сталі.

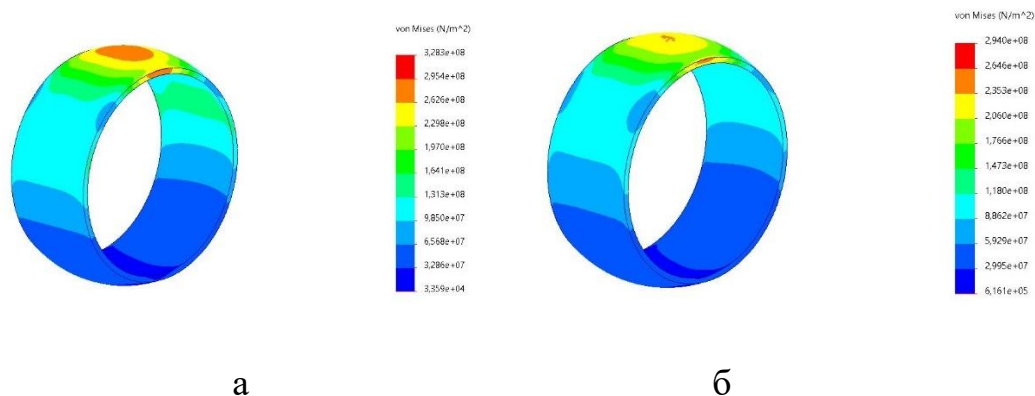


Рис. 4.17. Характер розподілу напружень в композиційному матеріалі (елемент 3) при навантаженні 100 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

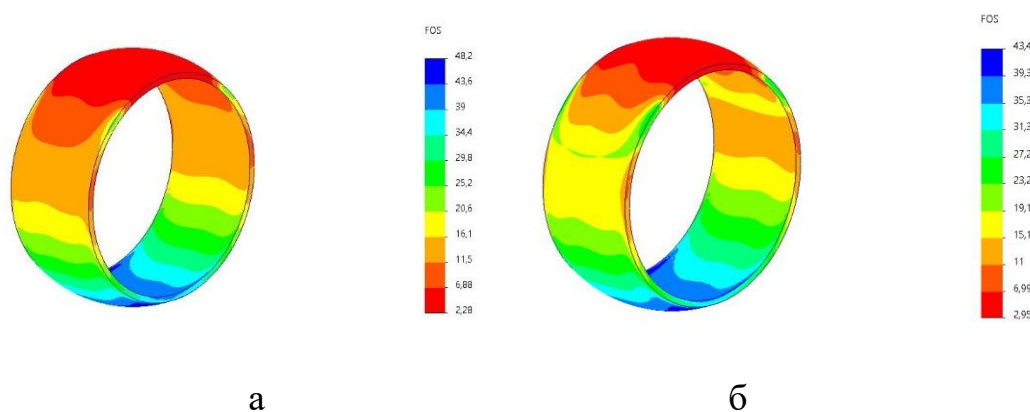


Рис. 4.18. Запас міцності композиційного матеріалу (елемент 3) при навантаженні 100 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

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 матеріали ZX-324VMT та TX1 мають напруження на 50 % менші, в порівняно із МПС та матеріалом моделі на основі вуглецевих волокон, без сполучника (рис. 4.19). Модель вуглецевих волокон має навіть на 10-15 % більші напруження, в порівнянні із МПС. Це пояснюється високими фізико-механічними характеристиками вуглеволокон (див. табл. 4.2), 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.

Аналогічна картина прослідковується і при навантаженнях в 100 та 200 кН. Відбувається зменшення питомих напружень в поверхнях композиційних матеріалів ZX-324VMT та TX1 на 30-50 %, порівняно із вуглепластиком та бронзою.

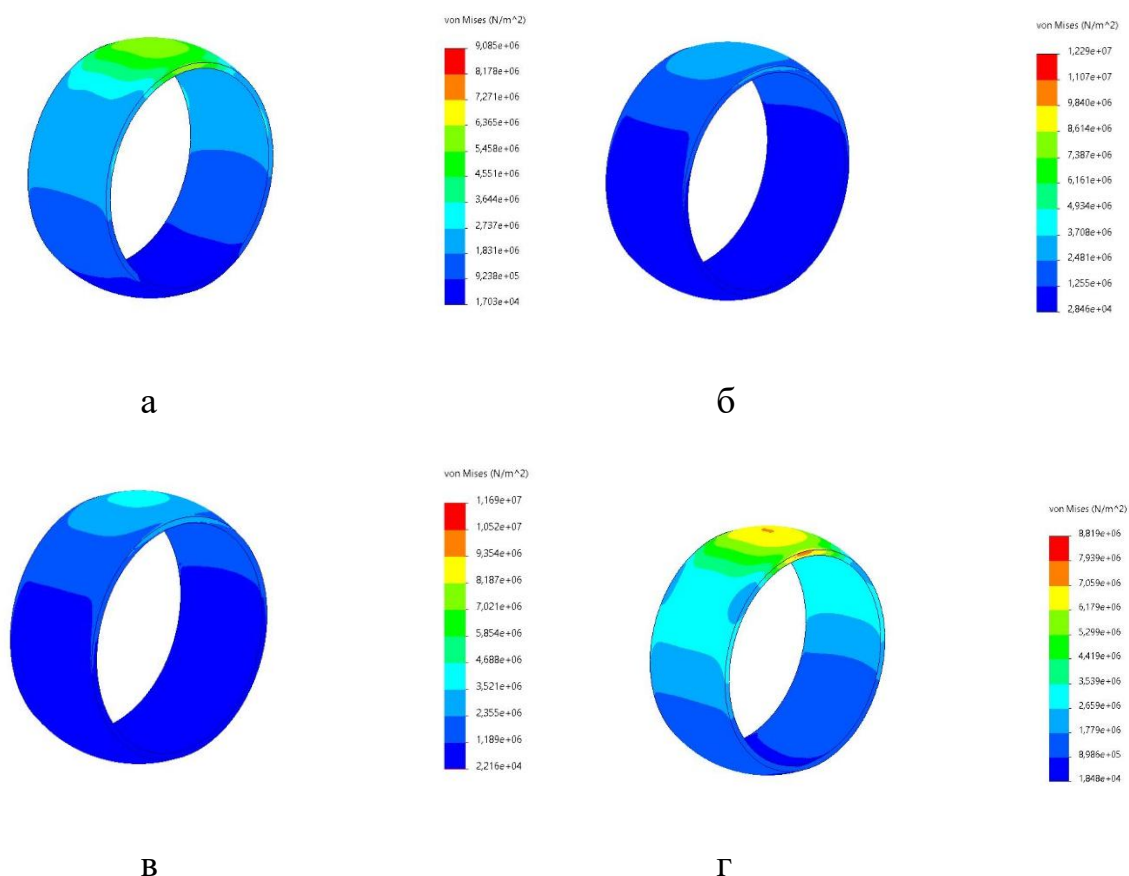


Рис. 4.19 – Характер розподілу напружень в композиційних матеріалах (елемент № 3, зразки № 1-4) моделі підшипника при навантаженні 3 кН: а – бронза олов., б – ZX-324VMT, в – TX1, г – вуглеволоконна.

Проаналізувавши запас міцності КМ (елемент № 3, зразки 1-4) при навантаженні в 3 кН (рис. 4.20) можна стверджувати, що КМ із вуглецевими волокнами має найвищий запас міцності серед випробовуваних матеріалів 98,4 в точці максимального навантаження. Матеріали ZX-324VMT та TX1 мають запас міцності 31,7 та 46,2 відповідно. Ці значення вище, ніж у матеріалу із МПС (15,1) та можуть опосередковано свідчити про зносостійкість КМ.

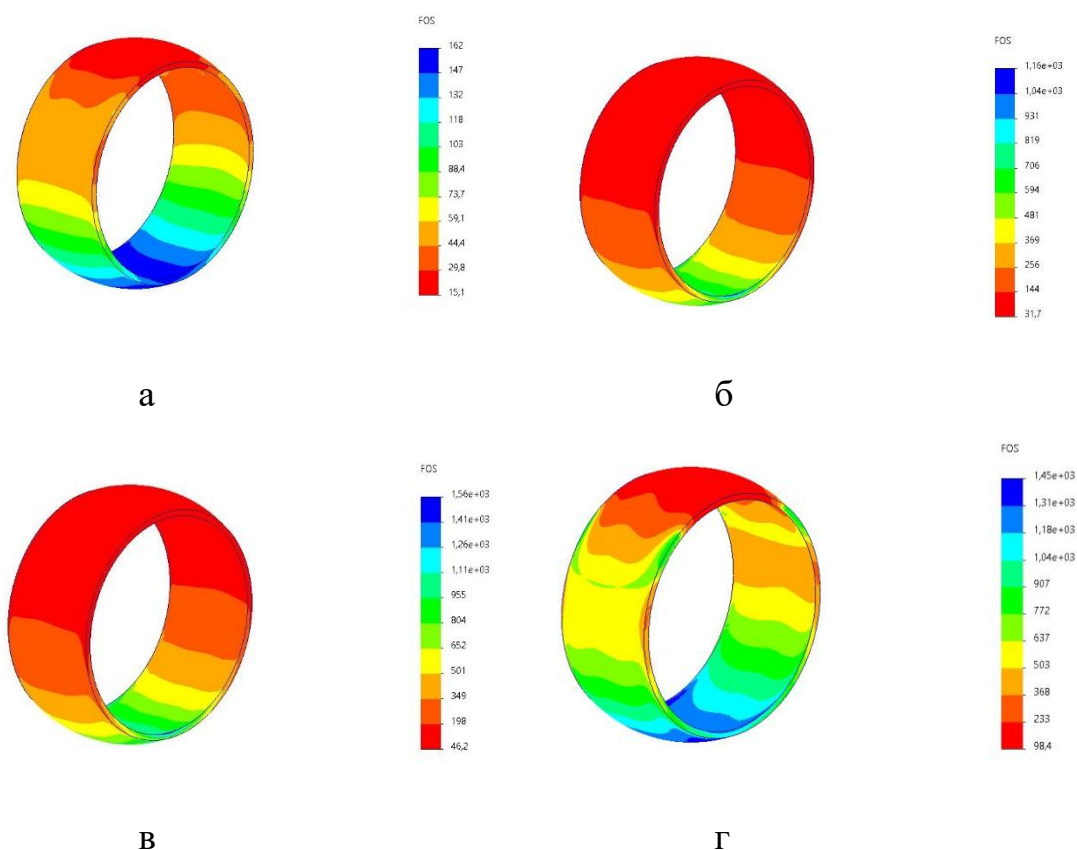


Рис. 4.20. Запас міцності композиційних матеріалів (елемент № 3, зразки № 1-4) моделі підшипника при навантаженні 3 кН: а – бронза олов., б – ZX-324VMT, в – TX1, г – вуглеволокна.

При навантаженнях в 100 та 200 кН зберігається аналогічна залежність при розрахунку запасу міцності КМ. При навантаженнях в 200 кН розрахунки показують запаси міцності в КМ зразків № 1-4 в 0,2 : 0,47 : 0,69 та 1,48 одиниць відповідно у точці максимального навантаження. Тобто, теоретично всі матеріали, окрім вуглецевих волокон, мають значення менше одиниці, що означає пластичне деформування КМ в зоні контакту.

Для більш наочного аналізу НДС КМ з використанням обойм ШП із матеріалів 95X18Ш та ВТ-22 представимо гістограми для підшипника із МПС

(зразок № 1) та із вуглеволокна (зразок № 4 та 7). На рис. 4.21 представлено максимальні значення розподілення нормальних напружень в КМ (елемент № 3) при навантаженнях 100 та 200 кН. Аналогічна залежність відбувається і при навантаженні в 3 кН.

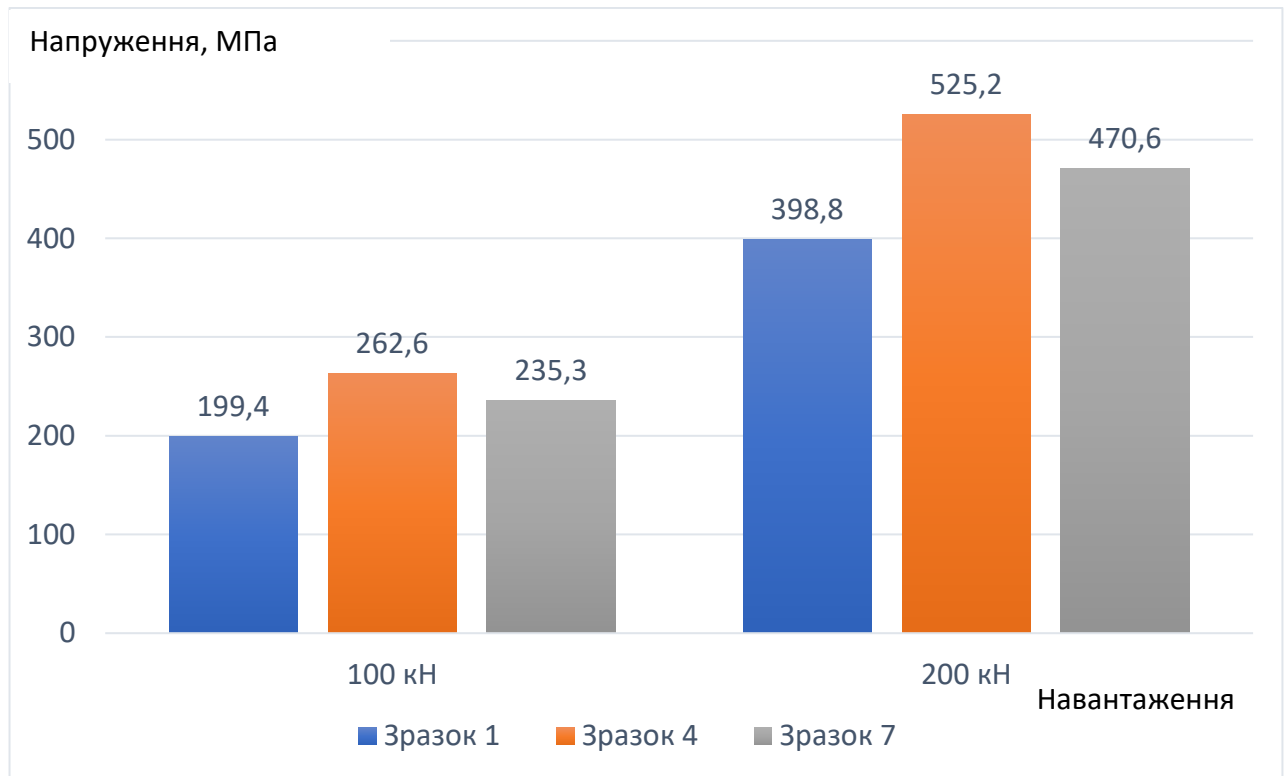


Рис. 4.21 – Гістограма розподілу напружень в композиційних матеріалах (елемент № 3) при моделюванні напружено-деформованого стану шарнірних підшипників при навантаженнях в 100 та 200 кН:

Зразок № 1 – бронза олов., матеріал обойми підшипника 95X18Ш;

Зразок № 4 – вуглеволокна, матеріал обойми підшипника 95X18Ш;

Зразок № 7 – вуглеволокна, матеріал обойми підшипника ВТ-22.

Узагальнені результати моделювання НДС представлені в табл. 4.3. 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 95X18Ш 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.

Таблиця 4.3

Результати моделювання напружено-деформованого стану в моделі шарнірного підшипника

Зразок	Матеріали елементів моделі шарнірного підшипника		Напруження, МПа			Коефіцієнт запасу міцності (за максимальними напруженнями)		
	1, 4	3	3 кН min/max	100 кН min/max	200 кН min/max	3 кН	100 кН	200 кН
1	Бронза	95X18Ш	5,458/6,365	199,4/232,5	398,8/465,0	15,1	0,463	0,232
2	ZX-324VMT	95X18Ш	2,902/3,869	96,75/129,0	193,5/258,0	30,9	0,816	0,463
3	TX1	95X18Ш	3,792/4,738	126,4/157,9	252,8/315,8	44,4	1,33	0,66
4	Вуглеволокна	95X18Ш	7,879/8,863	262,6/295,4	525,2/590,9	76,1	2,28	1,14
5	ZX-324VMT	BT-25	2,481/3,708	82,72/123,6	165,5/247,2	31,7	0,951	0,475
6	TX1	BT-22	3,521/4,688	117,4/156,3	234,8/312,5	46,2	1,39	0,693
7	Вуглеволокна	BT-22	7,059/7,939	235,3/264,6	470,6/529,3	98,4	2,95	1,48

Використання полімерних КМ Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 на сталі 95X18Ш забезпечує зниження нормальних напружень по Мізеру в 1,45 та в 1,27 разів відповідно, в порівнянні з МПС. В разі використання в якості матеріалу внутрішньої та зовнішньої обойми ШП титанового сплаву BT-22, нормальні напруження по Мізеру в моделях з полімерних КМ Zedex та Iglidur зменшуються в 2,08 та 1,55 раз, в порівнянні з МПС на сталі. Зазначимо, що при використанні сплаву BT-22 зменшення нормальних напружень при моделюванні встановлено на 11 та 7 % для полімерних КМ Zedex та Iglidur, в порівнянні з напруженнями в даних полімерних КМ на сталевих обоймах.

Коефіцієнт запасу міцності для моделі з зазначеними полімерними КМ зростає в 2,1 та 3 рази для Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 на сплаві BT-22, в порівнянні з МПС на сталі.

Таким чином, 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 сталевий обойми на обойму з поверхневозміцненого титанового сплаву забезпечує більш ефективну релаксацію напружень та збільшення коефіцієнту запасу міцності при моделюванні.

4.4. Розрахунок довговічності шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами.

Робота ШП ковзання (трибологічної системи) практично завжди супроводжується нестационарними процесами, як реакція на зовнішній чи внутрішній динамічний вплив. До цих процесів відноситься припрацювання, реверсивний рух, пуски-вибіги та інші подібні фактори. Процес припрацювання металополімерних та полімерних КМ супроводжується підвищеними зносами, вищим коефіцієнтом тертя та суттєвим зростанням температури [43, 144, 150, 154, 155]. Всі ці показники поступово зменшуються і, до кінця припрацювання, відповідають стаціонарному періоду тертя [156].

Реверсивний рух, у зв'язку з наявністю інерційних сил, що діють двічі за кожен цикл переміщень, зазвичай виконується при відносно низьких швидкостях, що знижує ступінь динамічних впливів [146, 157]. Крім того, у значній кількості трибосполучень реверсивний рух відсутній. Крім того, робота будь-якої машини пов'язана з прискореннями рухів різних деталей, часто значної маси. Це, у відповідності до другого закону Ньютона, викликає значні додаткові навантаження на всі вузли машини, включаючи трибосистеми.

Основою для розрахунку довговічності ШП є безліч випробувань та лабораторних експериментів за різних навантажень, рухів та інших умов. Спроби проведення випробувань з урахуванням всіх експлуатаційних чинників стикаються з природними обмеженнями, тому необхідно використовувати як теорію, так і досвід застосування.

Розрахунок довговічності або теоретичного терміну служби дозволяє отримати дані, які відповідають підшипникам з порівнянними характеристиками. Таким чином, можна вибрати найбільш відповідний підшипник серед продукції різних виробників. Результати можна порівнювати тільки коли виробники та

характеристики ШП ґрунтуються на однакових принципах. Коливання, що мають місце на практиці (повороти) та години роботи також враховані в розрахунок довговічності ШП.

Довговічність переважно визначається наступними факторами:

- Розрахунковий вибір ШП.
- Вплив динамічного навантаження (удари та вібрацій).
- Вплив середовища (корозія, пил, температура).
- Дотримання рекомендацій нормативної документації щодо встановлення.
- Величина та тип навантаження (статичне та динамічне).
- Функціональність ущільнень.

Фактор, який дуже сильно впливає на довговічність ШП ковзання це статичний або динамічний тип навантаження.

Статична вантажопідйомність C_o визначає максимально допустиме статичне навантаження, яке може нести ШП без виникнення в найбільш слабкому поперечному перерізі незворотної деформації металополімерного та полімерного КМ. Значення статичних навантажень зазвичай наводяться в табличних значеннях та в каталогах як паспортні значення на підшипник (див. додаток В). Такі розрахунки ведуться заводами-виробниками підшипників на підставі характеристик відповідних матеріалів і визначені експериментально при динамометричних випробуваннях певної кількості підшипників при стандартній температурі. Зазначені цифри відповідають 80 % навантаженню, отриманому в випробуваннях на міцність, тому є коефіцієнт запасу міцності 1,25. Статична вантажопідйомність C_o також використовується для визначення максимального осьового навантаження F_a згідно виразу (4.1), яка обмежена додатковим згинальним напруженням, що залежить від способу кріплення металополімерного та полімерного КМ та згідно [47, 158] (додаток В) лежить в межах $a = 0,1 - 0,3$ від радіального навантаження.

$$F_a = F_{a \max} = a \cdot C_o \quad (4.1)$$

де: F_a – максимальне осьове навантаження підшипника,

C_o – статична вантажопідйомність ШП,

a – коефіцієнт осевого навантаження ШП.

Динамічна вантажопідйомність C - це характеристика, яка визначає саме працездатність ШП в рухомих вузлах. Використовується для визначення довговічності сферичних ШП ковзання при впливі динамічних навантажень, тобто коли має місце амплітуда чи нахил під навантаженням (рис. 4.22). В залежності від характеристик металополімерного та полімерного КМ, який використовується в ШП статична вантажопідйомність може бути меншою за динамічну.

Окрім статичного чи динамічного навантаження, сили, які діють на шарнірний підшипник ковзання, можуть змінюватись та мати постійний або змінний імпульсний характер (рис. 4.23, а). Оскільки ШП із металополімерними або полімерними КМ не мають зазорів, то для них існують тільки радіальні F_r та осеві сили F_a . Радіальні, або радіальні та осеві сили, виникають, коли внутрішнє кільце обертається по відношенню до КМ, повертає з амплітудою на кут β або повертається на кут α (рис. 4.22).

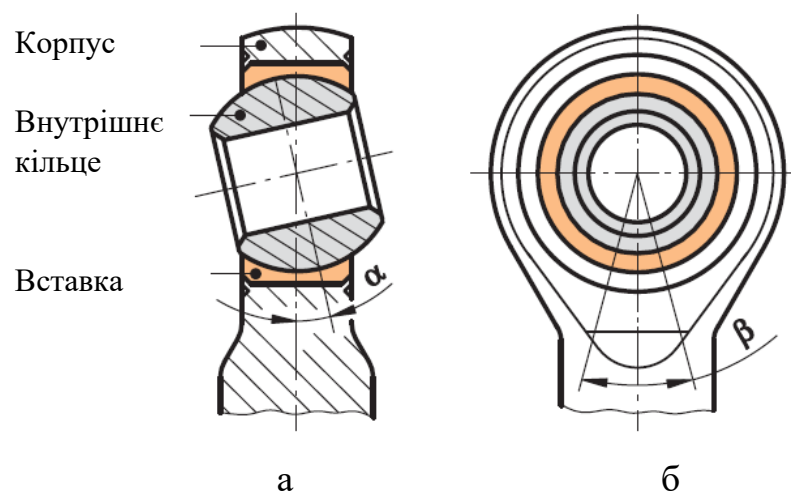


Рис. 4.22. Кут нахилу (а) та кут амплітуди (б) роботи шарнірних підшипників.

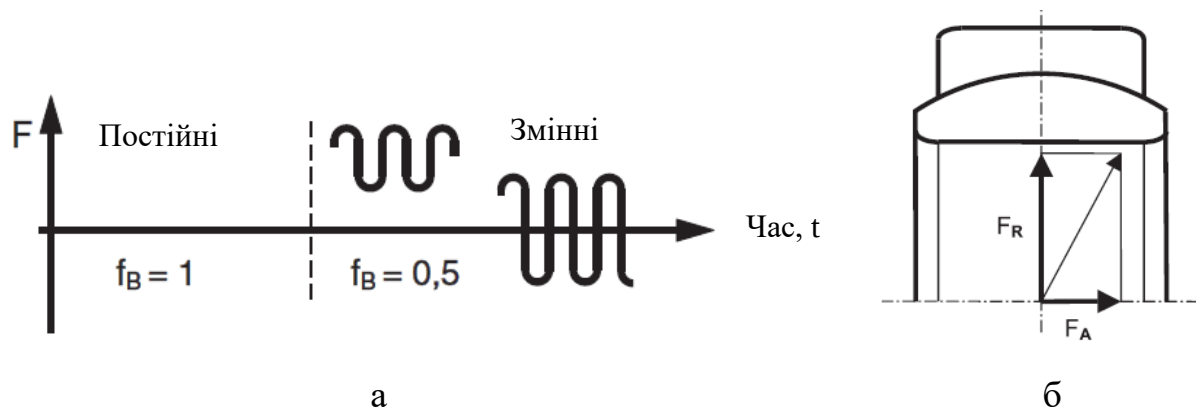


Рис. 4.23. Зміна напрямків навантаження, яке може діяти на шарнірний підшипник (а) та сили (б), які сприймає шарнірний підшипник.

У підшипнику, що рухається, існує як незмінне центральне навантаження F (постійне, односпрямоване), так і складове еквівалентне навантаження P , що складається з одночасно діючих радіального (F_r) і осьового (F_a) навантаження, яке також може бути односпрямованим або змінним. Якщо діє F , то $F = P$, що використовується безпосередньо при розрахунку довговічності підшипника. Якщо діють складові навантаження, спочатку слід визначити P . Еквівалентне навантаження P для навантаження, яке лінійно змінюється визначається як:

$$P = F_r + Y \cdot F_a \quad (4.2)$$

де: P – еквівалентне навантаження

F_r – радіальне навантаження

F_a – осьове навантаження

Y – осьовий коефіцієнт який визначається в залежності від табл. 4.4

Якщо на ШП діють змінні навантаження, то необхідно вирахувати середнє динамічне навантаження Fm згідно виразу (4.3) та рис. 4.24.

$$Fm = 0,1 \sqrt{(F_1^2 \cdot t_1 + F_2^2 \cdot t_2 + \dots)} \quad (4.3)$$

де: Fm – середнє динамічне навантаження,

F_i – навантаження, які діють в проміжку часу t (%),

t – час дії навантаження у відсотках від дії всього часу.

**Визначення коефіцієнту в залежності від співвідношення осевого
навантаження до радіального**

Відношення навантажень F_a/F_r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Осьовий коефіцієнт Y	0,8	1	1,5	2,5	3

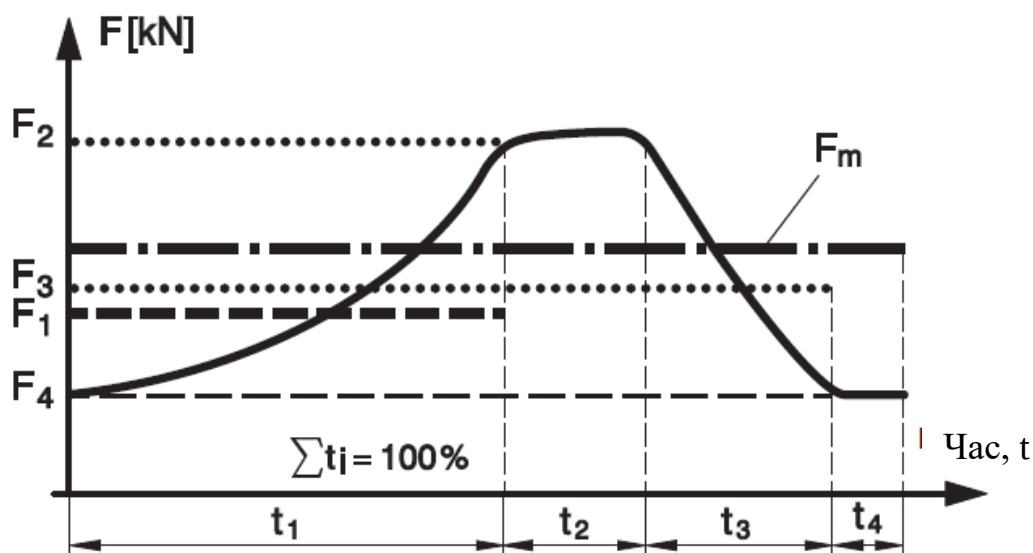


Рис. 4.24. Залежність дії змінних навантажень, що діють на шарнірний підшипник, від часу роботи підшипника.

Коли ШП на діє лише статичне навантаження, його значення може безпосередньо бути використане для розрахунків. Якщо існує динамічне навантаження, його слід розраховувати відповідно до виразів (4.2), (4.3). Коли ШП монтується з використанням гайки кріплення та існує додаткове навантаження в осевому напрямку, воно повинне бути прийнято до уваги та розраховуватись за виразом (4.3). Однак, статичне або динамічне навантаження завжди повинно бути меншим, ніж максимально допустима вантажопідйомність, яка обчислюється за значенням номінальної статичної вантажопідйомності, використовуючи вираз (4.4):

$$P = F_m + Y \cdot F_a \quad (4.4)$$

де: P – еквівалентне навантаження

F_m – середнє динамічне навантаження

F_a – осьове навантаження

Y – осьовий коефіцієнт, який визначається за табл. 4.4.

Надалі воно має бути уточнено з урахуванням коефіцієнта навантаження f_B (рис. 4.22) та температурного коефіцієнта f_t . Значення температурного коефіцієнту залежить від властивостей металополімерного або полімерного КМ який використовується у ШП ковзання.

Враховуючи те, що ШП ковзання використовуються в вузлах ПС та працюють в обмежених умовах роботи при певних температурних діапазонах, то порядок розрахунків на довговічність визначмо згідно нормативних документів (додаток Е) по виробництву та випробуванню згідно ЕТУ-100 та [47, 158].

1. Визначення навантаження P (кН) проводимо згідно виразу (4.5):

$$P = 0,97 \cdot 26,565^{F_a/F_r} \cdot F_r \quad (4.5)$$

При умові дії односпрямованого або навантаження, що змінюється, визначається еквівалентне навантаження.

2. Визначення тиску в ШП p (N/mm²) будемо проводити згідно виразу (4.6):

$$p = 300 \cdot P/C \quad (4.6)$$

де C – динамічна вантажопідйомність ШП (визначається згідно табличних значень виробників ШП та на основі тривалих лабораторних випробувань).

3. Приведений шлях тертя s (м) визначається згідно виразів (4.7, 4.8). Шлях тертя для визначення роботи ШП визначається із нормативних даних згідно [47, 158] (додаток В) та залежить від тиску в підшипнику p при умові, що він дорівнює від 1 до 300 N/mm². Для навантаження $p \leq 100$ N/mm² приведенний шлях тертя визначаємо за виразом (4.7):

$$s = 1500000/1,0219^p \quad (4.7)$$

Для навантаження $p \geq 100$ -300 N/mm² приведенний шлях тертя визначаємо за виразом (4.8):

$$s = 800000/1,0155^p \quad (4.8)$$

4. Швидкість ковзання V (мм/с) будемо визначати за виразом (4.9):

$$V = 2,91 \cdot 10^{-4} \cdot d_k \cdot \beta \cdot f \quad (4.9)$$

де: d_k – середній діаметр ШП, де розташовано металополімерний матеріал або полімерний КМ і відбувається ковзання пар тертя,

f - частота або кількість коливань ШП за хвилину. Вираз підходить для визначення швидкостей ковзання ШП які працюють в діапазонах від 1 до 300 мм/с. При коливаннях та сферичних переміщеннях α (рис. 4.23, а) і кут нахилу β (рис. 4.23, б) необхідно рахувати $\beta = \beta_1 = (\beta^2 + \alpha^2)^{0,5}$.

5. Коефіцієнт швидкості ковзання f_1 . Швидкістю руху для сферичних підшипників ковзання, що не обслуговуються, є середня швидкість ковзання V (мм/с), переважна при постійній роботі або при роботі з періодичними простоями. Швидкість ковзання враховується під час розрахунків за допомогою коефіцієнта швидкості ковзання f_1 за виразом (4.10):

$$f_1 = 1,61 - [(v \cdot l, 01^p) / 366,3] \quad (4.10)$$

6. Коефіцієнт переміщення f_2 визначимо за виразом (4.11):

$$f_2 = 0,758 \cdot 1,00618^\beta \quad (4.11)$$

Кут повороту β впливає на величину амплітуди (див. рис. 4.23). Він описує рух ШП по колу між крайніми положеннями. Один повний поворот становить 2β , тобто від одного крайнього становища до іншого. При максимальному куті повороту $\beta = 180^\circ$ один поворот становить $2\beta = 360^\circ = 1$ оберт ШП. Кут нахилу також впливає на амплітуду. Він описує рух підшипника поперек осі підшипника. Один повний нахил становить 2α . Максимальний кут нахилу при навантаженні, що дорівнює повній паспортній вантажопідйомності, вказаний паспортних в даних (додаток В). Теоретично радіальний сферичний ШП ковзання при зменшеній вантажопідйомності може бути нахилений до упору зовнішнього кільця до валу чи болту. Якщо поворот і нахил відбуваються одночасно, сферичний ШП ковзання здійснює сферичні рухи. Кут β заміщення визначається геометричним додаванням.

Кути руху враховуються коефіцієнтом переміщення f_2 при розрахунку довговічності шарнірного підшипника. При коливаннях та сферичних переміщеннях α (див. рис. 4.23, а) і кути нахилу β (див. рис. 4.23, б) рахувати $\beta = \beta_1 = (\beta^2 + \alpha^2)^{0,5}$

7. Коефіцієнт змінного навантаження f_3 . Якщо пульсуючі навантаження досягають F_{max} , то при розрахунках визначають запас міцності. При змінному напрямі навантаження (сили стиснення чи розтягування) максимальне навантаження P_{max} завжди включається до розрахунків. Довговічність ШП розраховується та коригується з використанням коефіцієнта змінного навантаження f_3 :

$$f_3 = 0,5442/1,017^{(f_4 \cdot p)} \quad (4.12)$$

8. Довговічність підшипника в годинах L_w вираховуємо за виразом (4.13), а довговічність підшипника в годинах L_{hw} за виразом (4.14).

Довговічність ШП ковзання можна розрахувати в коливаннях або в годинах роботи. Для цього спочатку потрібно визначити теоретичний строк служби підшипника L та потім поправити його за допомогою коефіцієнтів змінного навантаження f_3 .

$$L_w = s \cdot f \cdot f_1 \cdot 10 / (v \cdot f_2) \quad (4.13)$$

$$L_{hw} = L_w / (f \cdot 60) \quad (4.14)$$

Розв'язок задачі по розрахунку довговічності ШП, який працює у важелі автомату перекошу гелікоптера Мі-8МТВ-1 та його модифікацій (додаток Д, додаток Е) та передає зусилля від тарілки зміни кута автомату перекошу до лопоті несучого гвинта гелікоптера будемо розраховувати при таких умовах роботи ШП:

1. Радіальне навантаження – 2 кН.
2. Осьове навантаження – 0,1 кН.
3. Тип навантаження – двостороннє навантаження, змінне.
4. Рух підшипника – поворот на кут $\beta = 30^\circ (\pm 15^\circ)$ з частотою 3 Гц (180 кол/хв).

Режими роботи ШП у важелі автомату перекошу гелікоптера будемо визначати на прикладі одного робочого дня гелікоптера Mi-8MTV-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель (додаток Д) при перевезення пасажирів та вантажів. Гелікоптер за день виконує біля 10 короткочасних перевезень із тривалістю польоту 30-70 хвилин. Після зльоту із місця базування гелікоптер перелітає по провінціям республіки Буркіна-Фасо та виконує перевезення пасажирів. Робота гелікоптера характеризується постійними зльотами та посадками, а також довготривалою роботою на перехідних режимах та режимах холостого ходу.

Відповідно до нормативних документів та особливостей роботи гелікоптера визначаємо наступні умови роботи ШП:

Режим 1 (злітний режим) – навантаження 100 %, час роботи 15 %.

Режим 2 (режим польоту) – навантаження 50 %, час роботи 50 %.

Режим 3 (режим посадки) – навантаження 30 %, час роботи 10 %.

Режим 4 (перехідні умови роботи, холостий хід) – навантаження 5 %, час роботи 25 %. Загальний час роботи підшипника за день складає 8 годин.

Визначено для розрахунків наступний підшипник GE30EW-2RS, для якого:

- статична вантажопідйомність C_o – 275 кН,
- динамічна вантажопідйомність C – 165 кН,
- відповідний діаметр dk – 40,7 мм.

1. Розрахунок навантаження визначаємо за виразом (4.15).

$$\text{Для } P_1 = 0,97 \cdot 26,565^{(0,1/2)} \cdot 2 = 2,285 \text{ кН.}$$

$$\text{Для } P_2 = 2,285 \cdot 0,5 = 1,142 \text{ кН.}$$

$$\text{Для } P_3 = 2,285 \cdot 0,3 = 0,685 \text{ кН.}$$

$$\text{Для } P_4 = 2,285 \cdot 0,1 = 0,228 \text{ кН.}$$

2. Розрахунок тиску в підшипнику визначаємо за виразом (4.6).

$$\text{Для } p_1 = 300 \cdot 2,285 / 165 = 4,154 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{Для } p_2 = 300 \cdot 1,142 / 165 = 2,076 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{Для } p_3 = 300 \cdot 0,685 / 165 = 1,245 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{Для } p_4 = 300 \cdot 0,228 / 165 = 0,414 \text{ N/mm}^2.$$

3. Розрахунок приведенного шляху тертя визначаємо за виразом (4.7).

$$\text{Для } s_1 = 1500000/1,0219^{4,154} = 1370909 \text{ м.}$$

$$\text{Для } s_2 = 1500000/1,0219^{2,076} = 1434033 \text{ м.}$$

$$\text{Для } s_3 = 1500000/1,0219^{1,245} = 1460083 \text{ м.}$$

$$\text{Для } s_4 = 1500000/1,0219^{0,414} = 1486607 \text{ м.}$$

4. Розрахунок швидкості ковзання визначаємо за виразом (4.9).

$$V = 2,91 \cdot 10^{-4} \cdot 40,7 \cdot 30 \cdot 180 = 63,95 \text{ м/сек.}$$

5. Розрахунок коефіцієнту швидкості визначаємо за виразом (4.10).

$$\text{Режим 1. } f_1 = 1,61 - [(63,95 \cdot 1,01^{4,154})/366,3] = 1,428$$

$$\text{Режим 2. } f_1 = 1,61 - [(63,95 \cdot 1,01^{2,076})/366,3] = 1,431$$

$$\text{Режим 3. } f_1 = 1,61 - [(63,95 \cdot 1,01^{1,245})/366,3] = 1,433$$

$$\text{Режим 4. } f_1 = 1,61 - [(63,95 \cdot 1,01^{0,414})/366,3] = 1,434$$

6. Розрахунок коефіцієнту переміщення визначаємо за виразом (4.11).

$$f_2 = 0,758 \cdot 1,00618^{30} = 0,911$$

7. Розрахунок довговічності підшипника визначаємо за виразом (4.13).

$$\text{Режим 1. } L_w = 1370909 \cdot 180 \cdot 1,428 \cdot 10 / (63,95 \cdot 0,911) = 60,46 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

$$\text{Режим 2. } L_w = 1434033 \cdot 180 \cdot 1,431 \cdot 10 / (63,95 \cdot 0,911) = 63,38 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

$$\text{Режим 3. } L_w = 1460083 \cdot 180 \cdot 1,433 \cdot 10 / (63,95 \cdot 0,911) = 64,62 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

$$\text{Режим 4. } L_w = 1486607 \cdot 180 \cdot 1,434 \cdot 10 / (63,95 \cdot 0,911) = 65,84 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

8. Обчислюємо середнє значення циклів підшипника із урахуванням його часу роботи та тривалості дії навантаження:

$$L_w = 100 / (15/60,46 \cdot 10^6 + 50/63,38 \cdot 10^6 + 10/64,62 \cdot 10^6 + 25/65,84 \cdot 10^6) = 63,63 \cdot 10^6$$

циклів коливань.

9. Визначимо наробітку в годинах за виразом (4.14).

$$L_{hw} = 63,5 \cdot 10^6 / (180 \cdot 60) = 5879 \text{ годин роботи.}$$

Таким чином, при розрахунках довговічності ШП ми отримали 5879 годину роботи, що більше, ніж необхідний ресурс, який встановлений технічною документацією [54, 47, 157] 2000 – 2500 годин роботи на автомат перекошу. Але слід зазначити, що розрахувати та оцінити всі особливості умов ШП (гелікоптера) неможливо. Так, наприклад, такі припущення як: корозійне середовище,

запиленість, короткочасні динамічні навантаження, турбулентність, груба посадка, підвищення температури, робота при значних від'ємних температурах, неправильна установка підшипника, попадання сторонніх предметів та ін. взагалі не враховуються під час розрахунків. Тому реальний строк служби ШП буде менший і буде залежати від особливостей роботи гелікоптера.

Висновки до розділу 4.

1. Встановлено, що висока зносостійкість металополімерної стрічки 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.

2. Визначено механізм збільшення лінійного зносу полімерних композиційних матеріалів в 1,5...1,9 разів, в порівнянні з металополімерною стрічкою, 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 композиційних матеріалів знаходяться в межах допуску для осьового зазору шарнірних підшипників, що обумовлено термічною витривалістю та жорсткістю армуючих волокон.

3. Високі критичні навантаження як статичні, так і динамічні значно знижують зносостійкість полімерних композиційних антифрикційних матеріалів. 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 композиційного матеріалу в стан вимушеної високоеластичності і, як наслідок, руйнування матеріалу.

4. 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.

5. Моделюванням напружено-деформованого стану шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами доведено зменшення питомих напружень у поверхневих шарах матеріалів підшипників при використанні титанових сплавів BT22 замість підшипникової сталі 95X18Ш до 20 %, в залежності від матеріалу та умов навантажень.

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

РОЗДІЛ 5

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМИ АНТИФРИКЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

В цьому розділі представлені результати випробувань ШП із металополімерними та полімерними КМ в лабораторних умовах та на промисловості. Основна мета цього розділу є полягає в дослідженні КМ на реальних ШП, в умовах, наближених до експлуатаційних. Випробування проводились згідно договорів № 549-X08(АН01-60(08), № 1049-X16, № 1050-X16, № 1.0668.2021, № 2023/39/UA, № 2024/139/UA між Національним авіаційним університетом і авіакомпанією ТОВ «НЗOPERATIONS» та підприємствами ДП Завод «Антонов», ООО «Укртехавіа». Крім того, в розділі представлено аналіз досліджень авіаційних ШП ковзання з вставками КМ та технологічні рекомендації щодо їх виготовлення.

5.1. Ресурсні лабораторні випробування шарнірних підшипників із композиційними матеріалами.

Ресурсні лабораторні випробування ШП ковзання із металополімерними та полімерними КМ проводили на установці, яка описана в розділі 2.4. Особливістю цієї установки є випробування готових ШП із геометричними розмірами згідно ГОСТ 3635-78, ЕТУ 100-4, DIN ISO 12240-1 (DIN 648) вони були визначені при розробці цієї установки як базові.

Установка була розроблена згідно трьохстороннього договору № 1049-X16 «Розробка методики та вдосконалення обладнання для випробувань шарнірних підшипників» між Національним авіаційним університетом, ДП Завод «Антонов» та ООО «Укртехавіа». Проектування та розробка була виконана автором дисертаційної роботи під керівництвом конструкторів конструкторського бюро ДП Завод «Антонов». Установка дозволяє проводити випробування ШП ковзання в

умовах реверсивного руху при комбінованому (радіальному та осьовому) навантаженні до 200 кН.

Ресурсні випробування ШП проводили на базі підшипника ШН30ЮТ, виготовленого Саратовським підшипниковим заводом. Саме цей підшипник, згідно технічної документації (додаток Е), застосовується на гелікоптері Мі-8МТВ-1 та використовується як базовий на літаках фірми Антонов. Цей тип підшипнику Саратовського підшипникового заводу застосовувався протягом багатьох років у літаках радянського виробництва та літаках типу Ан [26] та має задовільні та прогнозовані характеристики по зносостійкості та довговічності. Його імпортований аналог GE30DE5 (фірми «FLURO - Gelenklager GmbH» розташованого в місці Rosenfeld Німеччина), має маркування GE30EW-2RS. Для досліджень інших видів полімерних КМ, а саме матеріалу Zedex ZX-324VMT та матеріалу Iglidur TX1, створювалось додаткове обладнання для того, щоб створити ШП ковзання із цими матеріалами. ШП із запропонованими автором полімерними КМ виготовлялись при одиничному дослідному виробництві на авіаремонтному підприємстві «AAL GROUP LTD» в місті Шарджа ОАЕ, яке займається ТО, капітальним ремонтом та виготовленням деталей та вузлів для гелікоптерів Мі-8Т, Мі-8Р, Мі-8РS, Мі-8МТВ-1(Мі-17-V), Мі-8МТВ(Мі-17), Мі-8АМТ, Мі-171, Мі-17V-5. За основу брався корпус підшипника ШН30ЮТ та замість металополімерної стрічки вставлявся полімерний КМ.

Визначення умов проведення досліджень ШП відбувалось із розгляду роботи вузлів, де застосовуються підшипники із металополімерними КМ. Передавання зусиль ШП в статичному форматі (механізми системи керування, компенсування перекосів балок, шарніри статичних кріплень) взагалі не розглядалося та не бралось до уваги, оскільки міцність підшипника в цьому випадку визначається характеристиками міцності металополімерного або полімерного КМ, а не трибологічними характеристиками.

Визначення умов досліджень при динамічному навантаженні визначали згідно наступних нормативних документів: ЕТУ 100-4 (єдині технічні умови для шарнірних підшипників), DIN ISO 12240-1 (DIN 648), ГОСТ 3635-78 та вимог СТД

651.02.061-92 (конструкторська документація для визначення статичного та динамічного навантаження підшипників). Згідно цих документів було визначено навантаження для ШП із металополімерними та полімерними КМ, база випробувань на ресурсні дослідження, умови проведення випробувань.

Умови проведення ресурсних випробувань були наступні:

1. База випробувань для ШП визначалась в 100 тис. циклів.
2. Оцінка пошкодження – контролювався осьовий зазор кожні 20 тис. циклів, не знімаючи підшипник із установки. Контроль проводився за схемою згідно ГОСТ 3635-78 (пункт 4.10) за допомогою індикатора часового типу. Контроль проводився по 3 рази для достовірності значень на кожну точку вимірювання. Також визначалося контактне втомне викришування поверхонь підшипників після завершення базового циклу випробувань (100 тис. циклів).
4. Частота коливань складала 3 Гц.
5. Амплітуда коливань складала 40 градусів ($\pm 20^\circ$) і визначалась із умов кінематичної схеми роботи важеля автомату перекошу гелікоптера Мі-8МТВ-1 (додаток Е).
6. Навантаження для всіх випробуваних підшипників складало 31,5 кН. Схема навантаження відповідала ГОСТ 3635-78, розділ 6 «Умови експлуатації».
7. Всі випробування були проведені при температурі від 16 до 20 °С. В процесі досліджень спостерігалось незначне підвищення температури ШП до 40 °С.

Результати ресурсних лабораторних випробувань представлено на рис. 5.1.

В процесі випробувань ШП із металополімерним та полімерними композиційними покриттями спостерігалось висипання КМ у вигляді продуктів зношування чорного кольору у всіх випробовуваних зразках. Після випробувань в 100 тис. циклів фрактографічний аналіз не виявив на поверхні внутрішніх обойм ділянок захоплення. Зовнішні обойми із металополімерним та полімерними КМ показали високу зносостійкість, КМ не зносились до основи обойми підшипника, що може свідчити про те, що всі ШП, які приймали участь у випробуваннях, працездатні і можуть витримати більший ресурс, згідно ГОСТ 3635-78, DIN ISO

12240-1 (DIN 648) та СТП 651.02.061-92. Також слід зазначити, що всі ШП показали осьовий зазор менше 0,3 мм при напрацюванні в 100 тис. циклів, що вважається критичним зазором для підшипника даного розміру.

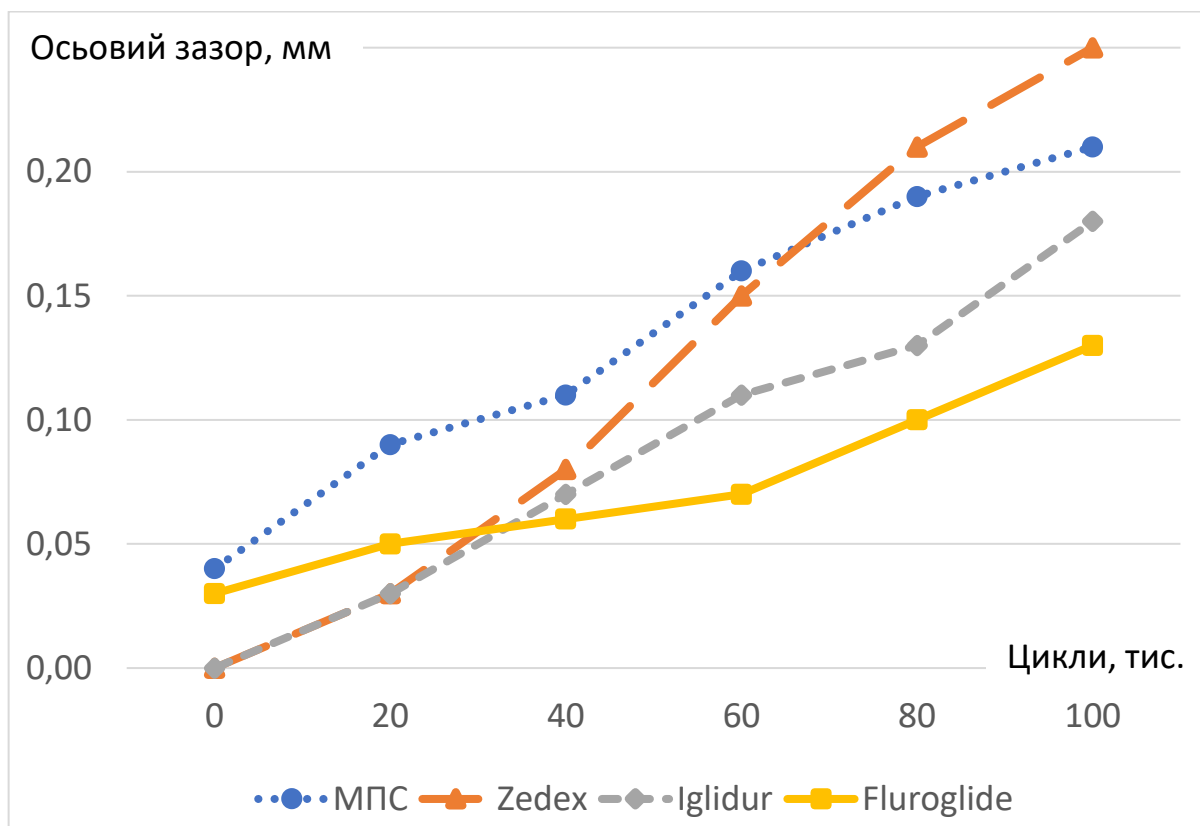


Рис. 5.1. Залежність осьового зазору шарнірних підшипників із композиційними матеріалами від кількості циклів коливань. Умови випробувань (А- $\pm 20^\circ$, ν – 3 Гц, Р – 31,5 кН, N – 100 тис. циклів)

Згідно ЕТУ 100-4, ГОСТ 3635-78 та DIN ISO 12240-1 (DIN 648) шарнірні підшипники цього типу та розміру мають виготовлятися із зазором в 0,03-0,08 мм, що відповідає рис. 5.1 при початкових вимірюваннях підшипників ШН30ЮТ та GE30EW-2RS. Однак, при виготовленні підшипників із іншими полімерними КМ зазор нових ШП дорівнював нулю. Це пов'язано із особливістю виготовлення опитних зразків підшипників із матеріалами Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1.

Аналізуючи результати випробувань ШП, ковзання можна зробити висновок, що підшипник із металополімерною стрічкою та підшипник із матеріалом Fluroglide мають аналогічні якісні зміни за характером зношування. Різниця спостерігається як у результатах осьового зазору, так і в інтенсивності

зношування. Спочатку ШП мають певний зазор і полімерний КМ (PTFE із функціональними добавками) знаходиться у вільному, не обтисненому стані. При прикладанні навантаження у першочерговий момент спостерігається обтиснення матеріалу PTFE, який входить до складу як МПС, так і до КМ Fluroglide, так звана обкатка (припрацювання) підшипників. Цей етап характеризується розподілом полімерного матеріалу та заповненням всіх пор під навантаженням та формуванням певної топографії поверхні [159]. На першочерговому етапі напрацювання в 20 тис. циклів збільшення осьового зазору для МПС та КМ Fluroglide зафіксовано в 2,25 та 1,43 рази відповідно, що обумовлено вищою несучою здатністю полімерних КМ Fluroglide за рахунок армуючої тканини. При збільшенні кількості напрацювань до 100 тис. відбувається рівномірне зношування матеріалу майже по лінійних залежностях. Збільшення осьового зазору при напрацюванні 100 тис. циклів для МПС та полімерного КМ Fluroglide спостерігалось в 5,25 та в 3,7 разів. Слід зазначити, що в процесі випробувань спостерігалось підвищення температури до 43°C підшипника із КМ Fluroglide. Підшипник GE30EW-2RS нагрівався в меншому ступені, ніж підшипник із МПС. Це пояснюється виводом тепла із зони тертя лице у внутрішню обойму та контактом метал-полімер, а у підшипнику із МПС контакт метал-(бабіт+полімер).

Аналізуючи зносостійкість ШП із КМ Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 можна сказати, що при наробітку до 20 тис. коливань зносостійкість цих матеріалів однакова. Пояснюється тим, що поверхні полімерних КМ компаній Zedex та Iglidur майже однакові по характеристикам (додаток В). При збільшенні кількості напрацювань та по мірі зношування поверхневих шарів полімерних КМ все більше і більше проявляється структура та функціональні добавки, які входять в склад полімерних КМ. На рис 5.2 представлено топографії структур матеріалів ZX-324VMT та TX1. Із рис. 5.2 видно, що компанія IGUS використовує для зміцнення КМ Iglidur TX 1 більший розмір армуючих волокон. При наробітку в 100 тис. циклів видно, що зносостійкість КМ Zedex ZX-324VMT найнижча. Відмінність проявляється вже на 70 тис. циклів. Матеріал Iglidur TX при випробуваннях займає проміжне положення між МПС та КМ Fluroglide.

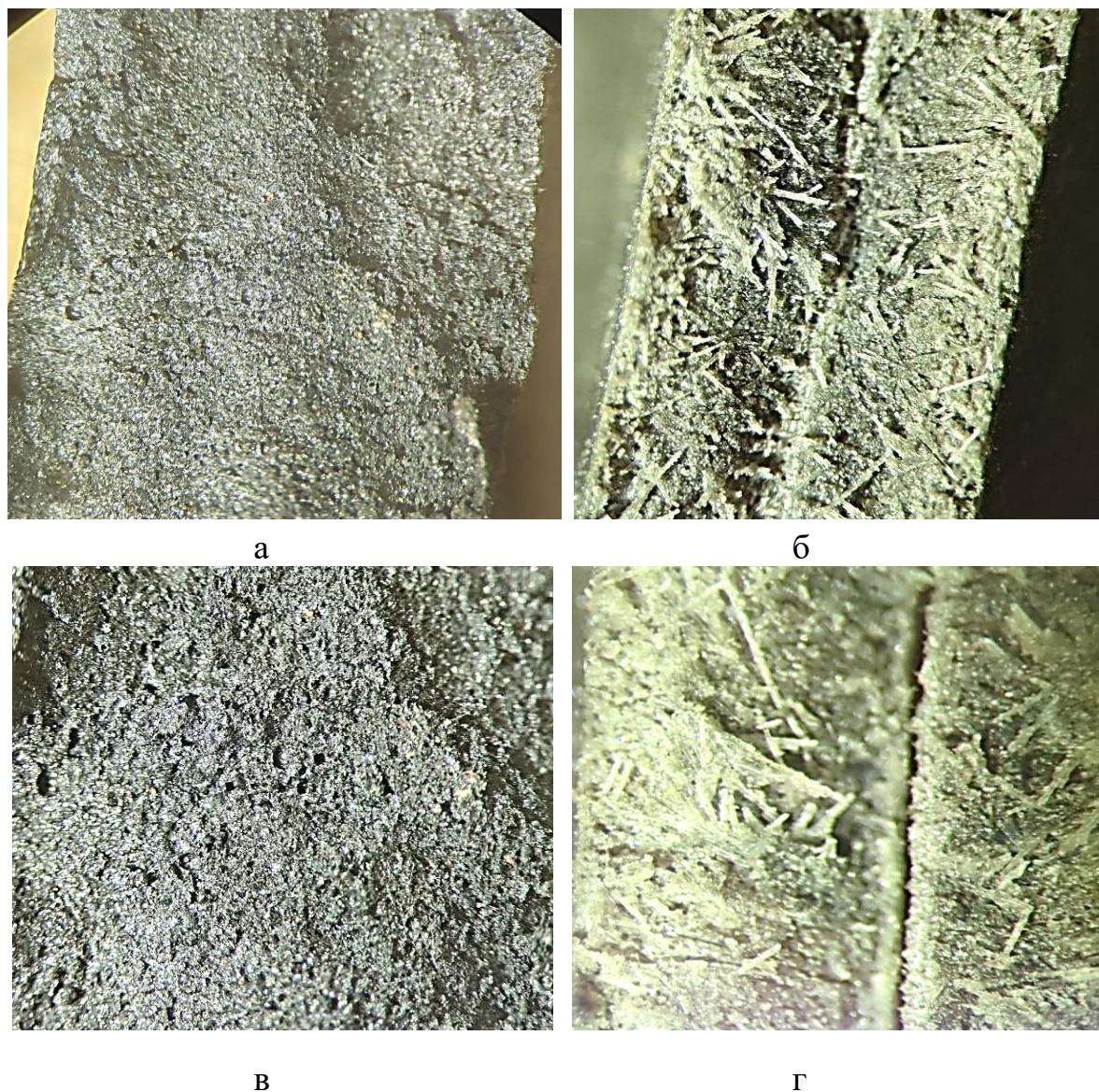


Рис. 5.2. Структури полімерних композиційних матеріалів ZX-324VMT (а, в) та TX1 (б, г) при збільшеннях в x28 (а, б) та x56 (в, г).

В цілому, можна сказати, що до наробітку до 60 тис. циклів ШП із МПС показує результати гірші по зносостійкості, ніж полімерні КМ, але всі ці результати лежать в полі допусків нормальної роботи підшипників. Якщо ми відкинемо зазор, який був на початку випробувань підшипників та порівняємо результати, то картина зношування ШП буде дещо іншою. На рис. 5.3 представлено результати (осьового зазору) зношування ШП із металополімерним та полімерними КМ від кількості циклів коливань при умові нівелювання початкового зазору (криві зносу матеріалів Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1 симетрично здвинуто на нульову позначку).

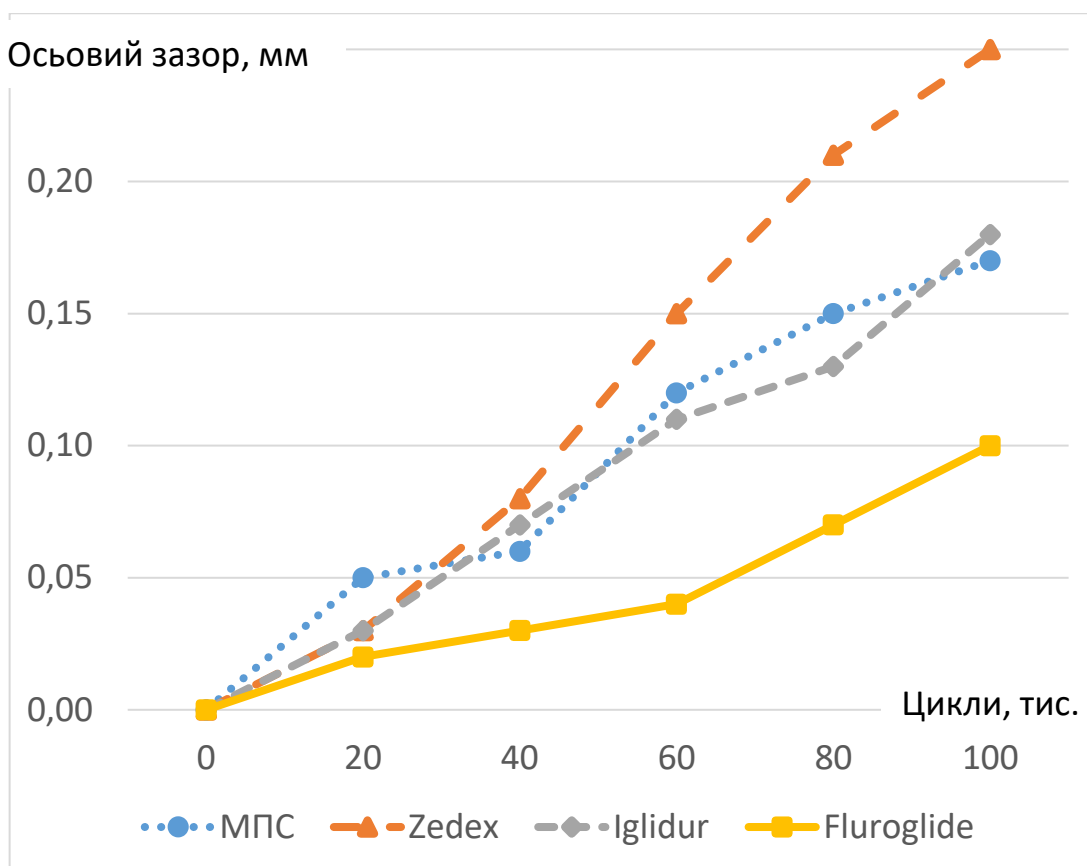


Рис. 5.3. Залежність зношування шарнірних підшипників із композиційними матеріалами від кількості циклів коливань при умові нівелювання початкового зазору.

Аналізуючи цей варіант зношування КМ можна стверджувати, що ШП із матеріалом Fluroglide показує зносостійкість майже в 2 рази більшу на відрізьку 40-100 тис. циклів, ніж підшипники із іншими матеріалами. Слід зазначити, що це єдиний ШП, де зношування полімерного матеріалу відбувається не по сталі, а по хромовому покриттю, яке відомо своєю зносостійкістю [126, 160]. Комбінація армованої тканини із PTFE та добавками із твердих мастильних матеріалів в парі із полірованим хромом ще раз доводить правило Шарпі [160], що найбільш вдалий варіант для трибопар - це тверда основа із в'язкою матрицею та твердими включеннями [161].

Слід зазначити, що лабораторні умови випробувань ШП не відповідали реальним умовам роботи ШП які працюють у важелях автомату перекошу головного редуктора гелікоптера типу Мі-8. А результати випробувань носили лише порівняльний характер при певному розрахунковому навантаженні.

Температура випробувань, кількість циклів та навантаження вибирались згідно нормативних документів умов роботи гелікоптера (додаток Д, Е).

Наприклад, кількість годин роботи головного редуктора та автомату перекосу в цілому від ремонту до ремонту складає від 2000 до 2500 годин роботи в залежності від типу обладнання та умов роботи гелікоптера Mi-8MTV-1. При номінальній частоті обертання несучого гвинта в 192 ± 2 об/хв частота коливань ШП складає близько 3 Гц, та в перерахунку на цикли 27 млн. коливань при 2500 годин. Оберти в режимі малого газу 45 ± 10 об/хв. Тобто величина в 100 тис. циклів, як і навантаження в 31,5 кН, це стандартизовані паспортні значення.

Тому для більш достовірних результатів необхідно проведення додаткових промислових випробувань в умовах, наближених до реальних вузлів.

5.2. Промислові випробування шарнірних підшипників

Промислові випробування ШП ковзання із КМ виконувались на авіаремонтному підприємстві «AAL GROUP LTD» в місті Шарджа ОАЕ, яке займається ТО, капітальним ремонтом та виготовленням деталей та вузлів для гелікоптерів Mi-8T, Mi-8P, Mi-8PS, Mi-8MTV-1(Mi-17-V), Mi-8MTV(Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171, Mi-17V-5.

Метою досліджень було виготовлення та випробування на зносостійкість дослідних зразків ШП, які виготовлялись на підприємстві за рекомендацією автора дисертаційної роботи. Підшипники виготовлялись за схемою, описаною вище (розділ 5.1), але додатково на внутрішню поверхню ШП наносили покриття молібдену вакуумно-дуговим методом з товщиною біля 100 мкм. Також внутрішня обойма деяких підшипників виготовлялась із титанового сплаву R56260 (Ti6Al2Sn4Zr6Mo). Результати випробувань підтверджені актом випробувань (додаток А).

Установка, на який проводили випробування ШП виготовлена за схемою, представлений в [162] згідно рис. 5.4

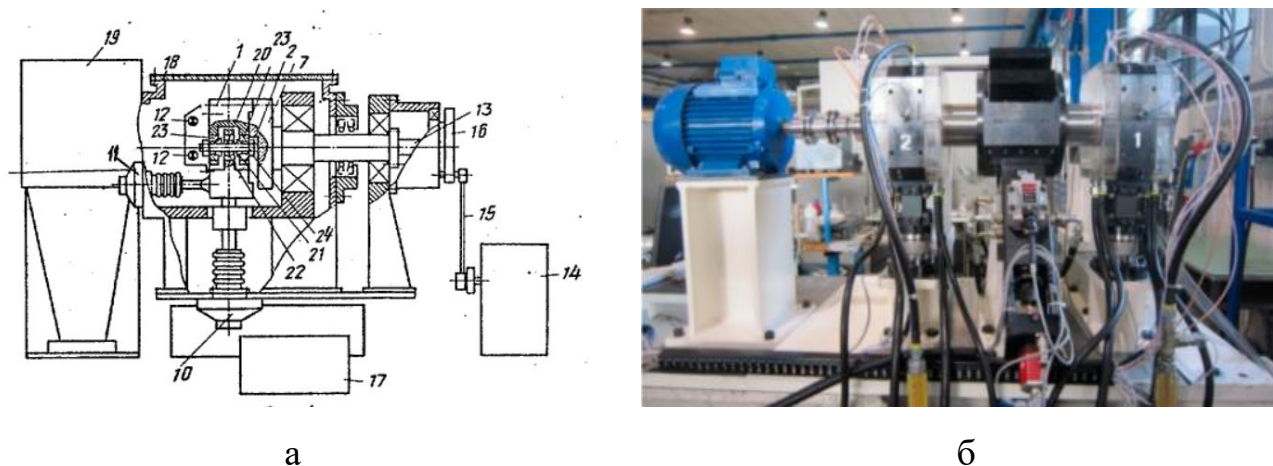


Рис. 5.4. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) установки для випробувань шарнірних підшипників на підприємстві [162].

Стенд для випробувань працює за принципом руху зовнішнього кільця із заданою амплітудою при фіксованому внутрішньому кільці при комбінованому радіальному та осьовому навантаженні. Стенд дозволяє проведення випробувань як сферичних, так і циліндричних підшипників ковзання та кочення в режимі реверсивного руху в широкому діапазоні кутів, частот та навантажень в середовищі повітря та в інших газах чи вакуумі. Також в стенді реалізовано випробування при температурах за допомогою нагрівання інфрачервоним випромінюванням місця встановлення ШП.

Вибір комбінацій матеріалів ШП для промислових випробувань визначався із позиції економічної ефективності та надійної умови роботи від впровадження дослідних зразків у промисловість. За основу використовувався підшипник типу ШН30ЮТ, який на даний момент є нормованим за всіма відповідними технічними документами. Результати випробувань дослідних зразків ШП представлено в таблиці 5.1.

Для випробувань ШП вибрані умови роботи виходячи режимів роботи важеля автомату перекошу гелікоптера типу Мі-8МТВ-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезенні пасажирів та вантажів ТОВ авіакомпанії «НЗОПЕРЕЙШИНС» (додатки Д, Е):

1. Частота коливань в 3 Гц.
2. Температура випробувань 50-55 °С.

3. Навантаження на підшипник складало 3 кН в радіальному напрямі.
4. Амплітуда коливань складала $\pm 15^\circ$.
5. База проведення досліджень $1 \cdot 10^6$ циклів.
6. Контроль осьового зазору на наробітках в $1 \cdot 10^6$ та $2 \cdot 10^6$ циклів.
7. Швидкість ковзання складала 32,7 мм/с.

Слід зазначити, що стандартні підшипники типу ШН30ЮТ та GE30EW-2RS згідно [47] DIN ISO 12240-1 (DIN 648) виготовляються із зазором в 30-80 мкм, а дослідні зразки ШП були виготовленні із мінімальним зазором в 5 мкм. Зазначимо, що поверхні всіх полімерних КМ після випробувань були в задовільному стані. На поверхнях були відсутні пошкодження та вириви. Зазори всіх зразків після випробувань знаходилися в межах допуску в 0,3 мм, що підтверджується актом випробувань підприємства «AAL GROUP LTD» (додаток А).

Таблиця 5.1

Результати осьових зазорів шарнірних підшипників при промислових випробуваннях

№ зразка	Композиційний матеріал на зовнішній обоймі	Покриття на внутрішній обоймі	Матеріал внутрішньої обойми	Осьовий зазор (мкм) при наробітку, (циклів)		
				0	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
1	металополімерна стрічка	-	95X18Ш	45	170	200
2	fluroglide	хром	95X18Ш	50	145	155
3	zedex	-	95X18Ш	5	120	140
4	zedex	молібден	95X18Ш	5	120	135
5	zedex	молібден	R56260	5	125	140
6	iglidur	-	95X18Ш	5	100	120
7	iglidur	молібден	95X18Ш	5	95	120
8	iglidur	молібден	R56260	5	105	125

Аналізуючи результати випробувань дослідних зразків ШП, можна сказати, що осьовий зазор всіх зразки знаходяться в межах допуску навіть після 2 млн. циклів. Також для більш наочної картини потрібно представити результати

випробувань у вигляді де виключається початкове значення осьового зазору. На рис. 5.5 представлена гістограма результатів осьового зазору ШП без урахування початкового зазору.

Із гістограми (рис. 5.5) видно, що при помірних навантаженнях, в умовах випробувань наближених до реальних, вибрані полімерні КМ показали результати по зносостійкості кращі, ніж МПС. Це свідчить про те, що сучасні високомодифіковані інженерні пластики мають зносостійкість кращу (при певних умовах роботи), ніж МПС.

Підшипник компанії FLURO показує найкращі результати по зносостійкості – зменшення осьового зазору встановлено на 35 % менше, в порівнянні з МПС. Це підтверджується і дослідями лабораторних установок, і ресурсними лабораторними випробуваннями. Спочатку роботи даного підшипника відбувається обтиснення полімерного КМ і вдавлювання полімерного матеріалу PTFE у армовану тканину. В подальшому відбувається рівновага в зоні тертя і стабілізуються всі процеси тертя та зношування матеріалів, які беруть участь в роботі.

Дуже чітко із гістограми видно групи зразків 3, 4, 5 та 6, 7, 8. При аналізі зносостійкості підшипників із матеріалом Zedex ZX-324VMT прослідковується залежність, що при підвищенні температури та зменшення навантаження зносостійкість матеріалу більше, ніж при лабораторних ресурсних випробуваннях (рис. 5.1, 5.3). При умовах роботи, наближених до реальних зносостійкість полімеру Zedex ZX-324VMT перевищує металополімерну стрічку на 10-15 %. Також нанесення молібденового покриття в 0,1 мкм підвищує зносостійкість підшипника. Зносостійкість покриття молібдену на титановому сплаві показує результати такі ж самі, як і при ковзанні КМ по сталі 95X18Ш. Приблизно така сама картина прослідковується і у матеріалі Iglidur TX1, але зносостійкість його ще більше при цих умовах роботи, в порівнянні з МПС зменшення осьового зазору зафіксовано на 19-23 %.

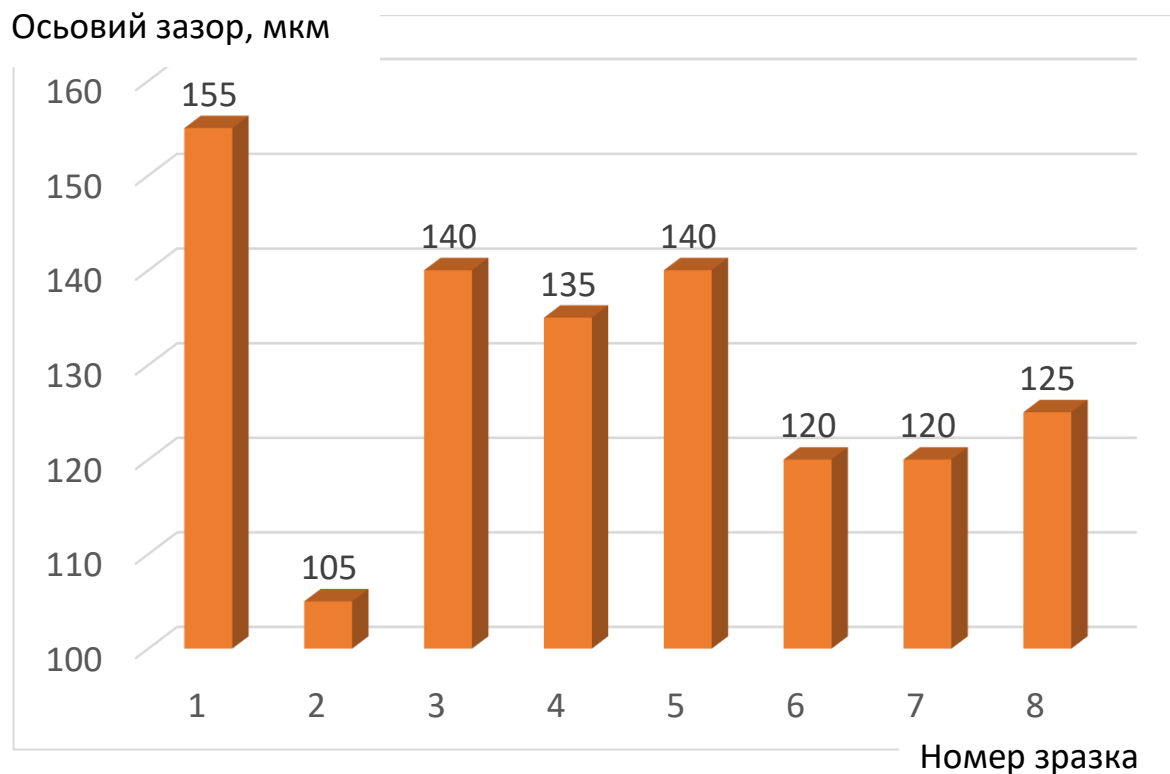


Рис. 5.5. Результати вимірювань осьового зазору зразків без урахування початкового зазору при наробітку в 2 млн. циклів коливань (номера зразків згідно табл. 5.1).

Цікавий факт в тому, що при заміні внутрішнього кільця ШП ковзання на титановий сплав із покриттям молібдену, зносостійкість досліджуваних композиційних матеріалів аналогічна їх зносостійкості по сталі. Таким чином, при малих або помірних навантаженнях заміна внутрішнього кільця ШП зі сталі на титановий сплав із захисним зносостійким покриттям молібдену [163] – перспективний варіант для авіаційної промисловості. В зв'язку з тим, що в літаках використання ШП є масовим то перевага у вазі при заміні сталі на титановий сплав буде дуже відчутною. При умові, що полімерний КМ не зноситься до критичного значення та зносостійке покриття на внутрішній обоймі теж буде працювати на весь період роботи ШП, то можливо виготовлення і зовнішніх обойм із титанових матеріалів.

5.3. Розробка технологічних рекомендацій щодо виготовлення шарнірних підшипників з вставками з композиційних матеріалів для авіаційної галузі.

Технологічні аспекти виготовлення підшипників ковзання із полімерними КМ та їх коректне встановлення у робоче місце це фактори, які багато в чому визначають працездатність на визначальних етапах експлуатації КМ та його довговічність в цілому.

Оскільки в роботі не ставилася мета змінити структури та наповнення сучасних полімерних КМ, то основна увага приділяється технологічним аспектам закріплення полімерного матеріалу на зовнішній обойми ШП. Згідно нормативних документів та умов роботи ШП вони сприймають як радіальне, так і осьове навантаження. Якщо для радіального навантаження спосіб встановлення полімерного КМ не такий важливий, то для осьових навантажень це критично. Оскільки зазвичай осьове навантаження повинно не перевищувати 0,3 від радіального, то саме спосіб закріплення полімерного матеріалу на зовнішній обоймі ШП буде відігравати вирішальну роль у довговічності та коректній роботі підшипника.

Існують декілька методів прикріплення полімерних КМ [164-167], і один із найбільш розповсюджених - це склеювання. Виконання раціональної технології склеювання забезпечує необхідну працездатність ШП. Порухення технологічного процесу у вигляді недостатньої підготовки поверхні під нанесення основи полімерного КМ призводить до порушень суцільності клейового шва.

Метою технологічної підготовки поверхні під полімерний КМ є очищення поверхонь від різних забруднень, які негативно впливають на міцність клейових сполук. Вибір способу підготовки поверхонь залежить від природи матеріалів, що склеюються, конструктивних особливостей виробу, умов експлуатації і типу використовуваного клею. Існуючі способи підготовки поверхні можна поділити на фізичні (механічні), хімічні та фізико-хімічні. Найбільш ефективними вважаються хімічні засоби підготовки. Після обробки або знежирення в деяких випадках наносяться захисні покриття (фосфатування, покриття дисульфідом молібдену,

зносостійкі покриття та ін.), що дозволяє досягати підвищення корозійної стійкості. Підвищення міцності та довговічності клейових сполук також досягається склеюванням деталей зі свіжопідготовленими поверхнями [168-170].

Деякі технології виготовлення ШП, розроблені раніше, мають низку недоліків. Наприклад, існуюча технологія виготовлення ШП, що включає обтискання (опресування) на пресі зовнішнього сирого кільця з препрегом навколо загартованого внутрішнього кільця, вимагає затвердіння покриття в печі і механічну обробку зовнішнього кільця. Цей недолік полягає в неможливості створення необхідного тиску затвердіння покриття за рахунок пружної деформації зовнішнього кільця ШП, що призводить до зменшення реальної опорної поверхні вузла і його несучої здатності.

Конструкції імпортованих ШП [171] мають на бічних поверхнях зовнішнього кільця спеціальний кільцевий бурт, який дозволяє формувати сферу не опресовуванням, а відгином бурта розкочуванням. Така конструкція підвищує якість ШП, але зовнішнє кільце залишається сирим, що обмежує сферу застосування таких підшипників.

На довговічність матриці істотно впливає вибір технології нанесення полімерного КМ. При використанні в якості матричного сполучника фенолоформальдегідних смол, спочатку виготовляють препрег - армуючу компоненту, просочену полімерним сполучником. Потім препрег фіксується на робочій поверхні трибосистеми і затвердіє при необхідному для матричного зв'язуючого, що застосовується, тиску і температурі. Так, якщо матричне сполучне отримано на основі епоксидних смол, виготовлення препрега неможливе через малу життєздатність епоксидного компаунду. Крім того, необхідно враховувати його плинність до певної стадії затвердіння і вимоги щодо низького тиску для забезпечення розмірної точності.

Загальна послідовність нанесення полімерних КМ на ШП, що приклеюються, складається з наступних технологічних етапів:

- підготовка зовнішньої обойми ШП, що включає механічну зачистку та викрійку матеріалу полімерного антифрикційного КМ;

- знежирення робочої поверхні підшипника та каркасу покриття;
- промазування епоксидним компаундом полімерного КМ та нанесення тонкого шару сполучника на поверхню зовнішньої обойми ШП;
- складання технологічного пакету та забезпечення силового замикання;
- витримка технологічного пакету під навантаженням до повного склеювання (затвердіння) сполучника.

Ця технологія прикріплення полімерного КМ на металевій поверхні достатньо популярна на сьогоднішній день. Але для забезпечення необхідного ресурсу та довговічності полімерних антифрикційних КМ необхідна конкретна технологія склеювання під кожен вид КМ і експериментальне відпрацювання цієї технології.

При використанні МПС у ШП ковзання фіксація на зовнішній обоймі підшипника відбувається за рахунок вдавлювання у створених заздалегідь (як правило механічними способом) рисок на поверхні (рис. 5.6, а) у стальну основу металополімерної стрічки (рис. 5.6, б).

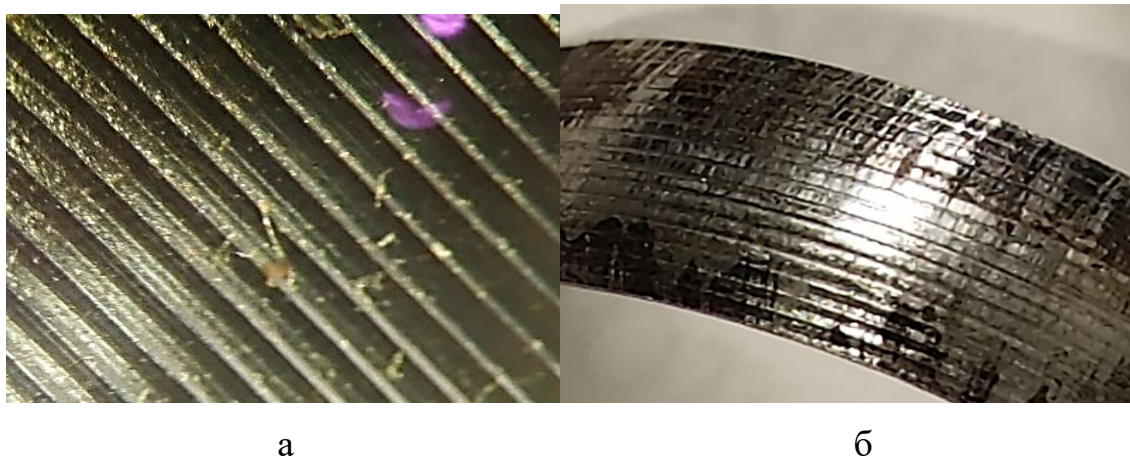


Рис. 5.6. Поверхні зразків зовнішньої обойми (а) та відповідної поверхні металополімерної стрічки (б) при фіксації її у шарнірному підшипнику.

Наявність повздовжніх ліній у підшипнику гарантує сприйняття ШП осьового навантаження. Цей спосіб актуальний лише для ШП малого діаметру до 12 мм. В такому випадку зборка ШП відбувається за рахунок сил здавлювання, а зовнішня обойма, як і МПС мають зони стику (рис. 5.7). Стик МПС позначається

на корпусі ШП та має враховуватись при установці підшипника в робоче положення.

При виготовленні підшипнику із більшим діаметром, фіксація МПС відбувається за рахунок пластичної деформації певної області ШП (рис. 5.8, а). Завальцювання буртів підшипника надійний та простий спосіб утримання матеріалу всередині, але накладає певні обмеження на твердість зовнішньої обійми ШП. У випадку виготовлення підшипників компанії FLURO на зовнішній обійми взагалі існує проріз (рис.5.8, б), що також накладає певні обмеження на встановлення та використання їх в авіаційної галузі.



Рис. 5.7. Зони стику зовнішньої обійми шарнірного підшипника (а) та металополімерної стрічки (б)

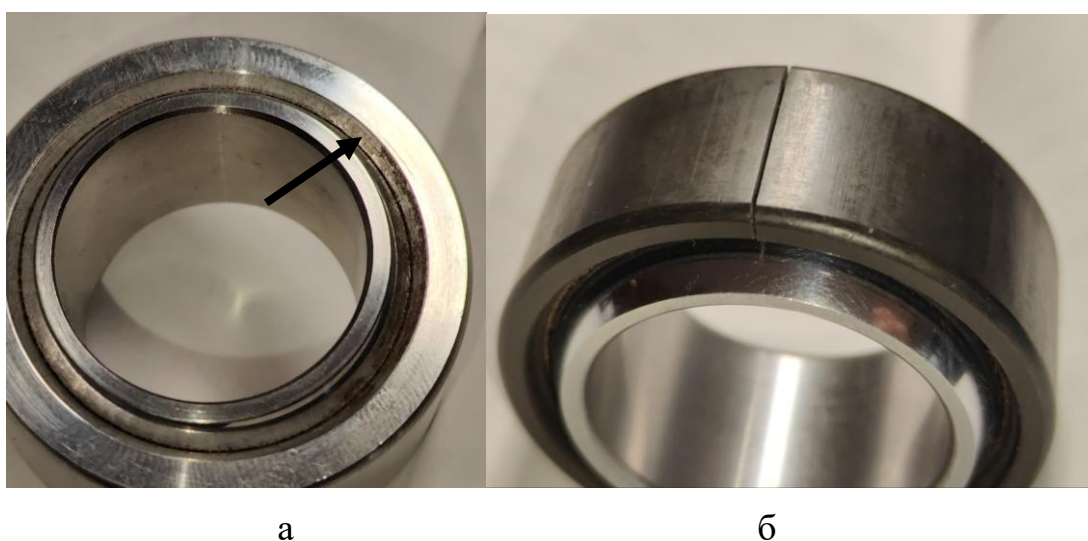


Рис. 5.8. Місце завальцювання металополімерної стрічки (а) та технологічний розріз (б) на зовнішніх обіймах шарнірних підшипників ковзання.

Отже, при виготовленні ШП в залежності від складу та виду КМ використовують різні технології фіксації матеріалів на зовнішніх обоймах. Оскільки сучасні антифрикційні КМ все частіше використовують замість металевих підшипників пропонується фіксувати полімерний КМ на зовнішній обойми за рахунок комбінованих дій склеювання та створення спеціальних рельєфних поверхонь [172-174].

Отже, при формуванні рельєфної поверхні слід враховувати, що товщина полімерного антифрикційного КМ H у ШП ковзання буде складатись із товщини рельєфу h_r металевої основи зовнішньої обойми підшипника та робочої товщини полімерного КМ h_p (рис. 5.9, а), який буде припрацьовуватись в процесі роботи (вираз 5.1). Робоча товщина полімерного КМ h_p можна визначати та задавати в залежності від умов роботи підшипника. Якщо керуватись нормативними документами [47] ЕТУ-100-4 та виходити із максимально допустимого зазору, то товщина складає близько 1 мм в залежності від розміру ШП.

$$H = h_r + h_p \quad (5.1)$$

де H – повна товщина антифрикційного полімерного КМ,

h_r – висота рельєфу внутрішньої поверхні зовнішньої обойми підшипника,

h_p – висота робочої товщини полімерного КМ який зношується в процесі експлуатації підшипнику.

Форму рельєфу поверхні пропонується створити у вигляді структурної системи з пірамідок (рис. 5.9, б). Така форма забезпечує максимальну поверхню контакту полімерного антифрикційного КМ із обоймою підшипника. Товщина рельєфу h_r внутрішньої частини зовнішньої обойми ШП теж визначається згідно умов використання та необхідного рівня надійності ШП. При збільшенні радіального навантаження на ШП висоту пірамідок можна зменшувати для рівномірного розподілення тиску, а при збільшенні осьового навантаження висоту пірамідок можна збільшувати.

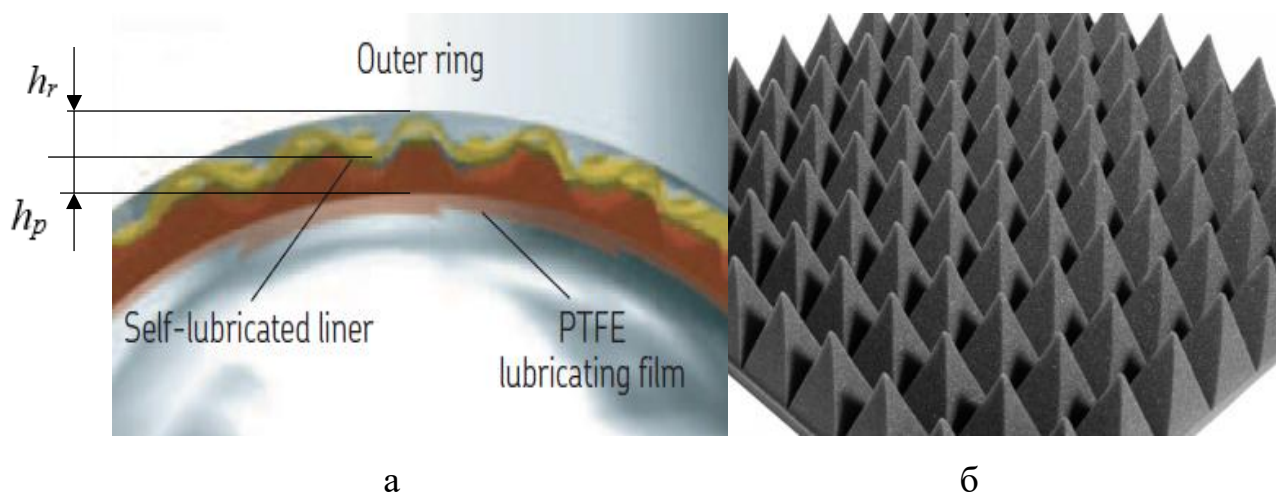


Рис. 5.9. Застосування рельєфної поверхні у вигляді структурної системи пірамідок (б) у шарнірному підшипнику та розподілення полімерного матеріалу в зоні тертя (а).

Висота рельєфу h_r буде також впливати на остаточну товщину полімерного КМ в ШП H . В залежності від трибомеханічних характеристик антифрикційних полімерних КМ та виходячи із умов надійності та характеру навантажень параметри пов'язані із рельєфом та товщиною полімерного композиційного покриття можна змінювати.

Враховуючі, що конструкцій за схемою армування антифрикційних полімерних КМ є декілька то і процес їх фіксації на зовнішню обойму підшипника буде відрізнятись. У випадку використання спеціальних армованих тканин із волокнами оптимальним варіантом буде звичайне приклеювання полімерного Км до обойми підшипника. Але якщо використовуємо матеріал, який включає армування дискретним вуглеволокном з розміром біля 1 мм або нановолокном, яке знаходиться у полімерній матриці в хаотичному порядку, то логічним буде використання технології лиття під тиском полімерних КМ.

Таким чином, при виготовленні ШП із титанових сплавів зовнішня поверхня внутрішньої обойми та внутрішня поверхня зовнішньої обойми підшипника покривається захисними покриттями (молібден, хром, кераміка та ін.). Потім необхідна оправка для фіксування обойм підшипника відносно один одного. І наступним етапом буде приклеювання полімерного КМ в проміжок між обоймами ШП. Це класична розповсюджена технологія при виготовленні втулок ковзання та

ін. із полімерних КМ, яка не потребує використання великих коштів та нового обладнання.

Отже, підсумовуюче все вище зазначене та із урахуванням проведених досліджень полімерних антифрикційних КМ та підшипників, можна визначити наступні технологічні рекомендації щодо розробки та виготовлення ШП ковзання в авіаційній промисловості:

1. Використання титанових матеріалів при виготовленні обойм підшипників ковзання. При використанні великої кількості або великих діаметрів підшипників в авіаційної галузі дозволить суттєво зменшити вагу повітряного судна (додаток Г).

2. Використання захистних зносостійких покриттів (молібдену, хрому, керамічні покриття та ін.) на обоймах ШП ковзання для забезпечення надійної працездатності підшипника у випадку зношування полімерного КМ.

3. Використання спеціального рельєфу на внутрішній поверхні зовнішньої обойми ШП. Рельєф у вигляді структурної схеми з пірамідок можна виготовляти із різними параметрами в залежності від умов роботи та навантаження підшипника.

4. Використовувати сучасні антифрикційні полімерні КМ замість універсальної МПС. Це дозволить використовувати в роботі всю товщину полімерного КМ між обоймами підшипника із однаковими трибологічними характеристиками на всьому проміжку життєдіяльності ШП.

5. В залежності від структури полімерного КМ використовувати лиття під тиском (для полімерних КМ із подрібненими армованими волокнами) або метод приклеювання (для полімерних КМ із «неперервними» армованими волокнами) при виготовленні ШП із антифрикційними покриттями.

Впровадження технологічних рекомендацій у виробництво ШП дозволить відійти від традиційної технології виготовлення ШП та підвищити їх зносостійкість та довговічність в цілому за рахунок використання повної товщини полімерного КМ. Оскільки, на сьогоднішній день в ПС намагаються переводити агрегати та вузли на роботу без ТО в міжремонтний період, то виробництво ШП із прогнозованими характеристиками під конкретну задачу це найоптимальніший варіант.

Висновки до розділу 5

1. За результатами лабораторних ресурсних випробувань встановлена висока працездатність полімерних композиційних матеріалів Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX 1, Fluroglide. Максимальний осьовий зазор в 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).

2. 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. Також встановлено, що до наробітку до 60 тис. циклів шарнірний підшипник із металополімерною стрічкою показує результаті гірші по зносостійкості, ніж полімерні композиційні матеріали, але всі ці результати лежать в полі допусків нормальної роботи підшипників.

3. За результатами стендових випробувань шарнірних підшипників з імітацією режимів роботи важеля автомату перекошу гелікоптера типу Мі-8MTV-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 %, в порівнянні з осьовим зазором шарнірних підшипників з металополімерною стрічкою.

4. Промисловими випробуваннями доведено, що при заміні внутрішнього кільця шарнірного підшипника ковзання на титановий сплав із покриттям моібдену зносостійкість композиційних матеріалів аналогічна їх зносостійкості по сталі. При малих або помірних навантаженнях заміна внутрішнього кільця шарнірного підшипника зі сталі на титановий сплав із захисними зносостійкими покриттями дає суттєвий виграш у вазі повітряних суден.

5. Розроблені технологічні рекомендації щодо виробництва шарнірних підшипників ковзання із полімерними антифрикційними композиційними покриттями 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 із прогнозованими характеристиками під певні експлуатаційні умови роботи без технічного обслуговування в міжремонтний період.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано принципи вибору антифрикційних, зносостійких матеріалів полімерних композиційних матеріалів для необслуговуваних 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 підшипників ковзання для авіаційної промисловості.

3. Встановлено, що в композиційних матеріалах армуючі компоненти та наповнювачі відіграють першочергове значення в забезпеченні їх зносостійкості при підвищенні 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% MoS₂ – 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 BT22 замість підшипникової сталі 95X18Ш до 20 %, в залежності від матеріалу та умов навантажень.

7. Запропоновано використання сплаву BT-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 BT-22 характеризується зменшенням лінійного зносу в 2,6 та 1,2 рази за рахунок більшої демпфуючої здатності титанового сплаву BT-22 в умовах вібрацій, в порівнянні з покриттям на сталі 95X18Ш.

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 відрізьку 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 перекоосу гелікоптера типу Мі-8MTV-1 після 2 млн. циклів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ БІБЛЮГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин: Навч. посіб. Київ: Інформавтодр, 2006. 216 с.
2. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: Навч. посіб. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І.Пулую, 2011. 322 с.
3. Мнацаканов Р.Г. Мікосянчик О.О., Туриця Ю.О. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь, *Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 6-10 червня 2012 р., Севастополь, Крим, Україна: тези доп. Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. Т. 12. С. 24-25.*
4. Mens J.W.M., de Gee A.W.J. Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water. *Wear*. 1991; 149, pp.255-268.
5. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znosostiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennia ta rozrakhunok trybosy-stem kovzannia, metody pidvyshchennia dovhovichnosti i znosostiikosti. Drohobych: KOLO, 2001. 492 s.
6. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znoso-stiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.2. Poverkhneve zmitsnennia kons-truktsiinykh materialiv trybosystem kovzannia. - Drohobych: KOLO. 2001. 512 s.
7. Chernets M., Kelbinski Yu., Skvarok Yu. Otsinka dovhovichnosti, znoshuvannia ta kontaktnoi mitsnosti zubchastykh peredach / Pid zah. red. M.V.Chernetsia. Drohobych: Vymir, 2002. 128 s.
8. Zsidai L; De Baets P; Samyn P; Kalacska G; Van Peteghem A.P.; Van Parrys F. The tribological behaviour of engineering plastics during siliding friction investigated with small scale specimens. *Wear* 2002; 253:673–88.
9. Polyakov R., Savin L. The Method of Long-Life Calculation for a Friction Couple “Rotor – Hybrid Bearing” *Proceedings of the 7th International Conference on*

Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017. Rhodes Island: International Center for Numerical Methods in Engineering. 2017. P. 433–440.

10. Kolesnikov I.V., Mukutadze A. M., Avilov V.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply: ICIE 2018 *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. 2019. P. 1049–1062. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_110

11. Андрійків А.Е., Чернець М.В. Оцінка контактної взаємодії деталей машин, що труться. К.: Наук. Думка, 1991. 60 с.

12. Dwyer-Joyce R.S. PEEK Composites as Self-Lubricating Bush Materials for Articulating Revolute Pin Joints. *Polymers*. 2020; 12 (3): 665.

13. Jozwik J., Dziedzic K., Barszcz M. and Pashechko M. Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites. *Materials* 2020, 13, 75, 1-24.

14. API STANDARD 617 Axial and centrifugal compressors and expander-compressors. 9th Edition. 2014.

15. Henry Y., Bouyer J., Fillon M. An experimental analysis of the hydrodynamic contribution of textured thrust bearings during steady-state operation: A comparison with the untextured parallel surface configuration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2015. Vol. 229. Iss. 4. P. 362–375. <https://doi.org/10.1177/1350650114537484>

16. Koch T., Laabid A. Reduction of hot oil carry over in high speed running turbo application bearings. Book of Abstracts 12th EDF / *Prime Workshop: Futuroscope, September 17 & 18, 2013* "Solutions for performance improvement and friction reduction of journal and thrust bearings". P. 6.

17. Rajeshkumar L., Saravanakumar A., Bhuvaneswari V., Gokul G. Optimization of wear behaviour for AA2219-MoS₂ metal matrix composites in dry and lubricated condition *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 2645–2649. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.087>

18. ISO 12130-3:2001 Sliding bearings: Hydrodynamic sliding tilting pad thrust bearings under steady-state conditions. Part 1-3: Guide values for the calculation of tilting pad thrust bearings.

19. Schüler E., Berner O. Improvement of tilting-pad journal bearing operating characteristics by application of eddy grooves. *Lubricants*. 2021. Vol. 9. Iss. 2. Paper ID 18. 14 p. <https://doi.org/10.3390/lubricants9020018>

20. Берладир К.В., Руденко П.В., Дядюра К.А., Устименко М.С. Антифрикційні політетрафторетиленові композити нового покоління *Матеріали конференції «Композити та склопластики – вектор розвитку», 25-26 травня 2016 р. Запоріжжя, 2016. С. 19–20.*

21. Cemal Basaran, Cartwright A., Ying Zhao. Experimental Damage Mechanics of Microelectronics Solder Joints under Concurrent Vibration and Thermal Loading *International Journal of Damage Mechanics*. 2001. Vol. 10. P. 153-170.

22. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009/>

23. Патент № 151145, Україна, (МПК) F16C/00. Опорний підшипник ковзання / Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Муранов Є.С. № u2021 07750; appl. 09.06.2022; публ. 08.06.2022, Бюл. № 23. 4 с.

24. Pat. 4.108.381 USA. Rocket nozzle bearing seal / P.C. Sottosanti, W.H. Baker, W.T. Dolling (USA) ; *Thiokol Corporation (USA)*. - № 803487 ; filed. 06.06.77 ; publ. 22.08.78 ; HKU 308-238. - 5 p.

25. Патент 149228 України. Експериментальна установка/ Чернець М.В., Корнієнко А.О., Кіндрачук М.В., Чернець Ю.М., Священко Ю.І., Семак І.В. // u202102944; заявл. 01.06.2021; опубл. 27.10.2021, Бюл. №43. 4 с.

26. Antonov An-124-100 Aircraft Operation Maintenance Manual Book 1. 1999. 568 p.

27. B. S. Ünlü, E. Atik, and S. Köksal, Tribological properties of polymer-based journal bearings, *Mater. Design*, 2009.vol. 30, no. 7 p. 2618–2622.

28. Budnik O.A., Budnik A.F., Rudenko P.V., Sviderskiy V.A., Berladir K.V. Influence of mechanical activation polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites at its structural and phase transformations and properties *Functional Materials*. 2015. 22, No.4. P. 499–506.
29. Скуратівський А.К. Підшипники ковзання. Навчальний наочний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 38с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31982/1/Pidshypnyky_kovzannia.pdf
30. Gelenklager Gelenköpfe Spherical Plain Bearings Rod Ends - Home-en. Gelenklager Gelenköpfe Spherical Plain Bearings Rod Ends - Home-de. URL: <https://www.fluro.de/index.php/en>
31. Куницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Київ: Наукова думка, 2002. 660 с.
32. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань: *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 2. Ч1, Т1. С. 71–73.
33. Божидарнік В.В., Григор'єва Н.С., Шабайкович В.А. Технологія виготовлення деталей: навч. посіб. – Луцьк: Надстир'я, 2006. 612 с.
34. Васильків В.В., Радик Д.Л. Експериментальні дослідження в технології машинобудування. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. 256 с.
35. Rajeshkumar L., Saravanakumar A., Bhuvaneswari V., Gokul G. Optimization of wear behaviour for AA2219-MoS₂ metal matrix composites in dry and lubricated condition. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 2645–2649. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.087>
36. Kumar S., Sekar A., Govinda K. Aerostatic Spherical Bearing Manufacturing Methods and Criticalities - An Approach. *Applied Mechanics and Materials* 592-594 (2014): 28–32. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.592-594.28>
37. Шкурятяний Ю.В., Стучинський М.О. Кульові шарніри, технічні вимоги: Науково-виробничий журнал. 2014. № 2 (238). 54 с

38. Earles L.L., Palazzolo A.B., Armentrout R.W. A Finite Element Approach to Pad Flexibility Effects in Tilt Pad Journal Bearings: Part I - Single Pad Analysis. *Journal of Tribology* 112, № 2.1990: 169–76. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2920238>
39. Kokoreva O.G., Fadeev F.O. Results of research of hardness of samples under strengthening by methods of surface-plastic deformation. *Journal of advanced research in technical science*. 2019. №. 13. P 60–62. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-13-60-62>
40. Оптимізація технології нанесення покриттів за критеріями міцності та зносостійкості / Ляшенко Б.А. та ін.; під ред. В.В. Харченко. Київ: Ін-т проб. міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України, 2010. 193 с.
41. Богуслаїв В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технічне забезпечення а прогнозування несучої здатності деталей ГТД. Запоріжжя: Мотор Січ, 2006. 335 с.
42. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. Київ, 2007. 40 с.
43. Chen J.F., Zhang R.J., Su Xia Zhang, Xu Z.B., Shi J. R. Study on Spherical Face Grinding of Gcr15-Bearing-Steel Spindle Pivot by CBN Wheels. *Key Engineering Materials* 2004. 259-260 P. 307–11. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.259-260.307>
44. Sitae K., Byun S., Suh J. Effects of Tilting Pad Journal Bearing Design Parameters on the Pad-Pivot Friction and Nonlinear Rotordynamic Bifurcations. *Applied Sciences* 2020: no. 16: 5406. <http://dx.doi.org/10.3390/app10165406>
45. Gopinath, K., Raghavendra K., Behera M.K., Subba Rao E. V., Umakanth M., Gopinath S. Product Design Aspects for Design of Accurate Mass Properties Measurement System for Aerospace Vehicles. *Applied Mechanics and Materials* 110-116 (2011): 4712–18. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.110-116.4712>
46. San A., Luis H., Hussain K., Manish T. On the Effect of Supplied Flow Rate to the Performance of a Tilting-Pad Journal Bearing-Static Load and Dynamic Force Measurements. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2020. 142, p. 12. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4048798>

47. Міжнародний стандарт ISO 6124/1-82, ISO 6124/2-82, ISO 6124/3-82, ISO 6125/1-82 Шарнірні підшипники ковзання. 27 с.
48. Li W., Wood A., Weidig R., Mao K. An Investigation on the Wear Behavior of Dissimilar Polymer Gear Engagements, *Wear*, 2011. Vol. 271, P. 2176-2183.
49. Sandip P., Mihir S., Roy S.K. An Analytical Model of Mechanistic Wear of Polymers. *Journal of Tribology*. 2018. Vol. 140 / 011609-1.
50. Міжнародний стандарт ISO 7505-3-99 Підшипники ковзання. Втома підшипників ковзання. Випробування гладких смуг з металевого багатошарового підшипникового матеріалу. 01.09.2001.
51. Міжнародний стандарт ISO 7505-4-99 Підшипники ковзання. Втома підшипників ковзання. Випробування папіввкладишів з металевого багатошарового підшипникового матеріалу. 01.09.2001.
52. Coghlan, David M., Dara W. Childs. Characteristics of a Spherical-Seat TPJB With Four Methods of Directed Lubrication-Part I: Thermal and Static Performance. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017. 139, no. 12. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4036969>
53. Coghlan, David M., and Dara W. Childs. "Characteristics of a Spherical Seat TPJB With Four Methods of Directed Lubrication-Part II: Rotordynamic Performance." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 139, no. 12 (August 23, 2017). <http://dx.doi.org/10.1115/1.4036970>
54. Williams J. Mi-8MTV-1 RTE Книга1 / PDF. Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/517125550/Mi-8MTV-1-RTE-Kniga1>
55. Звіт НДР № 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». Національний авіаційний університет. К.: 2016. 27 с.
56. Звіт з НДР № 1.0668.2021 «Випробування підшипників ШНР6ЮТ та ШН10ЮТ і проведення їх аналізу відповідності ГОСТУ 3635-78. Експертний аналіз

працездатності та геометрії підшипників ШНР6ЮТ, ШН10ЮТ». Національний авіаційний університет. К.: 2021. 14 с.

57. Akhmatov A. S. Molecular physics of boundary friction. *Jerusalem* : Israel Program for Scientific Translations, 1966. 480 p.

58. Al-quraan Tareq M.A., Tareq M.A. Al-quraan, Mikosyanchik O.O., Mnatsakanov R.G. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. 2017. Vol. 5, № 2. P. 78–86.

59. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability // *Vibroengineering Procedia*. 2020. Vol. 30. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>

60. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009/>

61. Vasilenko V.V., Kirishchieva V. I., Mukutadze M. A., Shvedova V. E. Investigation of the WearResistance of a Journal Bearing with Polymer-Coated Grooved Support Ring. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 365–372. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372>

62. Dimond T., Amir A., Paul A., Nicholas J. Modal Frequency Response of a Four-Pad Tilting Pad Bearing With Spherical Pivots, Finite Pivot Stiffness, and Different Pad Preloads. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2013. 135, no. 4. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4024093>

63. Чернець М.В., Корнієнко А.О. Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 1. Поліаміди. *Проблеми тертя і зношування*. 2022, №1. С. 17-26.

64. Chernets M., Pashechko M., Kornienko A., Buketov A. Study of the Influence of Temperature on Contact Pressures and Resource of Metal-Polymer Plain Bearings with Filled Polyamide PA6 Bushing. *Lubricants*, 2022, Vol. 10 (1), p.16.

65. Чернец М.В., Корнієнко А.О., Руденко П.В. Трибологічна поведінка полімер-них матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 4. Політетрофторетилен (фторопласти). *Проблеми тертя та зношування*, 2022. № 2(95). С. 27 – 34.

66. Seabra CL, Babbista MA. Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar. *Wear*. 2002. 253. 394–402 p.

67. Kalácska G. An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. *eXPRESS Polymer Letters*. 2013. Vol.7 (2), P. 199–210.

68. Heinrichson N., Ferreira S.I. Reducing Friction in Tilting-Pad Bearings by the Use of Enclosed Recesses. *Journal of Tribology* 2007. 130, no. 1. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2805428>

69. Lancaster J.K. Third body formation and the wear of PTFE fibrbased dry bearings./ J.K. Lancaster, P.Play, M.Godet et all. *Trans. ASME, Lubric. Technol.* 1990. Vol.102. N2. P.236-246.

70. Zhiyin Z. Computational and Experimental Characterization of Continuously Fiber Reinforced Plastic Extrusions: Part II Long-Term Flexural Loading.// *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, 2004. Vol.23. P.799

71. Yasushi M., Miyano Y., Nakada M. Hongneng Cai Formulation of Long-term Creep and Fatigue Strengths of Polymer Composites Based on Accelerated Testing Methodology. *Journal of Composite Materials*, 2008. Vol.42. P. 1897-1919.

72. Pramanick A., Sain M. Nonlinear Viscoelastic Creep Prediction of HDPE-Agrofiber Composites. *Journal of Composite Materials*, 2006. Vol.40. P.417-431.

73. Чернець М.В., Корнієнко А.О., Іщенко А.О. Радіоненко О.В. Трибоекспериментальні дослідження композитного антифрикційного полімеру ДК6 та ДК6+Бронза для триботехнічних систем ковзання // *Проблеми тертя та зношування*, 2021. № 2(91). С. 10 – 17.

74. Чернець М., Корнієнко А., Чернець Ю. Дослідження впливу коригування зубів циліндричних косозубих металополімерних передач на несучу здатність та довговічність: Част. 2. Довговічність передач. *Проблеми тертя та*

зношування. 2022. № 3(96). С. 22–29. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(96\).16832](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(96).16832)

75. Чернець М., Корнієнко А. Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 3. Полієфіркетони, терефталани. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. № 2(95). С. 19–26. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(95\).16553](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(95).16553)

76. International Standard ISO 7148-2. Plain bearings – testing of the tribological behaviour of bearings materials. Part 2. Testing of polymer – based bearing materials. 10.01.2012.

77. Чернець М.В., Романенко Є.О., Корнієнко А.О., Чернець Ю.М. Методологічні основи розрахунку металевих і металополімерних підшипників ковзання: Контактна міцність, зношування, довговічність. К.: НАУ, 2022. 283 с.

78. Чернець М.В., Романенко Є.О., Корнієнко А.О., Чернець Ю.М. Методологічні основи розрахунку металевих і металополімерних підшипників ковзання: Контактна міцність, зношування, довговічність. Том. 3. Металополімерні передачі. – К.: НАУ, 2022. – 250 с.

79. Мікосянчик О.О. Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи: автореферат дисертації...док. техн. наук: 05.02.04. Національний авіаційний університет. – Київ, 2017. – 43 с.

80. Naohisa T., Yoichi K., Kazuo U. A Study on Plastic Rolling Bearings. Coefficient of Friction of Plastic Ball Bearings. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series* 1997. C 63, no. 611. 2496–503. <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.63.2496>

81. Yongjun D., Zhu W., Zhang X, Guo J. Design of Special Plastic Bearings and Their Application in Renewable Energy Conversion System." *Open Materials Science Journal* 2015. 9, no. 1 203–9. <http://dx.doi.org/10.2174/1874088x01509010203>

82. Hitonobu K., Honda T., Kida K., Costa S.E., Rozwadowska J., Houru K., Uryu M., Kashima Y., Kanemasu K.. Influence of Radial Load on PEEK Plastic Bearings

Life Cycle under Water Lubricated Conditions. *Advanced Materials Research* 2011. P.217-218: 1260–65. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.217-218.1260>

83. Peiyu H., Wang Y., Liu H., Guo E., Wang H. Influence of the elastic and elastic-plastic material parameters on the mechanical properties of slewing bearings. *Advances in Mechanical Engineering* 2021. 13, no. 1 168781402199215. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814021992151>

84. Zygmunt R. Adhesion and wear in miniature plastic bearings. *Wear* 1991. 142, no. 1 185–93. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90160-v](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90160-v)

85. Ivanochkin P.G., Bolshikh I.V., Talakhadze T.Z., Bolshikh E.P. Application of antifriction polymer composite coatings in the brake lever transmission of locomotives *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2022. № 1. P. 16-22. DOI10.46973/0201-727X-1-16

86. Mashkov Y. K. Physicochemical processes in metal-polymer tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, no. 5. P. 354–358. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366612050078>

87. Mashkov Y. K. Physicochemical processes in metal-polymer tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, no. 5. P. 354–358. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366612050078>

88. Bolshikh A., Borovkov D., Ustinov B. Investigation of the local area damage influence on the load-bearing capacity of the reinforced composite panels. *Aerospace Systems*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s42401-023-00214-9>

89. Struchkova T. S., Okhlopkova A. A., Sleptsova S. A. Triboengineering properties of polytetrafluoroethylene modified by thermally expanded graphite. *Journal of Friction and Wear*. 2008. Vol. 29, no. 5. P. 381–385. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366608050097>

90. ГОСТ 23.211-80. Методика досліджень на фретинг та фретинг-корозію. М. 1980. 24 с.

91. Mashkov Y. K. Nanostructural self-organization and dynamic adaptation of metal–polymer tribosystems. *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, no. 2. P. 282–286. URL: <https://doi.org/10.1134/s1063784217020190>

92. Калда Г.С., Шевеля В.В., Дворук В.І., Радченко О.В. Моделювання зношування при фретинг-корозії металів. *Вісник Технологічного університету Поділля*. Хмельницький: ТУП. 1999. № 2. С. 6 – 10.
93. Glisson T. H. Introduction to system analysis. New York: McGraw-Hill, 1985. 700 p.
94. Ljung L. Modeling of dynamic systems. Englewood Cliffs, N.J : PTR Prentice Hall, 1994. 361 p.
95. Opala M., Korzeb J., Koziak S., Melnik R. Evaluation of Stress and Fatigue of a Rail Vehicle Suspension Component. *Energies* 14. 2021. no. 12: 3410. <http://dx.doi.org/10.3390/en14123410>
96. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохімія та реологія зносостійкості. Хмельницький: ХНУ, 2006. 278 с.
97. Zhu M.H., Zhou Z.R. An investigation of molybdenum disulfide bonded solid lubricant coatings in fretting condition *Surface and Coating technology*. 2001. № 141. P. 240 – 245.
98. Gladchenko A.N., Shevelya I.V. Endurance rheology of metal-polymeric tribosystems. Khmel'nitskiy: Univer, 2001. 183 p.
99. Khelnitsky E., Kogan K. Optimal policies for aggregate production and capacity planning under rapidly changing demand conditions. *International Journal of Production Research*. 1996. Vol. 34, no. 7. P. 1929–1941. URL: <https://doi.org/10.1080/00207549608905005>
100. Theory and experiment. Handbook of Mechanical Stability in Engineering. 2013. P. 1409–1459. URL: https://doi.org/10.1142/9789814383769_0021
101. Waterhouse R. B. Fretting corrosion. Oxford : Pergamon Press, 1972. 253 p.
102. Molgaard J. Die Entwicklung von Verschleissprozessthesen, Schmiertechnik und Tribologie, 23, 1986. p. 126.
103. Cellier F. E. Automated Model Synthesis. *Continuous System Modeling*. New York, NY, 1991. P. 703–741. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3922-0_15
104. Few A. A. System behavior and system modeling. 3rd ed. Sausalito, Calif : University Science Books, 1996. 100 p.

105. Abdelbary A. Simulation and Modeling of Tribo-Systems. *Extreme Tribology*. 2020. P. 275–297. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429448867-10>
106. Farris T. N., Sundaram N. Fretting Contact and Simulation. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, 2013. P. 1277–1283. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_538
107. Denchev Z., Dencheva N. Preparation, Mechanical Properties and Structural Characterization of Microfibrillar Composites Based on Polyethylene/Polyamide Blends. *Synthetic Polymer-Polymer Composites*. München, Germany, 2012. P. 465–524. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-56990-525-8_14
108. Мисковець С.В., Савчук П.П. Зносостійкість бронзових деталей паливної апаратури в середовищі дизельних палив *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 1. С. 208-212. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm_i_2014_1_30
109. Dmitrichenko, N. F., Milanenko, A. A., Savchuk, A. N. Improving the efficiency of lubricants by introducing friction modifiers for tracked vehicles under stationary conditions of friction. *Journal of Friction and Wear*. 2016. 37 (5), 441–447. doi: <http://doi.org/10.3103/s1068366616050044>
110. Gorlenko A. O., Davydov S. V., Erokhin A. N. Tribodiagnostics spherical plain bearings. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. 2017. P. 9–13. URL: <https://doi.org/10.14489/hb.2017.12.pp.009-013>
111. Rowe W. B. Spherical Bearings. Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design. 2012. P. 275–287. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396994-1.00013-9>
112. 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.
113. Хімко М.С., Якобчук О.Є., Хімко А.М., Науменко Н.О. Методика випробувань шарнірних підшипників на зносостійкість. *Проблеми тертя та зношування*. К.: НАУ, 2017, 1(74), С.118-122. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18431](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18431)

114. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. №1(98). С. 55-62
115. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз та інтерпретація зносу полімерних матеріалів на основі трибомеханічних досліджень. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. №4(101). С. 52-59.
116. Spherical Race Bearings. Encyclopedia of Tribology. Boston, MA, 2013. P. 3225. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_101292
117. Wang F., Wang H. Geometry of Spherical/Aspheric Bearings. Encyclopedia of Tribology. Boston, MA, 2013. P. 1533–1543. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1
118. Shevelya V. V., Kalda G. S., Sokolan Y. S. Tribological and Rheological Properties of Thermally Treated Steel under Reverse Friction. *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40, no. 2. P. 156–162. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366619020120>
119. Shevelya V. V., Kalda G. S., Sokolan Y. S. On the Connection between the Relaxation and Dissipative Processes during Steel Friction. *Journal of Friction and Wear*. 2020. Vol. 41, no. 2. P. 146–152. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366620020142>
120. Li Z. Non-stationary friction-induced vibration with multiple contact points. *Nonlinear Dynamics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08321-0>
121. Гладкий Я.М., Волинський Б.С., Бись С.С. Вплив мікропластичності та поверхневої міцності на трибологічні характеристики матеріалів *Проблеми трибології*. 2002. №2. С.158-162.
122. Varenberg M., Halperin G., Etsion I. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. *Wear*. 2002. № 252. P. 902 – 910.
123. Zhu M.H., Zhou Z.R. An investigation of molybdenum disulfide bonded solid lubricant coatings in fretting condition *Surface and Coating technology*. 2001. № 141. P. 240 – 245.

124. Shevelya V.V. Special Aspects of Metals Contact Corrosion under Conditions of Low-Amplitude Fretting *Trenie i Iznos*. 2021. Vol. 42, no. 1. P. 42–51. URL: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-1-42-51>

125. Suslov A. G. Functionally-oriented technologies of working surfaces treatment for automotive parts. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2014. Vol. 8, no. 1-2. P. 107–109. URL: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67786>

126. Духота О.І. Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії: дис...д-ра техн. Наук: 05.02.04 / НАУ. К.; 2019. 417 с

127. Духота О. І. Концептуальний підхід до створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості *Проблеми тертя та зношування*. 2017. №1 (74). С. 97 – 103.

128. Friedrich K., Zhang Z., Klein P. Wear of Polymer Composites. *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*. Chichester, England, 2014. P. 269–290. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470017029.ch11>

129. Bronzes E. A. Friedland et al. The Oxford Handbook of Roman Sculpture. 2015. URL: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199921829.013.0008>

130. Mechanical Micromachining. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg, 2019. P. 1176. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_300418

131. Dintcer A. I. Application of metal-polymer plain bearings for heavily loaded friction angles. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021. S-I, no. 1. P. 335–337. URL: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-1-s-i-335-337>

132. Хімко А.М. Підвищення зносостійкості деталей із титанових сплавів плазмовими покриттями. дис...кан. техн. наук: 05.02.04 НАУ. К.; 2008. – 182 с.

133. Shevelya V. V., Sokolan Y. S. Dynamic Relaxation Processes in Steel Friction Under the Action of Heat Treatment. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, no. 4. P. 524–531. URL: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9685-4>

134. Al-Haik M., Vaghar M.R., Garmestani H, Shahawy M. Viscoplastic analysis of structural polymer composites using stress relaxation and creep data. *Composites. Part B*. 2001. Vol.32. P.65-70

135. Qiu M. Friction and Wear Characteristics of Spherical Plain Bearings with PTFE Woven Liners *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 199-200. P. 763–766. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.199-200.763>

136. Glasunov S. G. Critical Review Titanium Alloys for Different Branches of Engineering. *Titanium and Titanium Alloys*. Boston, MA, 1982. P. 2087–2091. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1758-7_43

137. Хімко А.М. Фретингостійкість сплаву ВТ-22 з авіаційними матеріалами *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* К.: НАУ, 2006. Вип. 46. С. 84 – 90.

138. Краля В.А., Хімко А.М. Рекомендації щодо відновлення пошкоджень деталей літаків, виготовлених із титанових сплавів *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції АВІА-2006, 25 – 27 вересня*, Т. II, К.: НАУ, 2006, С. 3.46 – 3.49.

139. Kralya V.A., Khimko A.N., Borodiy V.N., Yakobchuk A.Y. Facilities for restoration of monorail of mechanization of a wing of aircrafts *Вісник НАУ*, К.: НАУ, № 3, 2006, С. 57 – 59.

140. Звіт з НДР №133Х-92 «Виконати дослідження працездатності захисних покриттів та зміцнювальних технологій для відновлення рейок механізації крила літака». КІПА. К: 1992. 44 с.

141. Звіт НДР №549-Х08 (АН01-60(08) «Проведення досліджень та видача рекомендацій по вибору покриттів вузлів шасі». НАУ. К.: 2009. 42 с.

142. Шевеля И.В. Research of external friction and mechanical losses of polymermetallic systems. *Proceedings of the National Aviation University*. 1998. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.1.10993>

143. Alyab'ev A.Y. Investigation of resistance of filled Teflon coatings to fretting corrosion / *Soviet Materials Science*. 1978. Vol. 13, no. 2. P. 177–180. URL: <https://doi.org/10.1007/bf00715330>

144. Kragelsky I.V., Alisin V.V. Friction Wear Lubrication: Tribology Handbook. Elsevier Science & Technology Books, 1981.

145. Pisarenko G. S. A new approach to the description of the hysteresis loop in the theory of mechanical oscillations. *Strength of Materials*. 1971. Vol. 3, no. 6. P. 646–648. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01533586>

146. Golovin S. A., Golovin I. S. Mechanical spectroscopy of Snoek type relaxation. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 54, no. 5-6. P. 208–216. URL: <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9483-6>

147. Piguzov Y.V. Investigation of the Behavior of Interstitial Atoms in Molybdenum by the Internal Friction Method *Internal Friction in Metals and Alloys*. Boston, MA, 1967. P. 15–17. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4725-3-2>.

148. Kokhanovsky V. A., Glazunov D. V. A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System. *Journal of Friction and Wear*. 2020. Vol. 41, no. 6. P. 531–537. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366620060100>

149. Gogoleva O. V., Okhlopkova A. A., Petrova P. N. Development of self-lubricating antifriction materials based on polytetrafluoroethylene and modified zeolites. *Journal of Friction and Wear*. 2014. Vol. 35, no. 5. P. 383–388. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366614050055>

149. Mashkov Y. K. Physicochemical processes in metal-polymer tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, no. 5. P. 354–358. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366612050078>

150. Dixit U.S. Modeling of friction in manufacturing processes *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*. 2020. P. 415–444. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818232-1.00014-x>

151. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзання. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2008. Вип. 50. С. 144-148. DOI: 10.18372/0370-2197.50.2998

152. Погрелюк І. М. Фізико-хімічні основи інтенсифікації процесу азотування титанових сплавів та конструювання зміцнених шарів з підвищеною зносо-та корозійною тривкістю: дис. ... док. техн. наук: 05.02.01. Львів, 2001. 320 с
153. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. *Проблеми тертя та зношування*: наук.-техн. зб. 2011. Вип. 55. С. 112–117. DOI: 10.18372/0370-2197.55.3249
154. Friedrich K., Reinicke R. Polymer Composites, Friction and Wear of. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2001. P. 7235–7239. URL: <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01287-0>
155. Bykova A.D. Running-in of materials under reciprocating friction. *Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij. Priborostroenie*. 2020. Vol. 63, no. 4. P. 310–314. URL: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-4-310-314>
156. Hu J. Multiscale study of the dynamic friction coefficient due to asperity plowing. *Friction*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0438-4>
157. Bauman J.T. Calculation Methods for Spherical Elastomer Bearings. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components*. München, 2008. P. 89–105. URL: <https://doi.org/10.3139/9783446433403.006>
158. Nogueira I. An experimental model for mixed friction during running-in *Wear*. 2002. Vol. 253, no. 5-6. P. 541–549. URL: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(02\)00065-0](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(02)00065-0)
159. Sereda B., Sereda D. High-Performance Chrome Coatings to Protect Against Wear and Corrosion. *Steel Properties & Applications in conjunction with Materials Science & Technology* 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.33313/280/005>
160. Ashby M., Shercliff H., Cebon D. Friction and wear. *Materials*. 2019. P. 281–302. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102376-1.00011-1>
161. Вишневський О. А., Давидов О. С. Вплив деформації та площі поверхні тертя на процес зношування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2023. № 2 (74). С. 68–71. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.74.07>

162. Стенд для випробувань шарнірних підшипників – SU 1550350. База патентів РССР. URL: <https://patents.su/3-1550350-stend-dlya-ispytaniya-sharnirnykh-podshipnikov.html>

163. Соболев О.В. Підвищення антифрикційних властивостей титанових сплавів методом мікродугового оксидування: *thesis* та ін. 2018. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44268>

164. Kabat O.S., Dusheiko M.V. Полімерні композиційні матеріали спеціального призначення на основі фторопласту. *Технологічні системи*. 2018. № 81/4. URL: <https://doi.org/10.29010/081.8>

165. Анісімов В. М. Полімерні композиційні матеріали з підвищеною зносо- та абразивостійкістю на основі блок-кополіуретанів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Львів, 2014. 40 с.

166. Берладір Х.В. Антифрикційні матеріали на основі механоактивованих політетрафторетилену та наповнювачів: *thesis*. 2017. 29 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19665>

167. Дегтяренко А.С. Каркасні координаційні полімери на основі поліфункціональних піридазинів : автореф. дис. ... канд. хім. наук. Київ, 2015. 19с.

168. Вишегородцева М.Є. Вплив умов формування на властивості композитів на основі ПТФЕ : *thesis* та ін. 2015. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/39528>

169. Crawford R. J. Mechanical Properties of Plastics – Deformation. *Plastics Engineering*. 1987. P. 41–108. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-032626-9.50007-0>

170. Du X. Mechanisms of the copper third body as an interfacial media on copper matrix friction materials with different compositions *Industrial Lubrication and Tribology*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2020-0382>

171. SKF. URL: <https://www.skf.com/ua/support/skf-in-ukraine>

172. Марчук В. Є. Ляшенко Б.А., Калініченко В.І. Вплив конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального напружено-деформованого стану в елементах дискретної поверхні *Проблеми тертя та*

зношування: наук.-техн. зб. К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту “НАУ- друк”, 2009. Вип. 51. С. 5–13.

173. Tubielewicz K., Zaborski A., Skoneczny W. Influence of wear during friction of chosen properties of a steel surface after burnishing process. *Tribologia*. 2003. V. 22, №2. P. 13–19.

174. Марчук В. Є. Зносостійкість дискретних поверхонь в умовах фретинг-зношування *Вісник НАУ*. К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2010. Вип. 2 (43). С. 40–45.

ДОДАТКИ

А. Акти впровадженнь наукових досліджень, акт промислових випробувань.

Б. Трибомеханічні характеристики полімерних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання.

В. Характеристики та документація, щодо шарнірних підшипників із композиційними матеріалами.

Г. Розрахунок економічної доцільності заміни сталених обойм шарнірних підшипників на титанові сплави.

Д. Документація по наробітках вертольоту типу Мі-8МТВ-1 державний номер UR-HZF в республіці Буркіна-Фасо регіон Сахель при перевезення пасажирів та вантажів.

Е. Технічна документація, щодо розташування та технічного обслуговування шарнірного підшипника у важелі автомату перекошу гелікоптера Мі-8МТВ-1.

Ж. Приклад математичного обчислення середнього значення, стандартного відхилення, третього та четвертого моменту, коефіцієнту кореляції та стандартних помилок коефіцієнтів кореляції при дослідженнях металополімерних покриттів.

З. Список публікацій за темою дисертації.



ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС», 01015, м.Київ, вул. Старонаводницька 6Б, офіс 273, тел: 38 044 344-87-60
«H3Operations» LLC, Staronavodnytska st. 6B, office 273, Kyiv, Ukraine 01015, e-mail: info@h3ops.com

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС»



Владислав К. ЛПАЧЕНКО

«05» березня 2024 року

АКТ

про реалізацію наукових досліджень

Хімко Маргарити Сергіївни

Комісія у складі:

Голови:

Начальник відділу технічного обслуговування, Ігор ПОПОВ

та членів комісії:

- заступник Директора з якості та моніторингу відповідності, Євген МЕЛЬНІЧЕНКО
- старший інженер з АіРЕО, Олег СКРИПЧИНСЬКИЙ

розглянула результати наукових досліджень здобувача наукового ступеня Хімко Маргарити Сергіївни, щодо підвищення довговічності шарнірних підшипників ковзання із металополімерними трибосистемами, для реалізації їх на гелікоптері типу Мі-8/17 та їх модифікацій.

На підставі даних що були отримані при науково-технічних та експериментальних дослідженнях, що були проведені в Національному авіаційному університеті та підприємстві «AAL GROUP LTD» комісія встановила, що запропонована заміна шарнірних підшипників ковзання типу ШН, які працюють в умовах дії динамічних навантажень, для важеля автомату перекошу та лопоті несучого гвинта гелікоптерів типу Мі-8/17, дозволила підвищити довговічність вузла в 1,5-2 рази, в умовах роботи гелікоптера на африканському континенті. А саме, робота при підвищеній температурі, вологості, запиленості та агресивних умовах навколишнього середовища на узбіччі океанів. Така тенденція позитивно позначається на технічному обслуговуванні гелікоптерів, зменшує час та витрату людських ресурсів.

Голова комісії:

Ігор ПОПОВ

Члени комісії:

Євгеній МЕЛЬНІЧЕНКО

Олег СКРИПЧИНСЬКИЙ

AVIA'GRADE

Товариство з обмеженою відповідальністю
Науково-виробнича фірма
«МС АВІА-ГРЕЙД»
90213, Закарпатська обл., Берегівський р-н,
село Батрадь, вул. Каштей, буд. 7
E-mail: info@aviagrade.com.ua
Офіційний веб-сайт: www.aviagrade.com

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ Науково-виробнича фірма

«МС АВІА-ГРЕЙД»

Код ЄДРПОУ 37359102

90213, Закарпатська область, Берегівський район,

село Батрадь, вулиця Каштей, будинок 7.

Дмитро ПАРХІСЕНКО

14.08.2024 року

37359102

Укр. АКТ

про реалізацію наукових досліджень

ХІМКО Маргарити Сергіївни

Комісія у складі:

Голови – Директор Дмитро ПАРХІСЕНКО.

та членів комісії:

начальник служби супроводження експлуатаційної документації – Ігор ЛОБОДА;

головний технолога – Дмитро БЕЙДИК;

заступник головного технолога – Дмитро ПЕРЕПЕЛКА.

розглянула результати наукових досліджень здобувача наукового ступеня Хімко Маргарити Сергіївни, щодо розробленої методики досліджень композиційних матеріалів та впровадження полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників для авіаційної галузі.

На підставі даних що були отримані при науково-технічних та експериментальних дослідженнях, які були проведені в Національному авіаційному університеті та інших авіаційних підприємств комісія встановила що: розроблена методика та спеціальний комплекс установок для досліджень металополімерних та полімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати у шарнірних підшипниках ковзання для авіаційної промисловості; розроблена структурно-логічна схема досліджень впровадження металополімерних та полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання в авіації; розроблена методика дослідження металополімерних та полімерних 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; розроблена методика та лабораторна установка для ресурсних випробувань авіаційних шарнірних підшипників, впровадженні у технологічний процес підприємства Товариства з обмеженою відповідальністю Науково-виробнича фірма «МС АВІА-ГРЕЙД». А саме, запропоновані технології та методики дослідження композиційних матеріалів дозволяють отримати відповідні документи на впровадження нових високоефективних полімерних композиційних матеріалів у літальні апарати та гелікоптери типу Ми-8/17.

Голова комісії:

Дмитро ПАРХІСЕНКО

Члени комісії:

Ігор ЛОБОДА

Дмитро БЕЙДИК

Дмитро ПЕРЕПЕЛКА



04-02, Sharjah Airport International Free Zone
P.O. Box 8231, Sharjah, United Arab Emirates
t.: +97165570713 f.: +97165570714



34th Floor, Al Habtoor Business Tower, Dubai
P.O. Box 25413, Dubai, United Arab Emirates
t.: +97144529948 f.: +97144528961
office@aai-group.com www.aai-group.com

TESTING PROTOCOL № 17897-SB-879/15H of the studied samples of spherical bearings with metal-polymer coatings

The customer	LLC "H3Operations"
Address	Kyiv city, 6-Б Staronavodnytska Str., office 273. Tel.: (044) 344-87-60
Air Company	43682737
Manufacturer	experimental production by order of Margaryta KHIMKO
Period of testing	01.04.23-31.12.23
Product	spherical bearings with metal-polymer coatings
Equipment	installation for testing bearings DIN ISO 12240-1 (DIN 648)
Samples	samples No. 1-8.
Testing conditions	Frequency 3 Гц. Temperature 50-55 °C. Loading 3 кN in radial direction. Amplitude ±15°, reversible movement. Test database of 2 million cycles. Axial gap control for 1 and 2 million cycles. Speed 32.7 mm/s.

The testing of samples of spherical bearings with metal-polymer coatings was carried out in accordance with DIN ISO 12240-1 (DIN 648). Samples 3-8 were produced according to order No. 534-90/H dated 03.28.23. The tests took place with a cyclical sequence of 8-12 hours of work per day.

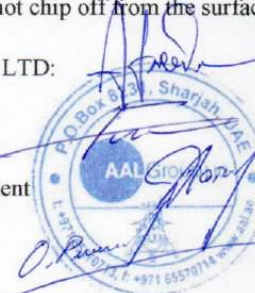
The test results are presented in Table 1.

Table 1

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Axial clearance at 1 million cycles, mm	0,170	0,145	0,120	0,120	0,125	0,100	0,095	0,105
Axial clearance at 2 million cycles, mm	0,200	0,155	0,140	0,135	0,140	0,120	0,120	0,125
Initial clearance, mm	0,045	0,050	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Surfaces of polymer composite materials of samples 1-8 without cracks and fractures. The destruction of polymer materials was observed during the research and the spillage of wear products in the form of black powders. The nature of the wear of the material is uniform, gradual without cracks. The inner race of the bearings is undamaged. There is natural uniform wearing without wear of the applied coatings in samples 2, 4, 5, 7, 8. The coating withstood the load and did not chip off from the surfaces.

Director of AAL GROUP LTD:		Andrii FEDULOV
Lead engineer		Georgiy INZHONIAN
Technical control department		Denys LATYPOV
Performer		Oleksandr PETRENKO





04-02, Sharjah Airport International Free Zone
P.O. Box 8231, Sharjah, United Arab Emirates
t.: +97165570713 f.: +97165570714



34th Floor, Al Habtoor Business Tower, Dubai
P.O. Box 25413, Dubai, United Arab Emirates
t.: +97144529948 f.: +97144529961
office@aai-group.com www.aai-group.com

ACT
of the scientific research results implementation
MARHARYTA KHIMKO

The commission:

Head of the commission –

Quality and Compliance Monitoring Manager, Oleh SRIBNYY

and members of the commission –

Maintenance Manager, Ihor LITOV

Lead engineer, Georgiy INZHONIAN

considered the presented scientific research, which was obtained personally by Marharyta KHIMKO, regarding increasing the durability of spherical bearings with metal-polymer coatings and their implementation in the levers of the swashplate of helicopters type Mi-8T, Mi-8P, Mi-8PS, Mi-8MTV-1(Mi-17-V), Mi-8MTV(Mi-17), Mi-8AMT, Mi-171.

The commission established that the results of the scientific, technical and experimental research conducted at the National Aviation University and the AAL GROUP LTD enterprise are of significant interest and deserve to receive supplemental type certificate for further implementation on the helicopters. The proposed spherical bearings will allow to reduce the weight of the aircraft and increase the durability of the bearings by 1.5-2 times, depending on the load conditions. In connection with the transition of aircraft aggregates to maintenance according to the actual condition, the issue of introducing these bearings that do not require a technical inspection is very relevant today. This allows to reduce the time and expenditure of human resources during maintenance and to transfer aggregates on maintenance according to the actual condition.

The commission also confirms that the spherical bearings proposed by Marharyta Khimko were realized and implemented at the aircraft repair enterprise AAL GROUP LTD in the equipment used for the manufacture and testing of the load-bearing capacity of blades made from composite materials of helicopters type Mi-8/17 and their modifications.

Head of the Commission:



Oleh SRIBNYY

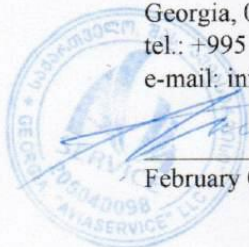
Members of the commission:

Ihor LITOV

Georgiy INZHONIAN



APPROVED BY
 Director of LLC "Aviaservice"
 17 Shalva Chankotadze Alley, Samgori District, Tbilisi,
 Georgia, 0158
 tel.: +995 32 223 03 79
 e-mail: info@aviaservice.biz



Aleko TKEMALADZE

February 08th 2024

**ACT
 of the scientific research results implementation**

MARHARYTA KHIMKO

The commission:

Head of the commission – Quality and Compliance Monitoring Manager,
 Georgii KHELAIA

and members of the commission – Maintenance Manager, Kakhaber JANASHVILI
 Lead engineer, Aleksander KARTHIA

considered the presented scientific research, which was obtained personally by Marharyta Khimko, regarding increasing the durability of spherical bearings with metal-polymer tribosystems.

The commission established that the results of the scientific, technical and experimental research conducted at the National Aviation University and the "AAL GROUP LTD" enterprise are of significant interest and deserve to receive supplemental type certificate for their further implementation at the air company's helicopters.

The proposed spherical bearings for their implementation on the levers of the Mi-8MTV-1 helicopter will allow to extend the durability of the bearings and reduce the axial gap according to the DIN ISO 12240-1 method by 1.5-2 times compared to the spherical bearings that are currently used on aircraft. This, in turn, will allow to reduce the time and expenditure of human resources during technical maintenance in difficult working conditions.

The commission also confirms that the spherical bearings proposed by Marharyta Khimko were realized and implemented on additional equipment used for maintenance of aircraft assemblies which are located at a height and in hard-to-reach places.

Head of the commission:

Georgii KHELAIA

Members of the commission:

Kakhaber JANASHVILI

Aleksander KARTHIA



Bearing technology | Plain bearings | iglidur®

Plain bearing materials for harsh environments

The iglidur® plain bearings for high load combine high wear resistance with the ability to withstand high (static) loads, shocks and edge loads. Within these properties they all have their own special strengths. Harsh environments mean radial surface pressure starting from 30MPa up to more than 100MPa (100MPa means 1.000kg on a 10 x 10mm plain bearing)



Online product finder
www.igus.eu/igidur-finder



Online service life calculation
www.igus.eu/igidur-expert

 iglidur® Q2 The durable heavy-duty bearing	Temperature [°C] ¹²³	+120	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	120	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.17	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	1.50	-						+
	Price index	-							+
 iglidur® Q3E Cost-effective heavy-duty bearing	Temperature [°C] ¹²³	+100	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	135	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.17	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	1.50	-						+
	Price index	-							+
 iglidur® Q The peak of stability	Temperature [°C] ¹²³	+135	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	100	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.19	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	1.90	-						+
	Price index	-							+
 iglidur® Q290 Heavy-duty on soft shafts	Temperature [°C] ¹²³	+140	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	55	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.12	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	0.48	-						+
	Price index	-							+

¹²³ Upper long-term application temperature ¹²⁴ Max. recommended surface pressure at +20°C ¹²⁵ Best pairing for p = 1 MPa, v = 0.3m/s, rotating

Harsh environments

 iglidur® M210 For medium-sized loads	Temperature [°C] ¹²³	+100	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	50	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.18	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	0.38	-						+
	Price index	-							+
 iglidur® M260 For heavy duty	Temperature [°C] ¹²³	+120	-						+
	Surface pressure [MPa] ¹²⁴	40	-						+
	Coefficient of friction [μ] ¹²⁵	0.16	-						+
	Wear [μm/km] ¹²⁶	0.11	-						+
	Price index	-							+

Bearing technology | Plain bearings | iglidur® Q2

Permissible surface speeds

Typical applications for iglidur® Q2 plain bearings are pivoting movements under high loads at comparatively low speeds. However, relatively high speeds are still attainable. The speeds stated in table 03 are limit values for the lowest bearing loads. With higher loads, the permitted speed drops with the extent of the load due to the limitations by the pv value.

Surface speed, page 48

Temperature

iglidur® Q2 is an extremely temperature-resistant material. The long-term upper temperature limit of +130°C permits the broad use in applications typical for the agricultural, utility vehicle or construction equipment sectors. With increasing temperatures, the compressive strength of iglidur® Q2 plain bearings decreases. For temperatures over +70°C an additional securing is required. When considering temperatures, the additional frictional heat in the bearing system must be taken into account.

Application temperatures, page 53

Additional securing, page 53

Friction and wear

The coefficient of friction of iglidur® Q2 is low. Please note that a sliding surface with a rough surface finish will increase the friction. The highest coefficient of friction occurs at Ra = 1 µm. Surface finishes (Ra) of the shaft between 0.1-0.4 µm are ideal. Furthermore, the coefficient of friction of iglidur® Q2 plain bearings largely depends on the speed and load. As the surface speed increases, the coefficient of friction will quickly increase as well. However, as the load is reduced, the coefficient of friction initially drops significantly, then moderately.

Coefficient of friction and surfaces, page 51

Wear resistance, page 54

Shaft materials

In high load applications, we generally recommend the use of hardened shafts. Furthermore, even at low to medium loads, iglidur® Q2 will attain increased service life with "hard" shafts as compared to "soft" shafts. But for low load applications, the results are outstanding with free cutting steel as well. For high loads, the wear in pivoting applications is much lower than for rotation. If the shaft material you plan on using is not shown in these test results, please contact us.

Shaft materials, page 56

Installation tolerances

iglidur® Q2 plain bearings are standard bearings for shafts with h-tolerance (recommended minimum h9). The bearings are designed for press-fit into a housing machined to a H7 tolerance. After being assembled into a nominal size housing, the inner diameter automatically adjusts to the E10 tolerances. For particular dimensions the tolerance differs depending on the wall thickness (please see product range table).

Testing methods, page 61

Chemicals	Resistance
Alcohols	+
Diluted acids	0 up to -
Diluted alkalines	+
Fuels	+
Greases, oils without additives	+
Hydrocarbons	+
Strong acids	-
Strong alkalines	0

All data given at room temperature (+20°C)

Table 02: Chemical resistance

Chemical table, page 1170

Long-term	Short-term	Rotating	Oscillating	linear
m/s	m/s			
1.0	2.0	1.0	0.7	4.0
2.0	1.4	1.4	5.0	

Table 03: Maximum surface speeds

	Dry	Greases	Oil	Water
Coefficient of friction µ	0.22-0.42	0.09	0.04	0.04

Table 04: Coefficient of friction against steel (Ra = 1 µm, 50HRc)

50HRC	Shaft				
	Housing	Plain bearings		Shaft	
Ø d1 [mm]	H7 [mm]	E10 [mm]	h9 [mm]		
0-3	+0.000	+0.010	+0.014	+0.054	
> 3-6	+0.000	+0.012	+0.020	+0.068	
> 6-10	+0.000	+0.015	+0.025	+0.083	
> 10-18	+0.000	+0.018	+0.032	+0.102	
> 18-30	+0.000	+0.021	+0.040	+0.124	
> 30-50	+0.000	+0.025	+0.050	+0.150	
> 50-80	+0.000	+0.030	+0.060	+0.180	
> 80-120	+0.000	+0.035	+0.072	+0.212	
> 120-180	+0.000	+0.040	+0.085	+0.245	

Table 05: Important tolerances for plain bearings according to ISO 3547-1 after press-fit

Technical data

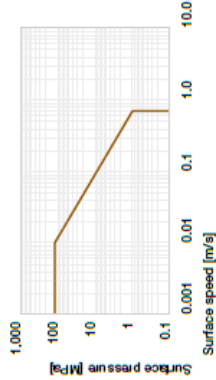


Diagram 01: Permissible pv values for iglidur® Q2 plain bearing with a wall thickness of 1mm dry operation against a steel shaft at +20°C, mounted in a steel housing.

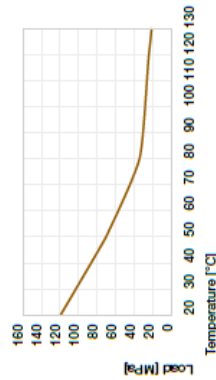


Diagram 02: Maximum recommended surface pressure as a function of temperature (120MPa at +20°C)

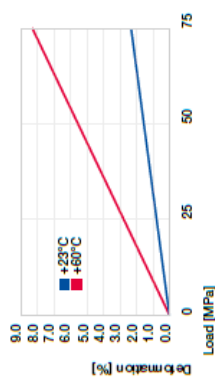


Diagram 03: Deformation under pressure and temperature

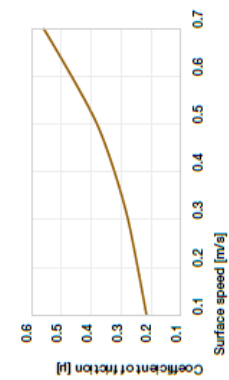


Diagram 04: Coefficient of friction as a function of the surface speed, p = 0.75MPa

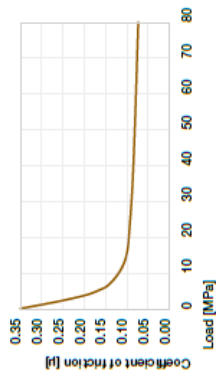


Diagram 05: Coefficient of friction as a function of the pressure, v = 0.01m/s



Diagram 06: Wear, pivoting with different shaft materials, pressure p = 45MPa, v = 0.01m/s

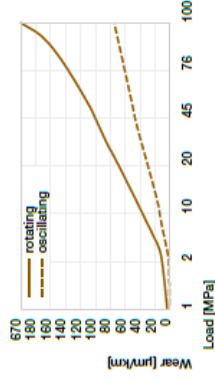


Diagram 07: Wear for oscillating and rotating applications with shaft material Cr53 hardened and ground steel as a function of the load

Bearing technology | Plain bearings | iglidur® Q3E

Temperature

iglidur® Q3E is an extremely temperature-resistant material. The long-term upper temperature limit of +100°C permits the broad use in applications typical for the agricultural, utility vehicle or construction equipment sectors. With increasing temperatures, the compressive strength of iglidur® Q3E plain bearings decreases. For temperatures over +75°C an additional securing is required. When considering temperatures, the additional frictional heat in the bearing system must be taken into account.

Application temperatures, page 53

Additional securing, page 53

Chemicals	Resistance
Alcohols	+
Diluted acids	0 up to –
Diluted alkalines	+
Fuels	+
Greases, oils without additives	+
Hydrocarbons	+
Strong acids	–
Strong alkalines	0

All data given at room temperature [+20°C]

Table 02: Chemical resistance

Chemical table, page 1170

Friction and wear

The coefficient of friction alters similarly to the wear resistance with increasing load and surface speed (diagrams 04 and 05).

Coefficient of friction and surfaces, page 51

Wear resistance, page 54

	Rotating	Oscillating	linear
Long-term	m/s	1.0	0.7
Short-term	m/s	2.0	1.4
Table 03: Maximum surface speeds			5.0

	Dry	Greases	Oil	Water
Coefficient of friction μ	0.22-0.42	0.09	0.04	0.04

Table 04: Coefficient of friction against steel (Ra = 1µm, 50HRC)

Ø d1 [mm]	Housing H7 [mm]	Plain bearings E11 [mm]	Shaft h9 [mm]
0-3	+0.000 +0.010 +0.014 +0.074	-0.025 +0.000	
> 3-6	+0.000 +0.012 +0.020 +0.095	-0.030 +0.000	
> 6-10	+0.000 +0.015 +0.025 +0.115	-0.036 +0.000	
> 10-18	+0.000 +0.018 +0.032 +0.142	-0.043 +0.000	
> 18-30	+0.000 +0.021 +0.040 +0.170	-0.052 +0.000	
> 30-50	+0.000 +0.025 +0.050 +0.210	-0.062 +0.000	
> 50-80	+0.000 +0.030 +0.060 +0.250	-0.074 +0.000	
> 80-120	+0.000 +0.035 +0.075 +0.292	-0.087 +0.000	
> 120-180	+0.000 +0.040 +0.085 +0.335	-0.100 +0.000	

Table 05: Important tolerances for plain bearings according to ISO 3547-1 after press-fit

Technical data

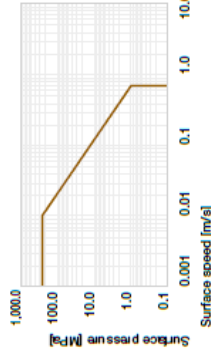


Diagram 01: Permissible pv values for iglidur® Q3E with a wall thickness of 1mm dry operation against a steel shaft at +20°C, mounted in a steel housing

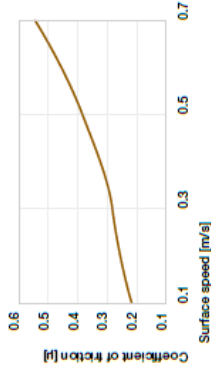


Diagram 02: Coefficient of friction as a function of the surface speed, p = 0.75MPa

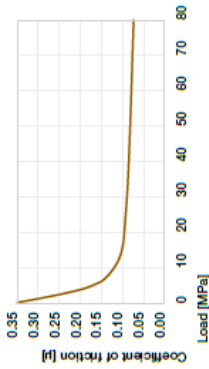


Diagram 03: Coefficient of friction as a function of the pressure, v = 0.01m/s



Diagram 04: Wear, pivoting with different shaft materials, p = 1MPa, v = 0.3m/s

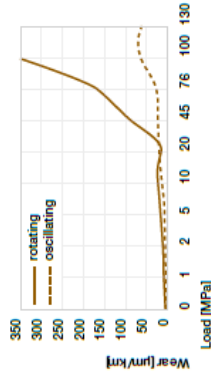


Diagram 05: Wear for oscillating and rotating applications with shaft material Cr53 hardened and ground steel, as a function of the load

Коротко	Механічні		Фізичні		Тертя	Середа				
Властивість	Символ	Од. вим.	Стандарт			ZX-324	ZX-324V1T	ZX-324V2T	ZX-324V11T	ZX-324VMT
Розтягнення										
густина	ρ	кг/дм ²	ISO 1183			1,3	1,33	1,33	1,34	1,48
модуль пружності при розтягуванні	E _t	МПа	DIN EN ISO 527			3600	3500	3500	4400	7800
границя плинності при розтягуванні	σ_Y	МПа	DIN EN ISO 527			110		92	113	120
границя міцності при розтягуванні	σ_M	МПа	DIN EN ISO 527			110	117	92	113	142
відносне подовження при пружному розтягуванні	ϵ_Y	%	DIN EN ISO 527			7	–	6,9	5	2,7
відносне подовження при розриві	ϵ_B	%	DIN EN ISO 527			12,6	10,1	23,9	9	4,5
твердість по Шору шкала A		Шору	DIN 53505			93	>100	100	>100	>100
твердість по Шору шкала D		Шору	DIN 53505			81	86	87	85	88
ударна в'язкість по Шарпі без надрізу		кДж/м ²	EN ISO 179/1eA			без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	23
ударна в'язкість по Шарпі з надрізом		кДж/м ²	EN ISO 179/1eA			8	6,3	6,3	6,2	9,3
Фізичні, трибологічні і експлуатаційні властивості										
макс. допустима робоча температура		°C	UL 746B			250	250	250	250	250
макс. тривала температура для запресованої втулки підшипника ковзання		°C				100	140	115	140	140
теплопровідність, Вт/(м×K)	λ		DIN 52612			0,25			0,24	0,24
питомна теплоємність, кДж/(кг×K)	c_p					1,35	1,09	1,05	0,9	1,09
питомий електричний опір		Ом×см	IEC 93			5×10 ¹⁶	5×10 ¹⁶	6×10 ¹⁶	4×10 ¹⁵	3×10 ⁴
електро-дугова міцність			IEC250			3,2	3,1	3,3	3	3,3
допустимий питомий тиск v = 1 м/хв без мастила		Н/мм ²	заводські випробування радіального підшипника ковзання			19,12	50,73	62,13	60	15
допустимий питомий тиск v=100м/хв без мастила		Н/мм ²	заводські випробування радіального підшипника ковзання			0,1	0,24	0,28	0,2	0,21
допустимий питомий тиск v=200м/хв без мастила		Н/мм ²	заводські випробування радіального підшипника ковзання			0,045	0,12	0,15	0,09	0,14
коефіцієнт тертя спокою 20 С, тертя без мастила	$\mu_{stat.}$		заводське випробування, похила площина			0,09	0,11	0,13	0,18	0,12
коефіцієнт тертя ковзання 20 С, тертя без мастила	$\mu_{dyn.}$		заводське випробування, похила площина			0,07	0,13	0,16	0,14	0,1
влагопоглинання 23°С відносить вологість 93%		%	DIN EN ISO 62			0,05	0,1	0,1	0,05	0,05
фізіологічно нешкідливі						так		так		

Коротко	Механічні		Фізичні		Тертя	Середа				
Властивість			Символ	Од. вим.	Стандарт	ZX-324	ZX-324V1T	ZX-324V2T	ZX-324V11T	ZX-324VMT
Розтяг										
модуль пружності при розтягуванні			E _t	МПа	DIN EN ISO 527	3600	3500	3500	4400	7800
границя плинності при розтягуванні			σ _Y	МПа	DIN EN ISO 527	110		92	113	120
границя міцності при розтягуванні			σ _M	МПа	DIN EN ISO 527	110	117	92	113	142
границя міцності при розриві			σ _B	МПа	DIN EN ISO 527	84	117	90	98	136
відносне подовження при пружному розтягуванні			ε _Y	%	DIN EN ISO 527	7	–	6,9	5	2,7
відносне подовження при граничній міцності на розтягування			ε _M	%	DIN EN ISO 527	7	10,1	6,9	5	3,9
відносне подовження при розриві			ε _B	%	DIN EN ISO 527	12,6	10,1	23,9	9	4,5
Стиснення										
модуль пружності при стисканні			E _c	МПа	DIN EN ISO 604	4270	3700	2540	2850	5454
границі еластичності при стисканні			σ _{el}	МПа	заводське випробування	120	119	76	122	123
границя плинності при стисканні			σ _Y	МПа	DIN EN ISO 604	отс.	145	103	146	отс.
границя міцності при сжатии			σ _M	МПа	DIN EN ISO 604	отс.	отс.	103	отс.	отс.
напруга при 3,5% стисканні			σ _{3,5%}	МПа	DIN EN ISO 604	32	145	80	36	95
границя міцності при стисканні T = 20°C(0,01ч)			σ _M	МПа	заводське випробування	120	127	81	130	131
предел прочности при сжатии T = 20°C(100ч)			σ _M	МПа	заводське випробування	107	102	67	103	109
границя міцності при стисканні T = 20°C(1000ч)			σ _M	МПа	заводське випробування	58	43	35	40	60
напруга стиску при розриві			σ _B	МПа	DIN EN ISO 604	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву
відносна деформація до границі пружності при стисканні			ε _{el}	%	заводське випробування	8,8	1,7	3,3	8,8	4,8
відносна деформація плинності при стисканні			ε _{cy}	%	DIN EN ISO 604	3,2	2,5	5,4	12,5	отс.
відносна деформація при граничній міцності на стиск			ε _{cM}	%	DIN EN ISO 604	6,9	отс.	5,4	отс.	отс.
відносна деформація при стисканні при розриві			ε _{cB}	%	DIN EN ISO 604	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву
Вигин										
модуль пружності при згибі			E _f	МПа	DIN 53452	4000	3900	3900	2937	7000
напруга при 3,5% деформації при згині			σ _{f3,5}	МПа	DIN EN ISO 178	126	117,5	110	119	150
межа міцності при згині			σ _{fM}	МПа		168	143	127	159	210
напруга вигину при розриві			σ _{fB}	МПа		без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву
відносне подовження при границі плинності на згин			ε _M	%		6,3	6,2	5,7	6,6	–
відносне подовження при руйнуванні на згин			ε _B	%		без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву
Твердість, повзучість, в'язкість										
модуль повзучості при 1% деформації 1000 год			E	Н/мм²		4300	3040	2500	2780	4560
напруга при 1% деформації			σ _{1%}	Н/мм²		43	32	26	29	44
межа повзучості (відносне оцінювання)				баллы	относительно	6	5	5	5	7
твердість при втисканні кульки H358/30			HB	Н/мм²	DIN 2039	174	175	175	190	231
твердість по Шору шкала A				Шору	DIN 53505	93	>100	100	>100	>100
твердість по Шору шкала D				Шору	DIN 53505	81	86	87	85	88
ударна в'язкість по Шарпі без надрізу				кДж/м²	EN ISO 179/1eA	без розриву	без розриву	без розриву	без розриву	23
ударна в'язкість по Шарпі з надрізом				кДж/м²	EN ISO 179/1eA	8	6,3	6,3	6,2	9,3
ударна в'язкість по Ізоду без надрізу				кДж/м²	EN ISO 180/1U	без розриву	5,8	5,8	6	2,8
ударна в'язкість по Ізоду з надрізом				кДж/м²	EN ISO 180/1A	0,8				0,9

Коротко	Механічні	Фізичні	Тертя		Середа					
Властивість			Символ	Од. вим.	Стандарт	ZX-324	ZX-324V1T	ZX-324V2T	ZX-324V11T	ZX-324VMT
Фізичні властивості										
макс. допустима робоча температура				°C	UL 746B	250	250	250	250	250
густина			ρ	кг/дм³	ISO 1183	1,3	1,33	1,33	1,34	1,48
температура при короткочасному використанні				°C		260	260	260	260	260
макс. тривала температура для запресованої втулки підшипника ковзання				°C		100	140	115	140	140
коефіцієнт розширення до 100°C			α	10 ⁻⁵	ISO E 830	5,1	4,7	6,2	5,8	3,6
коефіцієнт розширення до 150°C			α	10 ⁻⁵	ISO E 831	5,9	5,9	6,5	5,8	3,8
температура стійкості форми HDT/A 1,8МПа			HDT(A)	°C	DIN EN ISO 75	160	170	171	165	270
температура розм'ягшення по Віка VST/B 50				°C	DIN ISO 306					
теплопровідність, Вт/(м·К)			λ		DIN 52612	0,25			0,24	0,24
питомна теплоємність, кДж/(кг·К)			c_p			1,35	1,09	1,05	0,9	1,09
характеристика спалення (3,2мм) UL94					UL 94 HB	V0	V0	V0	V0	V0
кисневий індекс			%	LOI	DIN EN ISO 4589	35	16			43
Електричні властивості										
питомий електричний опір				Ом·см	IEC 93	5×10 ¹⁶	5×10 ¹⁶	6×10 ¹⁶	4×10 ¹⁵	3×10 ⁴
поверхневий опір				Ом	IEC 93	2,8×10 ¹²	3,2×10 ¹²	6,8×10 ¹²	7,8×10 ¹¹	1,9×10 ⁴
електрическа прочность				кВ/мм	IEC 243	22,5	25	27	26	0,1
дугостійкість (стійкість поверхні до ушкодження пробоем)				V	IEC 112	150				
електро-дужева міцність					IEC250	3,2	3,1	3,3	3	3,3
тангенс кута діелектричних втрат			tanδ		IEC250	0,003	0,002	0,002	0,004	0,0005

Коротко	Механічні	Фізичні	Тертя	Середа						
Властивість		Символ	Од. вим.	Стандарт		ZX-324	ZX-324V1T	ZX-324V2T	ZX-324V11T	ZX-324VMT
Трибологічні властивості										
коефіцієнт тертя спокою 20 С, тертя без мастила	μ_{stat}			заводське випробування, похила площина		0,09	0,11	0,13	0,18	0,12
коефіцієнт тертя ковзання 20 С, тертя без мастила	μ_{dyn}			заводське випробування, похила площина		0,07	0,13	0,16	0,14	0,1
коефіцієнт тертя ковзання 100 С, тертя без мастила	μ_{dyn}			заводське випробування, похила площина		0,06	0,2	0,09	0,21	0,08
[rv] властивості										
допустимий питомий тиск v = 1 м/хв без мастила		Н/мм²		заводські випробування радіального підшипника ковзання		19,12	50,73	62,13	60	15
допустимий питомий тиск v=10м/хв без мастила		Н/мм²		заводські випробування радіального підшипника ковзання		2,88	2,1	4	5,5	3,81
допустимий питомий тиск v=100м/хв без мастила		Н/мм²		заводські випробування радіального підшипника ковзання		0,1	0,24	0,28	0,2	0,21
допустимий питомий тиск v=200м/хв без мастила		Н/мм²		заводські випробування радіального підшипника ковзання		0,045	0,12	0,15	0,09	0,14
зміна температури при v=1м/хв		°C		заводські випробування радіального підшипника ковзання		84	61	65	39	65
зміна температури при v=10м/хв		°C		заводські випробування радіального підшипника ковзання		158	47	95	45	74
зміна температури при v=100м/хв		°C		заводські випробування радіального підшипника ковзання		153	109	120	60	110
зміна температури при v=200м/хв		°C		заводські випробування радіального підшипника ковзання		83	115	104	110	152
Знос										
фактор зносу 20°C		мм/100km		заводське випробування, періодичний лінійний рух під навантаженням		1,15	0,34	1,21	1,2	0,043
фактор зносу 100°C		мм/100km		заводське випробування, періодичний лінійний рух під навантаженням		0,89	0,14	0,14	0,91	0,18
фактор зносу 200°C		мм/100km		заводське випробування, періодичний лінійний рух під навантаженням		0,53	0,1	0,48	0,12	0,36
фактор зносу 240°C		мм/100km		заводське випробування, періодичний лінійний рух під навантаженням		0,66	0,24	0,64	0,37	0,52

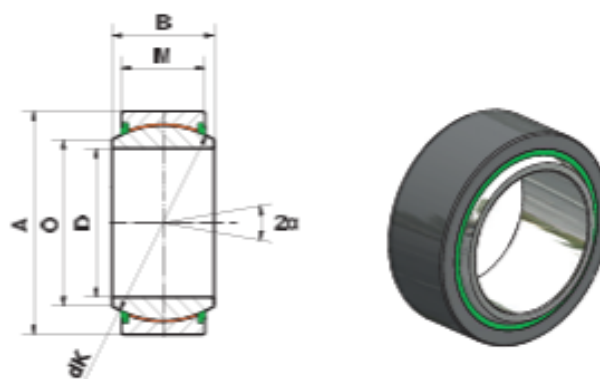
Коротко	Механічні	Фізичні	Тертя		Середа					
Властивість			Символ	Од. вим.	Стандарт	ZX-324	ZX-324V1T	ZX-324V2T	ZX-324V11T	ZX-324VMT
стабільність заданого розміру при водопоглинанні (відносно)				баллы	відносно	10	9	9	9	10
влагопоглинання 23°C відноситься вологість 93%				%	DIN EN ISO 62	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05
водопоглинання				%	DIN EN ISO 62	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1
стабільність заданого розміру за зміни температури (відносно)				баллы	відносно	6	5	5	5	7
висока точність (немає зазору в підшипниках)						так	так	так	так	
компенсація геометричних помилок (відносно)				баллы	відносно	4	4	4	4	1
експлуатація в воді						так	так	так	так	так
стійкість до гарячої води, побутових луг				°C		200	140	200	200	200
стійкість до бруду, пилу, абразивних частинок				баллы	відносно	7	7	7	7	10
стійкість до ультрафіолету				баллы	відносно	9	9	9	9	9
стокість до хімікатів (відносно)				баллы	відносно	9	7	9	8	8
фізіологічно нешкідливі						так		так		
придатні для вакууму						так	так	так	так	так
не містять силікону						так	так	так	так	так
не містять PTFE						так	ні	ні	ні	ні

Spherical Plain Bearings Series E

Series GE...EW-2RS

Spherical plain bearings
series E, mating surface
hard chrome/
FLUROGLIDE®,
maintenance free

For use with high
unidirectionally/variably
acting loads



Size (D)	B	M	A	O	dK	Static load ratings C ₀ kN	Dynamic load ratings C kN	Tilting angle α	Weight g
17 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix}$	14	10	30 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix}$	20,7	25,0	81,2	48,7	10	37
20 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.010 \end{smallmatrix}$	16	12	35 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.011 \end{smallmatrix}$	24,1	29,0	112	67,5	9	60
25 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.010 \end{smallmatrix}$	20	16	42 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.011 \end{smallmatrix}$	29,3	35,5	212	127	7	110
30 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.010 \end{smallmatrix}$	22	18	47 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.011 \end{smallmatrix}$	34,2	40,7	275	165	6	140
35 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.012 \end{smallmatrix}$	25	20	55 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.013 \end{smallmatrix}$	39,7	47,0	350	210	6	220
40 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.012 \end{smallmatrix}$	28	22	62 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.013 \end{smallmatrix}$	45,0	53,0	462	277	7	300
45 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.012 \end{smallmatrix}$	32	25	68 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.013 \end{smallmatrix}$	50,7	60,0	600	360	7	390
50 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.012 \end{smallmatrix}$	35	28	75 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.013 \end{smallmatrix}$	55,9	66,0	737	442	6	530
60 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	44	36	90 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	66,8	80,0	1.150	690	6	980
70 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	49	40	105 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	77,8	92,0	1.472	883	6	1.500
80 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	55	45	120 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	89,4	105,0	1.875	1.125	6	2.200
90 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.020 \end{smallmatrix}$	60	50	130 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.018 \end{smallmatrix}$	98,1	115,0	2.300	1.380	5	2.700
100 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.020 \end{smallmatrix}$	70	55	150 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.018 \end{smallmatrix}$	109,5	130,0	2.860	1.716	7	4.200
110 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.020 \end{smallmatrix}$	70	55	160 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$	121,2	140,0	3.075	1.845	6	4.700
120 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.020 \end{smallmatrix}$	85	70	180 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$	135,5	160,0	4.475	2.685	6	8.100
140 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$	90	70	210 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.030 \end{smallmatrix}$	155,8	180,0	5.025	3.015	7	10.600
160 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$	105	80	230 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.030 \end{smallmatrix}$	170,3	200,0	6.400	3.840	8	13.800
180 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$	105	80	260 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}$	198,9	225,0	7.200	4.320	6	17.400
200 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.030 \end{smallmatrix}$	130	100	290 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}$	213,5	250,0	10.000	6.000	7	28.000
220 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.030 \end{smallmatrix}$	135	100	320 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.040 \end{smallmatrix}$	239,5	275,0	11.000	6.600	8	35.500
240 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.030 \end{smallmatrix}$	140	100	340 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.040 \end{smallmatrix}$	265,3	300,0	12.000	7.200	8	39.000
260 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}$	150	110	370 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.040 \end{smallmatrix}$	288,3	325,0	14.250	8.550	7	50.800
280 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}$	155	120	400 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.040 \end{smallmatrix}$	313,8	350,0	16.750	10.050	6	64.700
300 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}$	165	120	430 $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.040 \end{smallmatrix}$	366,7	375,0	18.000	10.800	7	76.600

In spherical plain bearings up to size 120, the hardened shell is split unilaterally due to assembly reasons. Starting with size 140, the spherical plain bearing consists of two hardened shells secured with a clamp and screw.

Materials:

Outer ring: Bearing steel 100Cr6, hardened and phosphated, with FLUROGLIDE® bonded to the inner surface

Inner ring: Bearing steel 100Cr6, hardened, ground, polished, hard chrome plated

On request available in stainless steel

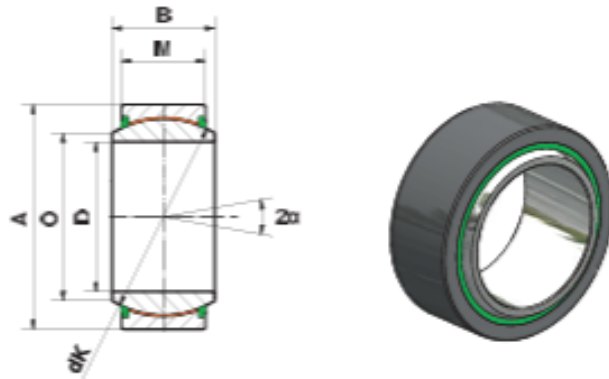
Please note that the numbers pointed off on the pages 17 to 23 and 25 in the data sheets, signalise a thousands place. And the numbers with thousands separators (comma) signalise a decimal point.

Spherical Plain Bearings Series E

Series GE...EW-2RS

Spherical plain bearings
series E, mating surface
hard chrome/
FLUROGLIDE®,
maintenance free

For use with high
unidirectionally/variably
acting loads



Size (D)	B	M	A	O	dK	Static load ratings C ₀ kN	Dynamic load ratings C kN	Tilting angle α	Weight g
17 ^{0 -0.038}	14	10	30 ^{0 -0.039}	20,7	25,0	81,2	48,7	10	37
20 ^{0 -0.010}	16	12	35 ^{0 -0.011}	24,1	29,0	112	67,5	9	60
25 ^{0 -0.010}	20	16	42 ^{0 -0.011}	29,3	35,5	212	127	7	110
30 ^{0 -0.010}	22	18	47 ^{0 -0.011}	34,2	40,7	275	165	6	140
35 ^{0 -0.012}	25	20	55 ^{0 -0.013}	39,7	47,0	350	210	6	220
40 ^{0 -0.012}	28	22	62 ^{0 -0.013}	45,0	53,0	462	277	7	300
45 ^{0 -0.012}	32	25	68 ^{0 -0.013}	50,7	60,0	600	360	7	390
50 ^{0 -0.012}	35	28	75 ^{0 -0.013}	55,9	66,0	737	442	6	530
60 ^{0 -0.015}	44	36	90 ^{0 -0.015}	66,8	80,0	1.150	690	6	980
70 ^{0 -0.015}	49	40	105 ^{0 -0.015}	77,8	92,0	1.472	883	6	1.500
80 ^{0 -0.015}	55	45	120 ^{0 -0.015}	89,4	105,0	1.875	1.125	6	2.200
90 ^{0 -0.020}	60	50	130 ^{0 -0.018}	98,1	115,0	2.300	1.380	5	2.700
100 ^{0 -0.020}	70	55	150 ^{0 -0.018}	109,5	130,0	2.860	1.716	7	4.200
110 ^{0 -0.020}	70	55	160 ^{0 -0.025}	121,2	140,0	3.075	1.845	6	4.700
120 ^{0 -0.020}	85	70	180 ^{0 -0.025}	135,5	160,0	4.475	2.685	6	8.100
140 ^{0 -0.025}	90	70	210 ^{0 -0.030}	155,8	180,0	5.025	3.015	7	10.600
160 ^{0 -0.025}	105	80	230 ^{0 -0.030}	170,3	200,0	6.400	3.840	8	13.800
180 ^{0 -0.025}	105	80	260 ^{0 -0.035}	198,9	225,0	7.200	4.320	6	17.400
200 ^{0 -0.030}	130	100	290 ^{0 -0.035}	213,5	250,0	10.000	6.000	7	28.000
220 ^{0 -0.030}	135	100	320 ^{0 -0.040}	239,5	275,0	11.000	6.600	8	35.500
240 ^{0 -0.030}	140	100	340 ^{0 -0.040}	265,3	300,0	12.000	7.200	8	39.000
260 ^{0 -0.035}	150	110	370 ^{0 -0.040}	288,3	325,0	14.250	8.550	7	50.800
280 ^{0 -0.035}	155	120	400 ^{0 -0.040}	313,8	350,0	16.750	10.050	6	64.700
300 ^{0 -0.035}	165	120	430 ^{0 -0.045}	366,7	375,0	18.000	10.800	7	76.600

In spherical plain bearings up to size 120, the hardened shell is split unilaterally due to assembly reasons. Starting with size 140, the spherical plain bearing consists of two hardened shells secured with a clamp and screw.

Materials:

Outer ring: Bearing steel 100Cr6, hardened and phosphated, with FLUROGLIDE® bonded to the inner surface

Inner ring: Bearing steel 100Cr6, hardened, ground, polished, hard chrome plated

On request available in stainless steel

Please note that the numbers pointed off on the pages 17 to 23 and 25 in the data sheets, signalise a thousands place. And the numbers with thousands separators (comma) signalise a decimal point.

С. 23 ГОСТ 3635—78

7. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ

Изготовитель гарантирует соответствие подшипников требованиям настоящего стандарта при соблюдении условий транспортирования и хранения, установленных стандартом.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочное

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИНОВ И БУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТАНДАРТЕ

Подвижное соединение — соединение, при котором шарнирные подшипники работают при взаимном перемещении одного кольца относительно другого.

Неподвижное соединение — монтажное сочленение, в котором шарнирные подшипники работают при периодических единичных сдвигах одного кольца относительно другого; предназначены в основном для компенсации несоосности вала и корпуса.

Угол α — наибольшая допустимая величина угла между осями колец подшипника в любом направлении при работе.

Q — приведенная радиальная нагрузка на подшипники, эквивалентная одновременному действию радиальной R и осевой A нагрузок, определяемая по формуле $Q = R + 6A$;

Q_1 — допускаемые радиальные нагрузки для подшипников типов Ш, ШС и ШС...К при числе повторных нагружений больше 5000 определяются с учетом коэффициента K ;

$$Q_1 = KQ$$

Коэффициент	Число повторных нагружений			
	5000	10000	50000	100000
K	1	0,66	0,264	0,175

d — номинальный диаметр отверстия внутреннего кольца подшипника;

d_1 — диаметр пересечения сферы с торцом кольца подшипника;

d_2 — диаметр сфер колец подшипников;

D — номинальный диаметр наружной поверхности наружного кольца подшипника;

B — ширина внутреннего кольца подшипника;

C — ширина наружного кольца подшипника;

r — координата монтажной фаски наружного кольца подшипника;

r_1 — координата монтажной фаски внутреннего кольца подшипника;

Розрахунок економічної доцільності заміни сталевих обойм шарнірних підшипників на титанові сплави.

Розрахунок економічної доцільності впровадження титанових сплавів у обойми ШП будемо вираховувати на прикладі середньомагістрального літака типу Boeing-737 який є наймасовіший і затребуваний на 2024 рік для країн європейського союзу.

ШП використовуються в ПС всюди для з'єднання важелів агрегатів до корпусу. Ціль використання ШП - це компенсація перекосів, які можуть виникати під час експлуатації ПС під дією зовнішніх сил - також використовуються вони у рухомих з'єднаннях, які в процесі експлуатації роблять коливальні рухи амплітудою до 60 градусів.

Любий варіант ПС використовує ШП ,які потребують обслуговування та такі які не потребують обслуговування в міжремонтний період. В представлених розрахунках прийнято, що всі ШП, які знаходяться на ПС, будуть такі які не обслуговуються. Оскільки останнім часом все більше деталей та агрегатів переводять ТО за фактичним станом, то ідея заміни підшипників на ті, що не потребують обслуговування є актуальною.

Особливістю сімейств літаків Boeing-737 та їх модифікацій - це використання великої номенклатури шарнірних підшипників від 6 мм до 35 мм. Шарнірні підшипники малих діаметрів (до 12 мм) використовують переважно для статичних об'єктів в системах керування літака. Шарнірні підшипники середніх діаметрів (до 20 мм) використовують в системах гідравлічного підсилення систем керування та хвостового оперення літака. Підшипники діаметрами до 35 мм використовують в кріпленнях вузлів шасі та силових елементів літака. Сумарна кількість всіх підшипників дуже залежить від габаритів та модифікацій літака і налічує близько 1000 шт. всіх варіантів.

Для обраного варіанту розрахунків приймемо середній діаметр підшипників рівному 20 мм. Оскільки, наприклад підшипник, діаметром 20 мм важить 0,1 кг,

підшипник діаметром 10 мм важить 0,01 кг, а підшипник діаметром 35 мм важить 0,25 кг. Вираховуємо вагу підшипників із сталених обойм:

$$P_{cm} = 1000 * 0,1 = 100 \text{ кг.}$$

Визначаємо вагу підшипника, який виготовлений із титанового сплаву. Щільність для сталі дорівнює $7,9 \text{ г/см}^3$, а для титанового сплаву - $4,5 \text{ г/см}^3$. При умові, що об'єм ШП однаковий, то маємо що титановий сплав на 57 % легший за сталь. Тоді вага підшипника діаметром 20 мм буде 0,57 кг. Вираховуємо вагу підшипників із титанових сплавів:

$$P_{mi} = 1000 * 0,57 = 57 \text{ кг.}$$

Тобто, перевага у вазі для літака за умови використання титанового сплаву буде дорівнювати 43 кг.

Ціна нержавіючої сталі 12ХН10Т у вигляді труби коштує від 150 грн/кг.

Ціна титанового сплаву ВТ-22 у вигляді труби коштує від 1200 грн/кг.

Визначаємо, що ціна підшипників зі сталі буде коштувати 15 тис. грн., а ціна підшипників з титану буде коштувати 68,4 тис. грн. Різниця у вартості дорівнює 53,4 тис. грн або **1335** дол. USA.

Білет економ-класу Варшава-Амстердам на квітень 2024 року буде коштувати (від 8 тис. грн.) біля 200 доларів при довжині польоту 2 години для літака Boeing-737. Тобто година польоту для людини буде коштувати 100 доларів. При розрахунках літаків вважають вагу людини 70 кг плюс вага багажу. При спрощенні можна стверджувати що виграш у 43 кг це приблизно **50 доларів на годину** комерційного польоту літака. Тобто компенсування вартості використання титанових підшипників для літака пройде в перші 27-30 години польоту.

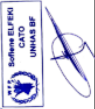
Вважаємо, що ресурс роботи шарнірного підшипника буде біля 3000 годин роботи то вираховуємо чистий прибуток від використання обойм із титанових сплавів буде дорівнювати:

$$\text{Прибуток} = 2970 * 50 = \mathbf{148,5} \text{ тисяч доларів прибутку для літака.}$$

Burkina Faso UNHAS Provisional Flight Schedule
Date: Tuesday, February 27, 2024



Aircraft Flight Details (Data shown in Zulu Time)											
Operated By Starlite Aviation Burkina											
Aircraft: ZI-RYC		Aircraft Type: AS332C1e		Callsign: UNO 911H		Pilot:		Co Pilot/Crew:		Flight status: NMR	
ETD: 7:00 ETA: 17:00		OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU		Pax on at OUAGADOUGOU: 0		Pax off at OUAGADOUGOU: 0		Total pax on sector: 0		Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations											
Aircraft: UR-HZG		Aircraft Type: MI-8MTV		Callsign: UNO 908H		Pilot:		Co Pilot/Crew:		Flight status: NMR	
ETD: 7:00 ETA: 17:00		OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU		Pax on at OUAGADOUGOU: 0		Pax off at OUAGADOUGOU: 0		Total pax on sector: 0		Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations											
Aircraft: UR-HZF		Aircraft Type: MI-8MTV-1		Callsign: UNO 909H		Pilot:		Co Pilot/Crew:		Flight status: Passenger	
ETD: 8:00 ETA: 9:10		OUAGADOUGOU --> FADA N'GOURMA		Pax on at OUAGADOUGOU: 12		Pax off at FADA N'GOURMA: 6		Total pax on sector: 12		Cargo (kg): 0	
ETD: 9:20 ETA: 10:10		FADA N'GOURMA --> DIAPAGA (UNO909H.2)		Pax on at FADA N'GOURMA: 13		Pax off at DIAPAGA: 10		Total pax on sector: 14		Cargo (kg): 0	
ETD: 10:20 ETA: 10:40		DIAPAGA --> Kantchari (UNO909H.3)		Pax on at DIAPAGA: 11		Pax off at Kantchari: 4		Total pax on sector: 15		Cargo (kg): 0	
ETD: 10:50 ETA: 11:30		Kantchari --> FADA N'GOURMA (UNO909H.4)		Pax on at Kantchari: 4		Pax off at FADA N'GOURMA: 12		Total pax on sector: 15		Cargo (kg): 0	
ETD: 11:50 ETA: 12:15		FADA N'GOURMA --> GAYERI (UNO909H.5)		Pax on at FADA N'GOURMA: 6		Pax off at GAYERI: 3		Total pax on sector: 11		Cargo (kg): 0	
ETD: 12:25 ETA: 12:50		GAYERI --> MATIACOALI (UNO909H.6)		Pax on at GAYERI: 2		Pax off at MATIACOALI: 5		Total pax on sector: 10		Cargo (kg): 0	
ETD: 13:00 ETA: 13:20		MATIACOALI --> Kantchari (UNO909H.7)		Pax on at MATIACOALI: 6		Pax off at Kantchari: 0		Total pax on sector: 11		Cargo (kg): 0	
ETD: 13:30 ETA: 13:50		Kantchari --> DIAPAGA (UNO909H.8)		Pax on at Kantchari: 4		Pax off at DIAPAGA: 3		Total pax on sector: 15		Cargo (kg): 0	
ETD: 14:00 ETA: 14:50		DIAPAGA --> FADA N'GOURMA (UNO909H.9)		Pax on at DIAPAGA: 3		Pax off at FADA N'GOURMA: 10		Total pax on sector: 15		Cargo (kg): 0	
ETD: 15:00 ETA: 16:10		FADA N'GOURMA --> OUAGADOUGOU		Pax on at FADA N'GOURMA: 1		Pax off at OUAGADOUGOU: 9		Total pax on sector: 9		Cargo (kg): 0	



Approved by: _____
NOTE: All flight times/routes/aircraft are subject to change

Burkina Faso UNHAS Provisional Flight Schedule
Date: Monday, February 26, 2024



Aircraft Flight Details (Data shown in Zulu Time)						
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVC	Aircraft Type: AS332C1e	Callsign: UNO 911H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Flight status: NMR	
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector: 0	Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations						
Aircraft: UR-HZK	Aircraft Type: MI-171	Callsign: UNO 910H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Flight status: NFR	
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector: 0	Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations						
Aircraft: UR-HZG	Aircraft Type: MI-8MTV	Callsign: UNO 908H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Flight status: Passenger	
ETD: 8:15 ETA: 9:35	OUAGADOUGOU --> DORI (UNO908H.1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 19	Pax off at DORI: 17	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 9:45 ETA: 10:05	DORI --> GORGADJI (UNO908H.2)	Pax on at DORI: 17	Pax off at GORGADJI: 2	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 10:15 ETA: 10:30	GORGADJI --> ARBINDA (UNO908H.3)	Pax on at GORGADJI: 1	Pax off at ARBINDA: 6	Total pax on sector: 18	Cargo (kg): 0	
ETD: 10:40 ETA: 11:55	ARBINDA --> OUAGADOUGOU (UNO908H.4)	Pax on at ARBINDA: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 12	Total pax on sector: 12	Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations						
Aircraft: UR-HZF	Aircraft Type: MI-8MTV-1	Callsign: UNO 909H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Flight status: Passenger	
ETD: 8:00 ETA: 9:30	OUAGADOUGOU --> GOROM GOROM	Pax on at OUAGADOUGOU: 19	Pax off at GOROM GOROM: 15	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 9:40 ETA: 10:00	GOROM GOROM --> DORI (UNO909H.2)	Pax on at GOROM GOROM: 15	Pax off at DORI: 10	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 10:10 ETA: 11:30	DORI --> OUAGADOUGOU (UNO909H.3)	Pax on at DORI: 10	Pax off at OUAGADOUGOU: 19	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
Operated By H3Operations						
Aircraft: UR-HZF	Aircraft Type: MI-8MTV-1	Callsign: UNO 909H (2)	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Flight status: Passenger	
ETD: 12:15 ETA: 13:35	OUAGADOUGOU --> DORI (UNO909H(2).1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 19	Pax off at DORI: 6	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 13:45 ETA: 14:45	DORI --> DJIBO (UNO909H(2).2)	Pax on at DORI: 6	Pax off at DJIBO: 19	Total pax on sector: 19	Cargo (kg): 0	
ETD: 14:55 ETA: 15:55	DJIBO --> OUAGADOUGOU (UNO909H(2).3)	Pax on at DJIBO: 10	Pax off at OUAGADOUGOU: 10	Total pax on sector: 10	Cargo (kg): 0	

Approved by:  Amara FOFANKA, DCATO
NOTE: All flight times/routes/aircraft are subject to change

Burkina Faso UNHAS Provisional Flight Schedule
Date: Friday, February 23, 2024



Aircraft Flight Details (Data shown in Zulu Time)						
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVC	Aircraft Type: AS332C1e	Callsign: UNO 911H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: NMR
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector: 0		
Operated By H3O Operations						
Aircraft: UR-HZK	Aircraft Type: MI-171	Callsign: UNO 910H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: NMR
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector: 0		
Operated By H3O Operations						
Aircraft: UR-HZG	Aircraft Type: MI-8MTV	Callsign: UNO 908H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 8:30 ETA: 9:50	OUAGADOUGOU --> DORI (UNO908H.1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 19	Pax off at DORI: 19	Total pax on sector: 19		
ETD: 10:00 ETA: 11:20	DORI --> OUAGADOUGOU (UNO908H.2)	Pax on at DORI: 19	Pax off at OUAGADOUGOU: 19	Total pax on sector: 19		
Operated By H3O Operations						
Aircraft: UR-HZF	Aircraft Type: MI-8MTV-1	Callsign: UNO 909H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 8:00 ETA: 9:10	OUAGADOUGOU --> FADA N'GOURMA	Pax on at OUAGADOUGOU: 1	Pax off at FADA N'GOURMA: 1	Total pax on sector: 1	Fuel Available in Fada	
ETD: 9:20 ETA: 9:50	FADA N'GOURMA --> PAMA (UNO909H.2)	Pax on at FADA N'GOURMA: 3	Pax off at PAMA: 0	Total pax on sector: 3		
ETD: 10:00 ETA: 10:10	PAMA --> KOMPIENGA (UNO909H.3)	Pax on at PAMA: 3	Pax off at KOMPIENGA: 5	Total pax on sector: 6		
ETD: 10:20 ETA: 10:50	KOMPIENGA --> FADA N'GOURMA (UNO909H.4)	Pax on at KOMPIENGA: 4	Pax off at FADA N'GOURMA: 5	Total pax on sector: 5		01 hour Ground time in Fada
ETD: 12:00 ETA: 12:30	FADA N'GOURMA --> PAMA (UNO909H.5)	Pax on at FADA N'GOURMA: 4	Pax off at PAMA: 0	Total pax on sector: 4		
ETD: 12:35 ETA: 12:45	PAMA --> KOMPIENGA (UNO909H.6)	Pax on at PAMA: 1	Pax off at KOMPIENGA: 0	Total pax on sector: 5		
ETD: 12:50 ETA: 14:10	KOMPIENGA --> OUAGADOUGOU (UNO909H.7)	Pax on at KOMPIENGA: 3	Pax off at OUAGADOUGOU: 8	Total pax on sector: 8		

Andara FOFANA DIALLO

Approved by:
NOTE: All flight times/routes/aircraft are subject to change

Burkina Faso UNHAS Provisional Flight Schedule
Date: Thursday, February 29, 2024



Aircraft Flight Details (Data shown in Zulu Time)						
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVE	Aircraft Type: EC25	Call sign: UNO 901H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 7:45 ETA: 8:35	OUAGADOUGOU --> OUAHIGOUYA	Pax on at OUAGADOUGOU: 14	Pax off at OUAHIGOUYA: 16	Total pax on sector 14	Fuel Available in Ouahigouya	
ETD: 8:45 ETA: 9:05	OUAHIGOUYA --> SOULE (UNO901H.2)	Pax on at OUAHIGOUYA: 16	Pax off at SOULE: 11	Total pax on sector 18		
ETD: 9:15 ETA: 9:20	SOULE --> TITAO (UNO901H.3)	Pax on at SOULE: 0	Pax off at TITAO: 7	Total pax on sector 7		
ETD: 9:30 ETA: 9:40	TITAO --> OUAHIGOUYA (UNO901H.4)	Pax on at TITAO: 7	Pax off at OUAHIGOUYA: 7	Total pax on sector 7		
ETD: 10:00 ETA: 10:25	OUAHIGOUYA --> TOUGAN (UNO901H.5)	Pax on at OUAHIGOUYA: 2	Pax off at TOUGAN: 5	Total pax on sector 14		
ETD: 10:35 ETA: 11:00	TOUGAN --> DEDOUGOU (UNO901H.6)	Pax on at TOUGAN: 4	Pax off at DEDOUGOU: 8	Total pax on sector 13		
ETD: 11:10 ETA: 11:25	DEDOUGOU --> NOUNA (UNO901H.7)	Pax on at DEDOUGOU: 11	Pax off at NOUNA: 7	Total pax on sector 16		
ETD: 11:35 ETA: 12:25	NOUNA --> OUAHIGOUYA (UNO901H.8)	Pax on at NOUNA: 4	Pax off at OUAHIGOUYA: 2	Total pax on sector 13		
ETD: 12:45 ETA: 13:05	OUAHIGOUYA --> SOULE (UNO901H.9)	Pax on at OUAHIGOUYA: 0	Pax off at SOULE: 0	Total pax on sector 0		
ETD: 13:15 ETA: 13:20	SOULE --> TITAO (UNO901H.10)	Pax on at SOULE: 11	Pax off at TITAO: 0	Total pax on sector 11		
ETD: 13:25 ETA: 13:35	TITAO --> OUAHIGOUYA (UNO901H.11)	Pax on at TITAO: 1	Pax off at OUAHIGOUYA: 10	Total pax on sector 12		
ETD: 13:55 ETA: 14:20	OUAHIGOUYA --> TOUGAN (UNO901H.12)	Pax on at OUAHIGOUYA: 0	Pax off at TOUGAN: 3	Total pax on sector 13		
ETD: 14:30 ETA: 15:20	TOUGAN --> OUAGADOUGOU (UNO901H.13)	Pax on at TOUGAN: 8	Pax off at OUAGADOUGOU: 18	Total pax on sector 18		
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVD	Aircraft Type: AS332C1e	Call sign: UNO 906H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 8:00 ETA: 9:00	OUAGADOUGOU --> DORI (UNO910H.1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 15	Pax off at DORI: 15	Total pax on sector 15	No Fuel in Dori	
ETD: 9:10 ETA: 9:35	DORI --> SEBBA (UNO910H.2)	Pax on at DORI: 10	Pax off at SEBBA: 4	Total pax on sector 10		
ETD: 9:45 ETA: 10:45	SEBBA --> OUAGADOUGOU (UNO910H.3)	Pax on at SEBBA: 9	Pax off at OUAGADOUGOU: 15	Total pax on sector 15		
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVD	Aircraft Type: AS332C1e	Call sign: UNO 906H (2)	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 11:30 ETA: 12:30	OUAGADOUGOU --> DORI (UNO910H(2).1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 14	Pax off at DORI: 14	Total pax on sector 14		
ETD: 12:40 ETA: 13:40	DORI --> OUAGADOUGOU (UNO910H(2).2)	Pax on at DORI: 15	Pax off at OUAGADOUGOU: 15	Total pax on sector 15		
Operated By Starlite Aviation Burkina						
Aircraft: ZT-RVD	Aircraft Type: AS332C1e	Call sign: UNO 906H (3)	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: Passenger
ETD: 14:25 ETA: 15:15	OUAGADOUGOU --> DIBBO (UNO910H(3).1)	Pax on at OUAGADOUGOU: 14	Pax off at DIBBO: 10	Total pax on sector 14		
ETD: 15:20 ETA: 15:35	DIBBO --> BOURZANGA (UNO910H(3).2)	Pax on at DIBBO: 3	Pax off at BOURZANGA: 4	Total pax on sector 7		
ETD: 15:45 ETA: 16:25	BOURZANGA --> OUAGADOUGOU	Pax on at BOURZANGA: 7	Pax off at OUAGADOUGOU: 10	Total pax on sector 10		
Operated By H30 Operations						
Aircraft: UR-HZG	Aircraft Type: MI-8MTV	Call sign: UNO 908H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: NMR
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector 0		
Operated By H30 Operations						
Aircraft: UR-HZF	Aircraft Type: MI-8MTV-1	Call sign: UNO 909H	Pilot:	Co Pilot/Crew:	Cargo (kg): 0	Flight status: NFR
ETD: 7:00 ETA: 17:00	OUAGADOUGOU --> OUAGADOUGOU	Pax on at OUAGADOUGOU: 0	Pax off at OUAGADOUGOU: 0	Total pax on sector 0		



Approved by: _____
NOTE: All flight times/routes/aircraft are subject to change

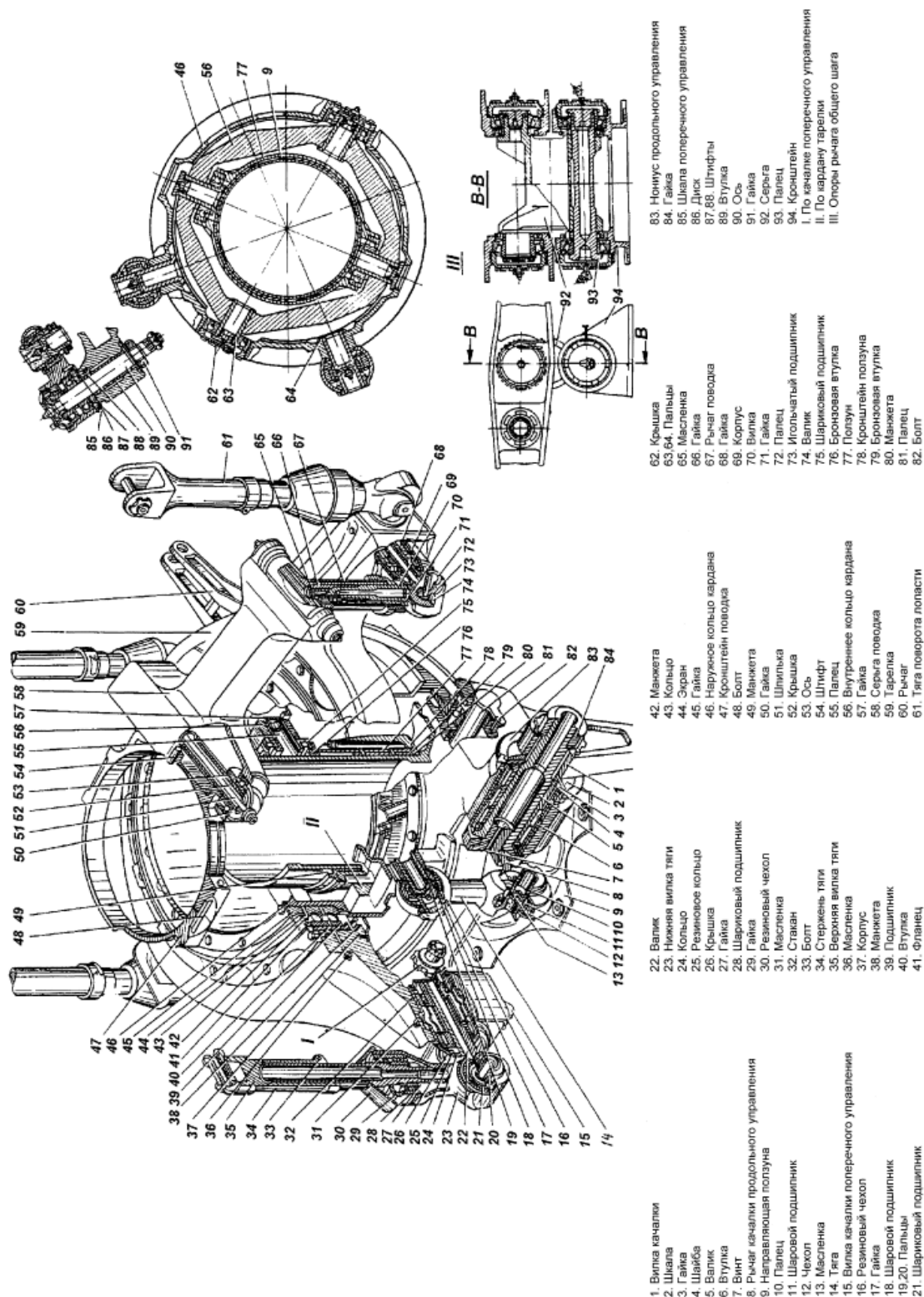


Рис. 1 Автомат перекуса

065.50.00

Стр. 5/6

Апр 12/04

Ми-8МТВ-1
РУКОВОДСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

несущего винта, благодаря чему обеспечивается независимость продольного и поперечного управления.

На цилиндрической поверхности в верхней части наружного кольца кардана на радиально-упорном двухрядном подшипнике 39 установлена тарелка 59 автомата перекоса. Внутренние кольца подшипника стягиваются гайкой 45, которая контрится стопором. Наружное кольцо подшипника прижато фланцем 41 к внутреннему борту втулки 40, запрессованной в тарелку.

Тарелка автомата перекоса изготовлена из алюминиевого сплава в форме пятиконечной звезды с массивным центральным кольцом. В лапы звезды, расположенные под углом 72° друг к другу, запрессованы стальные стаканы 32 для монтажа концевых шарниров тарелки. Во фланце 41 и корпусе 37 размещены армированные резиновые манжеты 42 и 38, уплотняющие полость подшипника 39. Рабочая кромка верхней манжеты скользит по цилиндрической поверхности кольца 43, а рабочая кромка нижней манжеты - по цилиндрической поверхности наружного кольца 46 кардана. Верхняя манжета защищена от попадания воды и грязи экраном 44, повернутым к гайке 45. Смазка подшипника 39 производится через масленку 36. Избыток смазки при зашприцовке удаляется через предельный клапан.

В стаканах 32 на игольчатом и радиальном подшипниках установлены валики 22 шарнира. Осевая фиксация валиков осуществляется крышками 26, по цилиндрическим поверхностям которых скользят уплотнительные резиновые кольца 25, заложенные в канавки колец 24.

Валики шарниров соединяются пальцами 20 через два радиальных шарикоподшипника 21 каждый с тягами поворота лопастей. Подшипники валиков 22 и пальцев 20 смазываются через масленки 31. Избыток смазки удаляется через предельные клапаны, расположенные рядом с масленками. Подшипники пальцев имеют с одной стороны защитные шайбы.

Тарелка автомата перекоса приводится во вращение поводком, представляющим из себя кинематическое звено, которое состоит из кронштейна 47, серьги 58 и рычага 67, шарнирно связанных между собой. Благодаря этому звену обеспечивается вращение тарелки при любых ее наклонах и поступательном движении вдоль направляющей.

Кронштейн 47 поводка смонтирован на корпусе втулки несущего винта и зафиксирован в определенном угловом положении штифтом 54. К кронштейну с помощью оси 53 и двух радиальных шариковых подшипников крепится серьга 58. Внутренние кольца подшипников стянуты гайкой 50, а наружные шпилькой 51 через крышки 52 прижаты к пружинным кольцам серьги. Аналогично осуществляется соединение серьги 58 с рычагом 67. Смазка шарикоподшипников производится заполнением полостей подшипников при снятых крышках.

В цилиндрическом отверстии рычага 67 монтируется на радиальном и игольчатом подшипниках вилка 70. По цилиндрической поверхности вилки трется уплотнительное резиновое кольцо, вставленное в канавку гайки 71, которая зажимает наружные кольца подшипников. Смазка к подшипникам подается через масленку 65, ввернутую в рычаг 67.

Палец 72 через игольчатый подшипник 73 соединяет вилку 70 с валиком 74. На валике 74 на двух радиально-упорных шарикоподшипниках монтируется корпус 69. Внутренние кольца подшипников стягиваются гайкой 68. Наружные кольца подшипников стягиваются при стыковке корпуса 69 с выступом тарелки 59. Смазка к подшипникам валика 74 подается, как и к подшипникам валика 22, через масленку.

Тяга поворота лопасти состоит из стержня 34, верхней вилки 35 и нижней вилки 23. Во внутренней полости нижней вилки размещен осевой шарнир тяги в виде двухрядного радиально-упорного подшипника, наружная обойма которого зажата гайкой 29, а внутренняя -- гайкой 27. Для защиты от грязи на шарнир надевается чехол 30. Осевой шарнир позволяет верхней вилке поворачиваться относительно нижней. Верхняя вилка наворачивается на резьбовой конец стержня 34 тяги и имеет разрез, позволяющий контрить вилку стяжным болтом 33.

Такая конструкция дает возможность при необходимости изменять длину тяги.

Наклон тарелки автомата перекоса производится качалками продольного и поперечного управления, смонтированными на кронштейне 78. Кронштейн, штампованный из алюминиевого сплава, крепится шпильками на фланце ползуна. В кронштейн запрессованы стальные втулки 6 и 89. На оси 90 на конических подшипниках смонтирована качалка поперечного управления. Весь пакет затягивается гайкой 91.

Ми-8МТВ-1
РУКОВОДСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Качалка продольного управления имеет валик 5, к которому с одной стороны торцовыми шлицами и винтом 7 крепится рычаг 8 качалки, а с другой стороны на эвольвентных шлицах установлена вилка 1 качалки и зажата гайкой 84. Втулка 6 дополнительно закреплена в кронштейне штифтом и в нее на игольчатых подшипниках вмонтирован валик 5.

Осевая фиксация качалки продольного управления осуществляется гайкой 3. Смазка узла осуществляется через масленку, ввернутую в кронштейн. В рычаге качалки продольного управления имеется гнездо для монтажа шарового подшипника 11. С помощью этого подшипника и пальца 10 качалка соединена с тягой 14 продольного управления, а вилка 1 качалки соединена с тягой, идущей от гидроусилителя. Шаровой подшипник закрыт резиновым чехлом 12 и смазывается через масленку 13, ввернутую в палец 10.

На втулке 6 двумя винтами крепится нониус 83, а на валике 5 на шлицах смонтирована шкала 2 и зажата вместе с вилкой 1 качалки гайкой 84. На диске шкалы имеется зуб, который, упираясь в выступы втулки 6, ограничивает поворот качалки и, соответственно, наклон тарелки в плоскости продольного управления.

Шкала 85 качалки поперечного управления соединена с диском 86, зафиксированным в определенном угловом положении относительно кронштейна 78 штифтом 88. Диск имеет паз, ограничивающий поворот качалки поперечного управления. Ограничение поворота качалки осуществляется штифтом 87, который входит в паз диска 86. Деления нониуса нанесены непосредственно на качалку поперечного управления. Шкалы и нониусы качалок позволяют контролировать наклон тарелки в плоскостях продольного и поперечного управления с точностью до шести минут и дают возможность производить регулировку управления на вертолете без применения угломера и предварительной установки вертолета в положение, при котором ось несущего винта вертикальна.

Кронштейн 78 ползуна соединен с рычагом управления общим шагом пальцем 81.

Для предотвращения схода деформированного хомута 1 поводка автомата перекоса (Рис. 206, 065.10.00) с посадочного места втулки несущего винта и сигнализации появления деформации кронштейна 11 хомута на втулку несущего винта выше хомута поводка автомата перекоса установлен ограничитель смещения хомута.

Ограничитель состоит из полуколец 2 и 7, стягиваемых двумя болтами 6, двух пластин 5, закрепленных латунными винтами 4 на полукольце 7.

Полукольца 2 и 7 устанавливаются своими торцами вплотную к торцу Т втулки несущего винта, причем полукольцо 7 располагается фаской вниз (в сторону хомута поводка автомата перекоса). Прилив полукольца 2 охватывает ребро хомута 1. Пластины 5 закрывают две диаметрально противоположные плоские поверхности полукольца 7, окрашенные в оранжевый цвет.

При деформации кронштейна 11 хомута поводка автомата перекоса деформированная часть смещается вверх и нажимает на ребро пластины 5, латунные винты 4 срезаются, и пластина падает, повиснув на контрольной проволоке 3. Открывшийся участок, окрашенный в оранжевый цвет, сигнализирует о наличии деформации кронштейна поводка 11. Два запасных винта 9, закрепленных на полукольце 7, предназначены для установки пластин 5 в случае среза винтов 4.

Ми-8МТВ-1
РУКОВОДСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

разгружены от срезающих усилий втулками 86. Конец рычага поворота лопасти имеет цилиндрическую полость, в которой на двухрядном шарикоподшипнике 81 и роликовом подшипнике 78 установлен валик 76. Крышка 77, притянутая четырьмя болтами к торцу рычага, удерживает валик от осевого смещения. В рычаг ввернута масленка 83 для смазывания подшипников.

В проушине валика 76 установлен на двух подшипниках 75 палец, соединяющий рычаг поворота лопасти с тягой автомата перекося. Ограничение поворота лопасти в горизонтальных шарнирах на корпусе втулки и скобах осуществляется верхними и нижними постоянными упорами.

Для ограничения свеса лопасти при неработающем несущем винте и на малых оборотах в скобе установлен центробежный механизм ограничителя свеса. Устройство центробежного ограничителя свеса показано на Рис. 3. Противовес 1 подвешен к скобе на пальце 2 и через тягу 4 соединяется с одним концом собачки 6. Осью вращения собачки 6 является палец 5, пропущенный через проушины скобы. Второй конец собачки служит упором, ограничивающим свес лопасти.

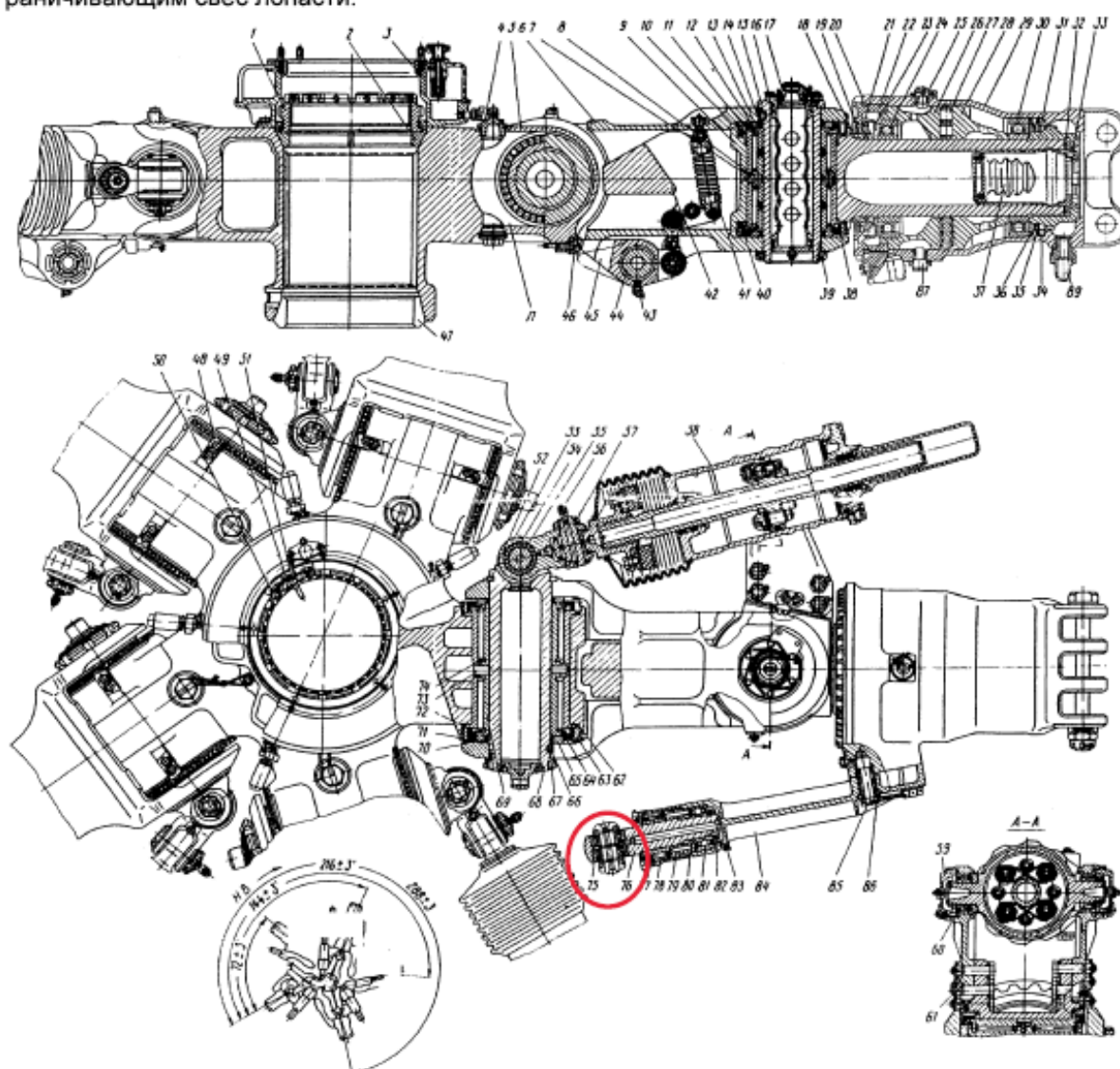
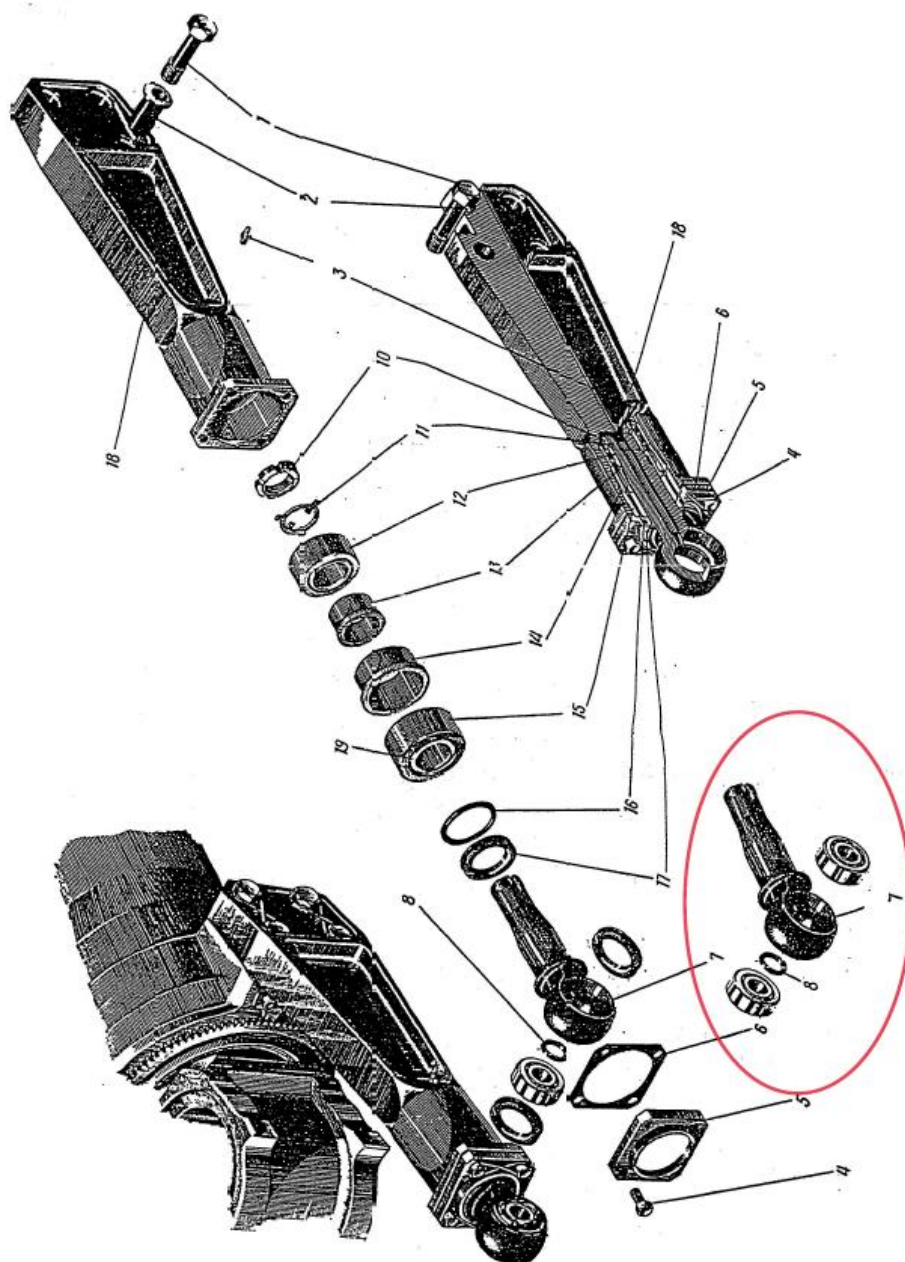


Рис. 2 (Лист 1 из 2-х) Втулка несущего винта

Втулка несущего винта 8-1930-000-2 сер.
КАТАЛОГ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ



Рычаг лопасти.
Рис.11.

МИ-8 МТВ-1
Регламент технического обслуживания

№ п/п	Наименование точек смазки или за- правки	Номер позиции на рис.	Кол.точ смазки или за- правки	Марка масла или смазки	Выполняемые работы	Периодичность смазки
	наружном кольце				лотнения.	и через каждые (50±10) ч полета
10	Подшипники ШС-30 в тягах тарелки автомата перекоса	13,14	5	ЦИАТИМ- 201	Защприцевать до появ- ления свежей смазки из-под резиновых чех- лов. В случае установки подшипников ШС-30Ю "сухого" трения точки смазки 13 и 14 отсутст- вуют.	При установке на вертолет ав- томата переко- са и через каждые (25±5) ч полета
11	Подшипники проуши- ны рычага общего шага	8а	2	ЦИАТИМ- 201	Защприцевать до появ- ления свежей смазки из подшипника.	При установке на вертолет ав- томата переко- са и через каждые (50±10) ч полета

Карты смазки
Стр. 50
Дек. 02/94

Статистичний аналіз Підпрограма MISR

Ця процедура обчислює середнє значення, стандартні відхилення, третій і четвертий моменти, коефіцієнти кореляції та стандартні помилки коефіцієнтів кореляції, якщо відсутні дані. Таким чином забезпечується ефективний обсяг вибірки. Пропущені спостереження та деякі значення даних можуть бути пропущені за бажанням користувача.

Етапи розрахунку наступні:

1. Обчислення середніх $\bar{x}_j = \frac{\sum_{a=1}^n x_{aj}}{n}$, (1) де $j = 1, 2, \dots, m$ - змінні; n - число непропущених значень для j -ї змінної.

2. Обчислення сум взаємних добутоків відхилень від середніх значень для повного ряду i -ї та j -ї змінних

$$S_{ij} = \sum_{a=1}^{n'} (x_{ai} - \bar{x}_i)(x_{aj} - \bar{x}_j) - \frac{\sum_{a=1}^n (x_{ai} - \bar{x}_i) \sum_{a=1}^{n'} (x_{aj} - \bar{x}_j)}{n'}, \quad (2) \text{ де } \bar{x}_i, \bar{x}_j \text{ — середнє}$$

значення i -ї та j -ї змінних, обчислених, як зазначено вище; n' — числа ряду, де присутні обидві змінні.

3. Обчислення моментів взаємозв'язку

$$r_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii}} \sqrt{S_{jj}}}. \quad (3)$$

4. Розрахунок коефіцієнтів регресії, перетинів* та стандартних похибок коефіцієнтів регресії:

а) i -та пояснювальна змінна і j -та залежна змінна.

$$\text{Коефіцієнти регресії } b_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{ii}}. \quad (4)$$

$$\text{Перехрестя } a_{ij} = \bar{x}_j - b_{ij} \bar{x}'_i. \quad (5)$$

$$\text{Стандартна похибка коефіцієнта регресії. } S_{bij} = \frac{S_{jj} - r_{ij}^2 S_{jj}}{(n'-2) S_{ii}} \quad (6)$$

б) j -та пояснювальна змінна і i -та залежна змінна.

$$\text{Коефіцієнт регресії } b_{ji} = \frac{S_{ij}}{S_{jj}}. \quad (7)$$

$$\text{Перехрестя } a_{ij} = \bar{x}'_i - b_{ji} \bar{x}'_j. \quad (8)$$

Стандартна похибка коефіцієнта регресії

$$S_{bji} = \frac{S_{ii} - r_{ji}^2 S_{ii}}{(n'-2) S_{jj}}. \quad (9)$$

5. Розрахунок стандартних відхилень

$s_i = \sqrt{\frac{S_{ji}}{n-1}}$, (10), де n - кількість непропущених значень для i-ї змінної.

6. Розрахунок перекосу і куртозу, s і k

$$\mu_{ij} = \sum_{a=1}^n (x_{aj} - \bar{x}_j)^i \quad \text{То}$$

$$s_i = \frac{\mu_{3j}}{(\mu_{2j})^{\frac{3}{2}}}; \quad (11)$$

$$k_j = \left(\frac{\mu_{4j}}{\mu_{2j}^2} \right) - 3. \quad (12)$$

Вхідні дані для значень елементів вибірки x, y, а також кількість елементів вибірки n та кількість інтервалів поділу k наведені у підпрограмі: "Статистичний розрахунок елементів вибірки".

функція uslovie()

n=19;

k=5;

x=[1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 6,5 ...
7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 9.5 10.0];

y=[0,22 0,23 0,31 0,43 0,56 0,82 1,06 1,25 1,72 2,28 ...
2.67 3.26 3.72 4.32 5.11 5.98 6.64 7.02 8.32];

f=raschet_stat(n,k,x,y)

Програма для знаходження найменшого та найбільшого елемента вибірки, обчислення діапазону вибірки, обчислення статистичного ряду (вибіркового впорядкування), групування ряду, обчислення емпіричної функції розподілу, побудови гістограми абсолютних частот, обчислення середнього та дисперсійного значення, обчислення центральних моментів k-го порядку:

функція f=raschet_stat(n,k,x,y)

дисп

n

дисп

k

disp('x Вибіркові значення')

x

disp('Y Вибіркові значення')

y

xmin=x(1); ymin=y(1); xmax=x(1); ymax=y(1);

дисп

для i=2:n

Якщо x(i)<xmin

xmin=x(i);

кінець

```

Якщо  $x(i) > x_{\max}$ 
     $x_{\max} = x(i)$ ;
кінець
Якщо  $y(i) < y_{\min}$ 
     $y_{\min} = y(i)$ ;
кінець
якщо  $y(i) > y_{\max}$ 
     $y_{\max} = y(i)$ ;
кінець
кінець
 $x_{\min}$ ,  $y_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ,  $y_{\max}$ 
дисп
 $x_{\text{razm}} = x_{\max} - x_{\min}$ 
 $y_{\text{razm}} = y_{\max} - y_{\min}$ 
дисп
для  $j = 1:n-1$ 
     $x_n = x(j)$ ;  $i_n = j$ ;
    для  $i = j+1:n$ 
        Якщо  $x_n > x(i)$ 
             $x_n = x(i)$ ;  $i_n = i$ ;
        кінець
    кінець
     $a = x(j)$ ;  $x(j) = x_n$ ;  $x(i_n) = a$ ;
кінець
для  $j = 1:n$ 
    для  $i = 1:n$ 
        Якщо  $y(j) < y(i)$ 
             $b = y(j)$ ;
             $y(j) = y(i)$ ;
             $y(i) = b$ ;
        кінець
    кінець
кінець
 $x, y$ 
дисп('Групова серія')
дисп('Інтервал дискретизації')
 $h_x = x_{\text{razm}} / (k-1)$ 
 $h_y = y_{\text{razm}} / (k-1)$ 
 $c_x = \text{нулі}(k, 1)$ ;  $c_y = \text{нулі}(k, 1)$ ;  $c = \text{нулі}(k, 2)$ ;
дисп('Кількість елементів в інтервалі')
для  $i = 1:n$ 
     $t = \text{fix}((x(i) - x_{\min}) / h_x) + 1$ ;
     $c_x(t) = c_x(t) + 1$ ;
     $t = \text{fix}((y(i) - y_{\min}) / h_y) + 1$ ;
     $c_y(t) = c_y(t) + 1$ ;

```

```

кінєць
cx,cy
(1),Сходи(CX, 'R')?
сходи(cy, 'b'),сітка,
title('Гістограма абсолютних частот')
disp('Гістограма абсолютних частот')
disp('X крок - Hx; Y крок - Hy')
Hx(1)=xmin+hx/2;
Hy(1)=ymin+hy/2;
для i=2:k
    Hx(i)=Hx(i-1)+hx*(i-1);
    Hy(i)=Hy(i-1)+hx*(i-1);
кінєць
Hx, Hy
disp('Відносна частота елементів в інтервалі')
Fx(1)=cx(1)/n;
Fy(1)=cy(1)/n;
для i=2:k
    Fx(i)=Fx(i-1)+cx(i)/n;
    Fy(i)=Fy(i-1)+cy(i)/n;
кінєць
FX,Fy
фігура(2),графік(Bx,Fx,'r',Hy,Fy,'b'),сітка
title('Емпірична функція розподілу')
disp('Обчислити середнє')
mx=0; my=0;
для i=1:n
    mx=mx+x(i);
    my=my+y(i);
кінєць
mx=mx/n,my=my/n
disp('Обчислити дисперсію')
dx=0; dy=0;
для i=1:n
    dx=dx+(x(i)-mx)^2;
    dy=dy+(y(i)-my)^2;
кінєць
dx=dx/(n-1),dy=dy/(n-1)
cmx=нулі(10,1); cmy=нулі(10,1);
disp('Обчислення центральних моментів с-го порядку')
для j=1:10
    для i=1:n
        cmx(j)=cmx(j)+(x(i)-mx)^j;
        cmy(j)=cmy(j)+(y(i)-my)^j;
кінєць

```

кінець

$$cmx = cmx./n, cmy = cmy./n$$

дисп

$$Sx = cmx(3)/(cmx(2)^(3/2)), Sy = cmy(3)/cmy(2)^(3/2)$$

дисп

$$Kx = cmx(4)/(cmx(2)^2) - 3, Ky = cmy(4)/cmy(2)^2 - 3$$

Результати розрахунку за вихідними даними методом статистичного опису результатів спостережень такі:

Кількість зразків позицій:

$$n = 19$$

Кількість інтервалів розділення

$$k = 5$$

Вибіркові значення x

x =

Колами з 1 по 7

1.0000 1.5000 2.0000 2.5000 3.0000 3.5000 4.0000

Стовпці з 8 по 14

4.5000 5.0000 5.5000 6.0000 6.5000 7.0000 7.5000

Колонки з 15 по 19

8.0000 8.5000 9.0000 9.5000 10.0000

Y Вибіркові значення

y =

Колами з 1 по 7

0.2200 0.2300 0.3100 0.4300 0.5600 0.8200 1.0600

Стовпці з 8 по 14

1.2500 1.7200 2.2800 2.6700 3.2600 3.7200 4.3200

Колонки з 15 по 19

5.1100 5.9800 6.6400 7.0200 8.3200

Знаходження найбільшого і найменшого елемента зразка

$$xmin = 1$$

$$ymin = 0,2200$$

$$xmax = 10$$

$$ymax = 8,3200$$

Обчислення вибіркового розмаху

$$xrazm = 9$$

$$yrazm = 8.1000$$

Обчислити статистичний ряд. (Порядок відбору зразків)

x =

Стовпці з 1 по 7

1.0000 1.5000 2.0000 2.5000 3.0000 3.5000 4.0000

Стовпці з 8 по 14

4.5000 5.0000 5.5000 6.0000 6.5000 7.0000 7.5000

Колонки з 15 по 19

8.0000 8.5000 9.0000 9.5000 10.0000

$y =$

Стовпці з 1 по 7

0.2200 0.2300 0.3100 0.4300 0.5600 0.8200 1.0600

Стовпці з 8 по 14

1.2500 1.7200 2.2800 2.6700 3.2600 3.7200 4.3200

Колонки з 15 по 19

5.1100 5.9800 6.6400 7.0200 8.3200

Групування ряду

Інтервал відбору проб

$h_x = 2,2500$

$h_y = 2,0250$

Кількість елементів в інтервалі

$s_x = 5\ 4\ 5\ 4\ 1$

$s_y = 9\ 4\ 3\ 2\ 1$

Побудова гістограми абсолютних частот

Крок X - V_x ; Крок Y - H_y

$H_x = 2,1250\ 4,3750\ 8,8750\ 15,6250\ 24,6250$

$H_y = 1,2325\ 3,4825\ 7,9825\ 14,7325\ 23,7325$

Відносна частота потрапляння елементів в інтервал

Валюта = 0,2632 0,4737 0,7368 0,9474 1,0000

$F_y = 0,4737\ 0,6842\ 0,8421\ 0,9474\ 1,0000$

Обчислення середнього значення

$m_x = 5.5000$

$m_{iy} = 2,9432$

Обчислення дисперсії

$d_x = 7,9167$

$d_y = 6,7973$

Обчислення центральних моментів С-го порядку

$cm_x = 1,0E+005 *$

0

0.0001

0

0.0010

0

0.0161

0
 0.2785
 0
 5.0517
 $\text{cm}_y = 1.0\text{e}+006 *$
 0.0000
 0.0000
 0.0000
 0.0001
 0.0003
 0.0018
 0.0082
 0.0436
 0.2205
 1.1626

Розрахунок коефіцієнтів перекосу

$S_x = 0$

$S_y = 0,6569$

Список публікацій 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 згорання. *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. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry / M. Khimko, A. Khimko, P. Mnatsakanov, O. Mikosyanchyk // *Problems of tribology*. V.29, № 2/112-2024, P.16-22.
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. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2015. № 9 (33). P. 301–307. **(Scopus, Quartile Q1)**

Матеріали та тези конференцій:

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

12. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / O. O. Mikosianchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // *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. Установка для випробувань шарнірних підшипників ковзання /М.С. Хімко, А.В. Гречуха // *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, 2015. – С. 3-4.

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

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

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

Патенти:

17. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних 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.