

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18670

М.С. ХИМКО<sup>1</sup>, А.М. ХИМКО<sup>2</sup>, Р.Г. МНАЦАКАНОВ<sup>2</sup>, В.В. КЛПАЧЕНКО<sup>1</sup>,  
Р.О. МАКАРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТОВ Авіакомпанія «НЗОПЕРЕЙШІНС», Київ

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, Київ

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ

*Визначено сучасні полімерні композиційні матеріали та їх структури, які можуть конкурувати та замінити металополімерну стрічку для шарнірних підшипників ковзання. Визначена зносостійкість полімерних матеріалів в умовах вібраційного навантаження. Визначено процеси зношування антифрикційних композиційних полімерних матеріалів в умовах вібраційного навантаження та реверсивних рухів.*

**Ключові слова:** шарнірний підшипник, композиційні полімерні матеріали, структури, вібрації, реверсивний рух, зношування, умови експлуатації.

**Вступ.** Полімерні композиційні матеріали відіграють прогресивну роль триботехніці. Їх використовують для заміни дефіцитних металів і сплавів, значному підвищенні технологічності, надійності і довговічності вузлів тертя. Вузли машин із застосуванням полімерних композиційних матеріалів, мають меншу масу, працюють практично безшумно, мають високу демпфуючу здатність, не вимагають 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 композиційних матеріалів дозволяє значно знизити трудомісткість виготовлення деталей вузлів тертя за рахунок високопродуктивних та 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, композиційний матеріал складається із одної або більше неперервної фази однорідної матриці із одної або більше дисперсійною фазою. В зв'язку з цим надійна робота металополімерних трибосистем в першу чергу залежить від структурно-морфологічного фактору, який впливає на трибомеханічні характеристики матеріалів. Принцип отримання композиційних матеріалів 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. Вибір наповнювачів

металополімерних матеріалів залежить від призначення матеріалу, необхідності зміни певних трибомеханічних характеристик та типу полімерної матриці.

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

Шарнірні підшипники ковзання із металополімерними трибосистемами дуже популярні в авіаційній промисловості. Вони виготовляються з нержавіючих та корозійностійких сталей та не вимагають технічного обслуговування. Компактні, відрізняються надзвичайно високим ставленням до ваги вантажопідйомності і використовуються в первинних і вторинних системах управління польотом. Мають конструкцію шарнірного типу.

**Метою дослідження** було визначення сучасних антифрикційних полімерних композиційних матеріалів та їх структур для авіаційних шарнірних підшипників ковзання та визначення їх зносостійкості в порівнянні із металополімерною стрічкою.

**Визначення композиційних полімерних матеріалів для шарнірних підшипників ковзання.**

В роботі [1] 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 композитами, які складаються з наповнювачів різного виду і структури та полімерної матриці. Модифікатори забезпечують міцність, жорсткість, зносостійкість, коефіцієнт тертя композиційного матеріалу, а полімерна матриця – створення монолітного матеріалу і формоутворення виробів. Наповнювачі мінімізують недоліки полімерів і надають їх нові властивості. В якості полімерної матриці використовують як різні термопластичні, так і терморезистивні пластики.

Вплив наповнювачів-модифікаторів на структуру та властивості композиційних матеріалів було досліджено в роботах [2-3]. Наповнювачі поділяються на металеві та неметалеві. До металевих наповнювачів відносять порошки різних металів (бронза, олово, мідь та ін.) та окиси ( $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Ti_2O$ ,  $Cu_2O$  та ін.). До неметалевих модифікаторів відносять порошки або волокна таких матеріалів як: інші полімерні матеріали, смоли, мінерали, тверди змащувальні матеріали, вуглеволокна, скловолокна, наноматеріали та ін.

Так в роботі [3] було досліджено оптимальний вміст наповнювачів в матеріалі PTFE. Автори визначили, що найбільшій зносостійкості досягаються матеріал PTFE із вмістом: 20% коксу (зносостійкість підвищується в 600 разів), 15% скловолокна (зносостійкість збільшується в 250 разів), 15% графіту (зносостійкість збільшується в 500 разів), 20% дисульфиду молібдену та коксу (зносостійкість збільшується в 1000 разів), 10% вуглецевих волокон (зносостійкість збільшується в 100 разів), бронза та полімерні наповнювачі 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 [1, 4, 5] дослідивши зносостійкість 6 полімерних матеріалів та 28 модифікацій із наповнювачами встановили, що найбільш бажаним матеріалом для підшипників кочення є матеріал PTFE.

Інші дослідження [1, 2, 6] показують, що найбільш вдалою композицією із цим матеріалом є комбінація – PTFE+15% C+5% MoS<sub>2</sub>. 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 [7] 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% сурми. 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 шарнірних підшипників типу ШН із металополімерним наповнювачем зазвичай використовують металфторопластову стрічку. Вона складеться із: поверхні з PTFE+MoS<sub>2</sub> завтовшки 0,01-0,05 мм, шар попеченого бабіту (наприклад Б-83) завтовшки 0,20-0,5 мм, сталева основа з низьким вмістом вуглецю завтовшки 0,25-2,70 мм. Властивості металополімерного матеріалу поєднують у собі 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.

Таким чином першим і базовим матеріалом для нашого дослідження є матеріал PTFE+15%С+5%MoS<sub>2</sub> 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 шарнірних підшипників, переважно два матеріали: ZX100K та ZX324.

Базовий матеріал ZX100K пропонується використовувати до температур +110 °С. Цей матеріал створено на основі PTFE 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 робочі температури (у PTFE +250°С проти +110°С у ZX100K); менша хімічна стійкість, ніж у PTFE.

Матеріал ZX324 також пропонується компанією для використання підшипників ковзання. Термопластичний полікристалічний полімер ZX324 розроблено як модифікація РЕЕК і володіє всіма перевагами цього полімеру. Матеріал ZX324VMT 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 ZX100K це аналог матеріалу Ф-4К15М5, а матеріал ZX324VMT це аналог металополімерної стрічки. В нашому випадку другим матеріалом для дослідів був саме ZX324VMT, як аналог проміжного матеріалу між обіймами шарнірних підшипників.

Матеріали 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 дослідів. У лінійці матеріалів Iglidur є як чисті матеріали PTFE, PEEK, PEK, PA так і їх комбінації з різними наповнювачами.

Проаналізувавши характеристик матеріалів та умови роботи шарнірних підшипників 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, чудова зносостійкість, особливо при високих навантаженнях, висока термостійкість, для екстремальних навантажень).

Для використання в шарнірних підшипниках ковзання, враховуючи умови роботи на навантаження які сприймає підшипник оптимальним буде матеріал Iglidur TX1 який буде третім матеріалом для наших дослідів.

Компанія Fluro спеціалізується саме на виробництві шарнірних підшипниках ковзання та шарнірних головок. Підшипники цього виробника працюють у сучасних машинах по всьому світі, при температурах від -50 до +150 °С. Матеріали Fluroglide поділяються на два варіанти: Wear solid (для максимальних статичних та динамічних навантажень) та Media solid (для великих динамічних навантажень). Наприклад підшипник GE30EW-2RS це повний аналог авіаційного підшипника ПНЗЮТ. Відмінною особливістю всіх шарнірних підшипників є те, що спеціальний матеріал Fluroglide працює в контакті полірованого хромового покриття, який наноситься на внутрішню обійму підшипника.

Таким чином четвертим матеріалом для нашого дослідження буде матеріал Fluroglide wear solid, який максимально відповідає умовам роботи шарнірних підшипників в авіаційній промисловості.

Отже для нашого дослідження були обрані наступні матеріали:

1. Металополімерна стрічка із матеріалом PTFE+15%С+5%MoS<sub>2</sub> запеченим із бабітом (Б-83) на сталевій стрічці.

2. Матеріал ZX324VMT являє собою PEEK посилений нановуглеволокном з додаванням PTFE, MoS<sub>2</sub> та іншими функціональними добавками.

3. Матеріал Iglidur TX1 являє собою полімерний матеріал (інженерний пластик) армований волокнами із додаванням функціональних добавок. За своїм складом схожий на конструкцію матеріалу ZX324VMT.

4. Матеріал Fluroglide це армована тканина в склад якої входить матеріалом PTFE та інші наповнювачі які становлять секрет компанії.

На рис. 1 представлено поверхні вибраних металополімерних матеріалів для випробувань.

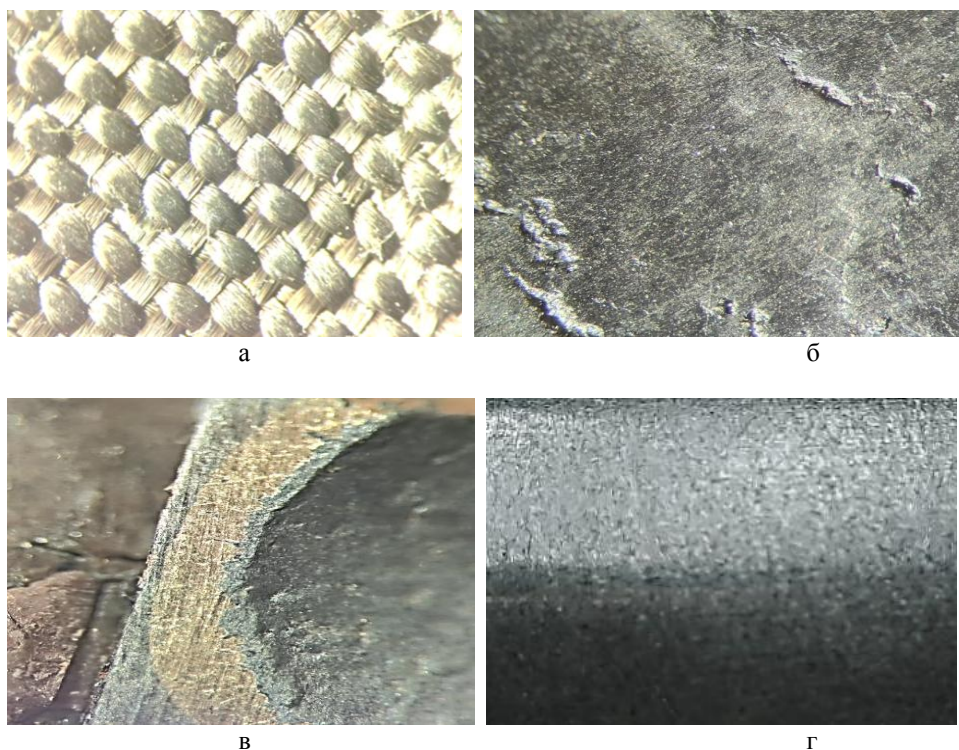


Рис. 1 – Фото поверхонь металополімерних матеріалів для трибодосліджень. а - Матеріал Fluoroglide, б - Матеріал ZX324VMT, в – Металополімерна стрічка, г - Матеріал Iglidur TX1.

**Методика проведення досліджень.** При виборі установки для початкових стадій дослідження необхідно врахувати той факт, що отримані результати зносостійкості композиційних матеріалів мають буди співставленні з іншими іншими матеріалами. А отже існує велика кількість методик для випробувань зносостійкості композиційних матеріалів.

Більшість цих методик відтворюють однонаправлене тертя ковзання. Однак умови роботи шарнірних підшипників в повітряних суднах показують, що одним із впливових факторів який кардинально впливає на зносостійкість це реверсивне тертя. Отже для трибодослідження металополімерних матеріалів вбрана методика [8]. Але стандартна методика не дозволяє провести трибологічні випробування в умовах які відповідають роботі шарнірних підшипників.

Отже ця методика була модернізована і більш повно описана роботі [9]. Модернізація установки МФК-1 полягала у наступному: заміна ексцентрика для збільшення амплітуди взаємного переміщення зразків та зміні обертів електричного двигуна до 3 коливань за секунду.

Зразки для випробувань вибирались, як циліндричні ролики діаметром 20 мм на які були наклеєні пластинки із композиційними полімерними матеріалами. Матеріалі контрзразків був такий самий із якого виготовляють обидва шарнірних підшипників ковзання – 95X18Ш із твердістю HRC 54-58 одиниць.

Частота коливань в 3 Гц була визначена в ході досліджень [10] та вираховувалась із умов роботи шарнірних підшипників важелів зміни кута атаки

лопотів несучого гвинта автомату перекошу гелікоптера. Наприклад, номінальні оберти несучого гвинта гелікоптера Мі-8МТВ-1 складають  $192 \pm 2$  об/хв, що відповідає показникам по приладам 95,3% та частоті коливань біля 3 Гц.

Дослідження по визначенню лінійного зносу та інтенсивності зношування полімерних матеріалів виконували на повітрі при терті без мастильного матеріалу. Всі зразки перед проведенням дослідів протирались ганчіркою зі спиртом, щоб мінімізувати вплив пилу та наявності мастильних матеріалів. Температура зразків при випробуваннях відповідала 16-20 °С. Вологість повітря в ході проведення дослідів не контролювалась і відповідала стандартним умовам 40-60%.

Попередню обробку зразків не проводили. З метою підвищення точності та достовірності результатів досліджень, кількість зразків що випробовувались складало не менше як три на одну точку. Коефіцієнт тертя контролювався комп'ютером та вимірювався згідно [8]. Амплітуда взаємного переміщення зразків складала 500 мкм, а база випробувань становила 100 тис. циклів. Питоме навантаження зразків становило 5, 10 та 12 МПа.

### **Дослідження металополімерних трибосистем при зношуванні в умовах вібраційного навантаження.**

Результати зміни лінійного зношування металополімерних композиційних матеріалів в залежності від навантаження представлено на рис. 2.

Дослідженнями встановлено, що при постійному кількості циклів досліджень, рівному 100 тис. циклів, в діапазоні навантажень від 5 до 12 МПа майже всі матеріали мають пропорційний знос до 10 МПа. Але характер зносу металополімерної стрічки (МПС) дещо інший. Знос при навантаженні 5 МПа значно більше ніж у матеріалів ZX324VMT, Fluroglide та Iglidur. При навантаженнях в 10 МПа результати зносу майже однакові у всіх матеріалів. На цьому етапі матеріал Iglidur має знос більше ніж у матеріалу МПС, проте результати зносу інших матеріалів лежать нижче. Картина зносу повністю змінюється при підвищенні навантаження до 12 МПа. Із графіка (рис. 2) видно, що зношування МПС має найменше значення, про те як у всіх інших матеріалів знос підвищується на 10-20 %.

Характер зношування матеріалів ZX324VMT 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 пластику PTFE. Така тенденція поєднання матеріалів продовжується і поглиблюється останніми роками. Розширення технічних областей застосування таких матеріалів [11] досягається завдяки високій несучій здатності, зносостійкості, демпфуючими якостями та відсутності в необхідності технічного обслуговування полімерних антифрикційних композитів, які знаходять застосування практично у всіх галузях машинобудування.

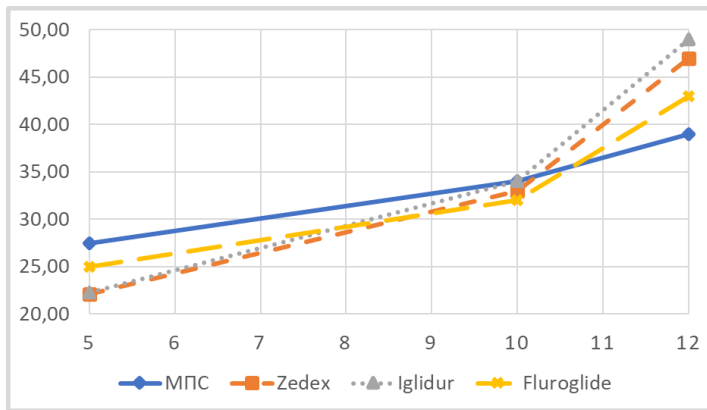


Рис. 2 – Залежність лінійного зносу полімерних композиційних матеріалів від питомого навантаження в умовах вібрації. Умови випробувань: (A-500 мкм,  $\nu$  – 3 Гц,  $N$  –  $10^5$  циклів,  $T$  – 293 К).

Аналіз зносу МПС при навантаженні в 5 МПа має найбільшу величину. Природа матеріалу така, що при навантаженні спочатку іде обжимання матеріалу  $\text{PTFE}+15\%\text{C}+5\%\text{MoS}_2$  до певного значення, а потім навантаження на себе сприймає бабіт на металевій стрічці. Тобто полімерний матеріал 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 [12]. Міцність полімерного шару матеріалів споріднена із міцністю бабітового матеріалу а триботехнічні характеристики визначають матеріалом  $\text{PTFE}+15\%\text{C}+5\%\text{MoS}_2$ . Оскільки матеріал для основи полімерної суміші бронза на основі олова та інших матеріалів, то і характер зносу буде схожий на характер полімерного матеріалу. Тобто на початку роботи під дією перпендикулярних сил відбувається просадження (припрацювання) матеріалів із помірним модулем пружності. Це характерно для зношування полімерних матеріалів.

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 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 на протязі всього терміну служби. Таким чином металополімерна стрічка 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 вдвленим в неї полімерним матеріалом із наповнювачами. Така структура є типовою для шарнірних підшипників типу ШЛТ, де контакт матеріалу є сталь-органоволокніт. Склад тканини відрізняється від задач, та в нашому випадку це вуглецеві волокна переплетені із волокнами  $\text{PTFE}$  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 крива зносу (рис. 2) займає проміжне положення між матеріалами ZX324VMT, Iglidur та металополімерною стрічкою. При навантаженнях в 5 МПа результат зношування цього матеріалу середній. Пояснюватись це може щільністю тканими та її будовою. Тобто при навантаженні в 5 МПа матеріал Fluroglide має меншу початкову жорсткість ніж інші матеріали ZX324VMT та Iglidur і більшу ніж МПС. Характер зношування змінюється при навантаженні в 10 МПа. Тут вже працює весь матеріал включаючи і фемпфуючі властивості вуглецевих волокон та PTFE. Але при підвищенні навантаження до 12 МПа зношування підвищується та знаходиться посередні між матеріалами МПС та ZX324VMT, Iglidur.

На рис. 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 металополімерної стрічки з огляду на те, що поверхневий шар полімерного матеріалу найменш міцний серед матеріалів, що досліджуються. Менш за все цей ефект спостерігався у матеріалів ZX324VMT та Iglidur. При дослідженні матеріалу Fluroglide завдяки своїй структурі спочатку відбувалось зміцнення (здавлювання) армованих волокон а потім вже процес їх пошкодження.



Рис. 3 – Топографії поверхонь тертя матеріалів: металополімерної стрічки (а), Fluroglide (б), після випробувань в умовах вібраційних навантажень. Умови випробувань (А-500 мкм,  $v$  – 3 Гц, Р – 10 МПа, N –  $10^5$  циклів, T – 293 K).

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 [13], залежність має лінійний характер, за даними інших авторів [14] – 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 коливальних енергій в матеріалі, призводить до більш



рівномірного їх розподілу за об'ємом в армуючих волокнах полімерного матеріалу та може зменшити небезпеку руйнування. З іншої сторони – при високих демпфуючих властивостей полімерних матеріалів, забезпечує 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 напруг і пошкоджень, 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 приводити до постійного зростання ступеня пошкоджуваності пари тертя [13, 14]. 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 [14, 15]. Так автори роботи [120], досліджуючи матеріали, отримали схожу залежність в умовах вібрацій та реверсивного тертя. 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.

Одній із основних характеристик роботи трибосистеми є коефіцієнт тертя. Графік зміни коефіцієнта тертя від кількості циклів вібрації представлено на рис.4.

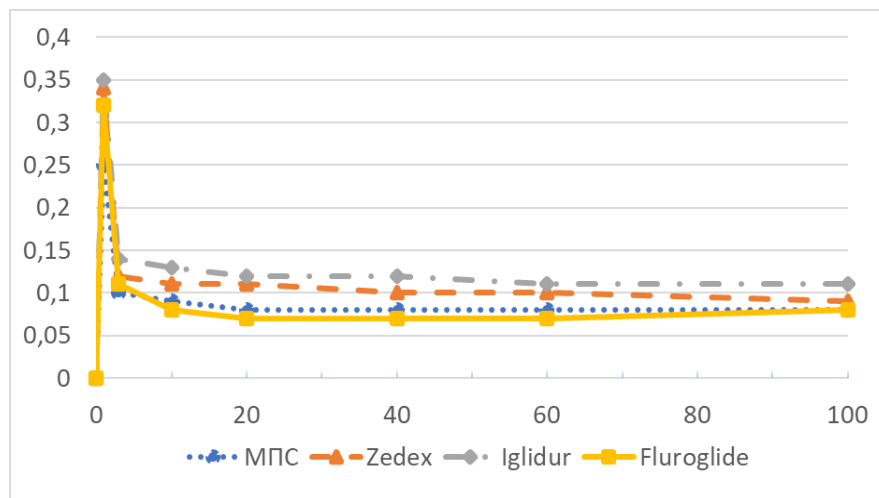


Рис. 4 – Залежність зміни коефіцієнтів тертя матеріалів, що досліджуються від кількості тисяч циклів вібрації. Умови випробувань (А-500 мкм,  $\nu$  – 3 Гц, Р – 10 МПа, N –  $10^5$  циклів, T – 293 К).

Аналізуючи графіки зміни 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 і встановлює самоорганізацію процесів в зоні тертя. У інших композиційних матеріалів

фторопласт лише у вигляді домішок, а основу (матрицю) складає матеріал PEEK і відповідно коефіцієнт тертя вищий. Невелика різниця коефіцієнту тертя, що встановився у матеріалі Iglidur визначає наявність поліамідних та вуглецевих аромованих волокон більшого розміру.

У початковий період випробування покриттів після невеликої кількості циклів коефіцієнт тертя дещо зростає. Однак, при подальшому збільшенні тривалості випробувань, коефіцієнт тертя різко падає. Етап першочергового зростання може знаходитися в межах від ста до кількох тисяч 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 пройшов його спад відразу з початком випробувань. Неоднозначність зміни коефіцієнта тертя вже на ранніх стадіях вібрацій свідчить про те, що при зміні параметрів навантаження тертя, відбувається зміна параметрів провідних процесів контактної взаємодії, природа яких залишається недостатньо ясною [13].

Досліджувані покриття в діапазоні до 1 тис. циклів знаходяться на стадії приробітку з контрзразком. Цей період характеризується нестабільним коефіцієнтом тертя. Механізм зношування покриттів може змінюватися багато разів, доки стане стабільним [15]. У деяких роботах, при дослідженнях в умовах вібрації, цей період роботи взагалі не беруть до уваги. Найменші коефіцієнти тертя, що встановилися, мають металополімерна стрічка та Fluroglide, що пояснюється наявністю на поверхні матеріалу PTFE та наповнювачів у вигляді твердих мастильних матеріалів.

Таким чином, вибір композиційного антифрикційного матеріалу 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 контактній площині-площині можна сказати, що стандартні зразки для випробувань в умовах вібрацій згідно методики [8] не повно розкривають трибохарактеристики композиційних антифрикційних матеріалів і необхідно проведення додаткових випробувань.

### **Висновки.**

1. Проаналізовано та вибрано найбільш оптимальні структури металополімерних композиційних матеріалів які можна використовувати в трибоконтаті метал-полімер в шарнірних підшипниках ковзання. Визначено сучасні високоефективні антифрикційні композиційні матеріали із різною структурою, які можна використовувати для досліджень підвищення довговічності шарнірних підшипників.

2. Визначено, що при навантаженнях в 5 МПа значну роль у зношуванні композиційних полімерних матеріалів відіграють поверхневі шари при вібраційних випробуваннях із малою частотою. При невеликих навантаженнях зносостійкість трибопари визначається полімерним матеріалом та його трибомеханічними характеристиками. Найбільший знос показує матеріал PTFE+15%С+5%MoS<sub>2</sub> на бабітовому матеріалі, який пояснюється його механічними властивостями. Найменший знос у матеріалів ZX324VMT та Iglidur TX 1 модуль пружності яких значно вище за PTFE.

3. Встановлено, що конструкція композиційного матеріалу відіграє першочергове значення при підвищенні навантаження при низькочастотних

вібраційних випробуваннях. Визначено, що матеріал Fluroglide, який складеться із вуглецевих волокон із додаванням матеріалу PTFE із функціональними добавками показує високі триботехнічні характеристики які можна порівняти із класичною металофторопластовою стрічкою. При граничних навантаженнях у металополімерних композиційних матеріалів ключову роль відіграють релаксаційні процеси та здатність основи композиційного матеріалу стримувати полімерні матеріали та наповнювачі від роздавлювання та від дії реверсивних рухів. В цих критичних умовах роботи матеріал Fluroglide показує зносостійкість вище ніж металофторопластова стрічка.

### Список літератури

1. 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.
2. 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](https://doi.org/10.1007/978-1-56990-525-8_14)
3. Rymuza, Zygmunt. "Adhesion and wear in miniature plastic bearings." Wear 142, no. 1 (February 1991): 185–93. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90160-y](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90160-y)
4. Чернец М.В., Корнієнко А.О., Руденко П.В. Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 4. Політетрафторетилени (фторопласти). // Проблеми тертя та зношування, 2022. - № 2(95). – С. 27 – 34.
5. Чернець М., Корнієнко А. Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 3. Полієфіркетони, терефталани. Problems of Friction and Wear. 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)
6. 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>
7. Мисковець С.В. Зносостійкість бронзових деталей паливної апаратури в середовищі дизельних палив / С. В. Мисковець, П. П. Савчук // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. - 2014. - № 1. - С. 208-212. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdmj\\_2014\\_1\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdmj_2014_1_30)
8. ГОСТ 23.211-80. Методика досліджень на фретинг та фретинг-корозію. – М. 1980. – 24 с.
9. 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
10. 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». К.: НАУ, 2021. – 42с.
11. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. Проблеми тертя та зношування. 2023. №1(98). С. 55-62.
12. Spherical Race Bearings. Encyclopedia of Tribology. Boston, MA, 2013. P. 3225. URL: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_101292](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_101292)

13. 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>

14. 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>

15. Non-stationary friction-induced vibration with multiple contact points / Z. Li et al. Nonlinear Dynamics. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08321-0>

Стаття надійшла до редакції 21.05.2024.

**Хімко Маргарита Сергіївна** – заступник директора з безпеки польотів Авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШНС», вул. Староноводницька, 6б, м. Київ, Україна, 01015, тел./факс: +38 0934415942, E-mail: [margarytakhimko@gmail.com](mailto:margarytakhimko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

**Хімко Андрій Миколайович** - канд. техн. наук, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067658, E-mail: [andrii.khimko@npp.nau.edu.ua](mailto:andrii.khimko@npp.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067770, E-mail: [rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua](mailto:rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

**Кліпаченко Владислав Володимирович** - директор Авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШНС», вул. Староноводницька, 6б, м. Київ, Україна, 01015, тел./факс: +380673474147, E-mail: [v.klipachenko@h3ops.com](mailto:v.klipachenko@h3ops.com), <https://orcid.org/0009-0003-3750-4421>

**Макаренко Руслан Олексійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри гідрогазових систем, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380506325635, E-mail: [makrusale@gmail.com](mailto:makrusale@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9515-144X>

---

*M.S. KHIMKO, A.M. KHIMKO, P.G. MNATSAKANOV, V.V. KLIPACHENKO, R.O. MAKARENKO*

## **WEAR RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR PLANE SPHERICAL BEARINGS**

The use of polymer composite materials allows significantly reduce the labor intensity of manufacturing friction unit parts due to high-performance and economical resources.

According to the definition, a composite material consists of one or more continuous phases of a homogeneous matrix with one or more dispersive phases. In this regard, the reliable operation of metal-polymer tribosystems primarily depends on the structural and morphological factor influencing the tribomechanical characteristics of materials. The principle of producing composite materials consists of a pre-created combination of two different phases (fillers and matrix) using certain technological techniques. As a result of filling, materials are obtained whose physical and mechanical properties differ from the matrix. The choice of fillers for metal-polymer materials depends on the purpose of the material, the need to change some tribomechanical characteristics and the type of polymer matrix.

Plain spherical bearings with metal-polymer tribosystems are very popular in the aviation industry. They are made from stainless and corrosion-resistant steels and do not require maintenance. Compacts have an extremely high payload-to-weight ratio and are used in primary and secondary flight control systems. They have a hinged type design.

The work identifies modern antifriction composite materials for use in plain spherical bearings. The structures and wear resistance characteristics of polymer materials under special operating conditions - vibration, reverse movements - have been determined.

It has been established that the design of the composite material is of paramount importance under increased loads in low-frequency vibration tests. It has been determined that the Fluroglide material, consisting of carbon fibers with the addition of PTFE material with functional additives, shows high tribological characteristics comparable to classic metal fluoroplastic tape. At extreme loads of metal-polymer composite materials, a key role is played by relaxation processes and the ability of the base of the composite material to restrain polymer materials and fillers from crushing and from the action of reverse movements. Under these critical operating conditions, Fluroglide exhibits superior wear resistance to metal fluoroplastic tape.

**Keywords:** plane spherical bearing, composite polymer materials, structure, vibrations, reverse motion, wearing, operational conditions.

### **Referenses**

1. Chernets M.V., Romanenko Y.O., Kornienko A.O., Chernets Y.M. Methodological basis of calculation the metal and metal-polymer of sliding bearings: Contact strength, wearing, durability. Part. 3. Metal-polymer transmissions. – K.: NAU, 2022. – 250 p.
2. 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](https://doi.org/10.1007/978-1-56990-525-8_14)
3. Rymuza, Zygmunt. "Adhesion and wear in miniature plastic bearings." *Wear* 142, no. 1 (February 1991): 185–93. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90160-v](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90160-v)
4. Tribological behavior of polymer materials for hybrid metal-polymer assemblies of dry sliding friction. Part. 4. Polytetrafluoroethylene (fluoroplastics). // *Problems of Friction and Wear*, 2022. - № 2(95). – P. 27 – 34.
5. Chernets M.V., Kornienko A.O. Tribological behavior of polymer materials for hybrid metal-polymer assemblies of dry sliding friction. Part 3. Polyetherketones, terephthalans. *Problems of Friction and Wear*. 2022. № 2(95). C. 19–26. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(95\).16553](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(95).16553)

6. 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>
7. Myskovets S.V. Wear resistance of bronze parts of fuel equipment in the environment of diesel fuels / S. V. Muskovets, P. P. Savchuk // Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. - 2014. - № 1. - P. 208-212. - Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm1\\_2014\\_1\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm1_2014_1_30)
8. GOST 23.211-80. Methodic of investigation of fretting and fretting-corrosion. – M. 1980. – 24 p.
9. 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
10. Report from the Scientific research work № 1.0668.2021 Testing of ШНР6ЮТ and ШН10ЮТ bearings and their compliance analysis with GOST 3635-78. Expert analysis of performance and geometry of ШНР6ЮТ, ШН10ЮТ bearings». K.: NAU, 2021. – 42p.
11. Marchuk R.M., Mnatsakanov R.H. Analysis of polymer composite materials for sliding bearings. Friction and wear problems. 2023. №1(98). P. 55-62.
12. Spherical Race Bearings. Encyclopedia of Tribology. Boston, MA, 2013. P. 3225. URL: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_101292](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_101292)
13. 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>
14. 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>
15. Non-stationary friction-induced vibration with multiple contact points / Z. Li et al. Nonlinear Dynamics. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08321-0>

**Khimko Margaryta** – Safety Manager of Air Company LLC “H3Operations”, Staronavodnytska Str, 6b, Kyiv city, Ukraine, 01015, tel./fax: +380934415942, E-mail: [margarytakhimko@gmail.com](mailto:margarytakhimko@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

**Khimko Andrii** - PhD, Associate Professor of the Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, Lybomyra Huzara Av. 1, Kyiv city, Ukraine, 03058, tel.: +380444067658, E-mail: [andrii.khimko@npp.nau.edu.ua](mailto:andrii.khimko@npp.nau.edu.ua). <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>

**Mnatsakanov Rudolf** – Doctor of technical science, Professor, the Professor of the Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, Lybomyra Huzara Av. 1, Kyiv city, Ukraine, 03058, tel.: +380444067770, E-mail: [rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua](mailto:rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua) <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

**Klipachenko Vladyslav** – Director of Air Company LLC “H3Operations”, Staronavodnytska Str, 6b, Kyiv city, Ukraine, 01015, tel./fax: +380673474147, E-mail: [v.klipachenko@h3ops.com](mailto:v.klipachenko@h3ops.com). <https://orcid.org/0009-0003-3750-4421>

**Makarenko Ruslan** – PhD, Associate Professor of the Hydrogas Systems Department, National Aviation University, Lybomyra Huzara Av. 1, Kyiv city, Ukraine, 03058, tel.: +380506325635, E-mail: [makrusale@gmail.com](mailto:makrusale@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0001-9515-144X>