

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(106).19819

А.М. ХІМКО<sup>1</sup>, М.С. ХІМКО<sup>2</sup>, О.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, В.В. КЛІПАЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Київський авіаційний інститут, Київ<sup>2</sup>ТОВ Авіакомпанія «НЗОПЕРЕЙШІНС», Київ

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШАРНІРНИХ ПІДШИПНИКІВ

*Розроблена модель шарнірного підшипника із композиційними матеріалами для розрахунку напружено-деформованого стану. Визначено структуру моделі підшипника із урахуванням складу композиційних матеріалів. Визначено питомі навантаження та запас стійкості напружено-деформованого стану в елементах композиційних матеріалів із різними комбінаціями обойм підшипників. Визначено, що використання титанових сплавів замість сталі зменшує питомі навантаження композиційних матеріалів до 20% в залежності від умов навантаження.*

**Ключові слова:** шарнірний підшипник, композиційні полімерні матеріали, структури, напружено-деформований стан, реверсивний рух, умови експлуатації.

**Вступ.** Вузли машин із застосуванням полімерних композиційних матеріалів, мають меншу масу, працюють практично безшумно, мають високу демпфуючу здатність, не вимагають мастила [1-2]. Це особливо актуально для авіаційної промисловості. 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 [3].

Шарнірні підшипники ковзання із композиційними матеріалами 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. Однак останнім часом з'являються велика кількість сучасних високоінженерних зносостійких композиційних матеріалів які використовуються у вузлах тертя [4-5].

Таким чином цікаво визначити коректність застосування нових композиційних матеріалів у авіаційних шарнірних підшипниках із різною комбінацією матеріалів обойм.

**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.

**Розробка моделі шарнірного підшипника із композиційними матеріалами.** Для моделювання напружено-деформованого стану металополімерних та полімерних композиційних матеріалів в шарнірних

підшипниках застосовувався модуль Simulation, що входить в програмний комплекс SOLIDWORKS. Програма SOLIDWORKS Simulation Premium дозволяє ефективно аналізувати нелінійні та динамічні реакції, динамічні навантаження та композиційних матеріалів у вузлах тертя (шарнірних підшипниках), а також включає три додаткові типи досліджень: нелінійне статичне, нелінійне динамічне і лінійне динамічне.

Для моделювання процесів напружено-деформованого-стану композиційних матеріалів в шарнірних підшипниках була розроблена модель підшипника (рис. 1) із двома шарами матеріалів між металевими обоймами підшипника. Розкладка основних елементів моделі шарнірного підшипника для моделювань представлена на рисунку 2.

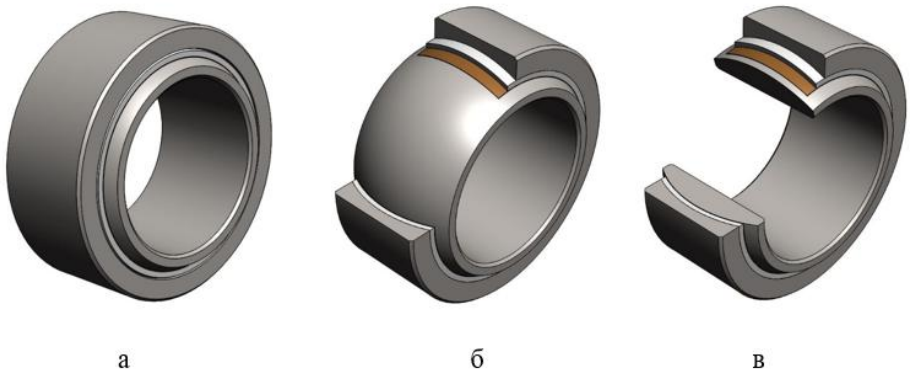


Рис. 1. Розрахункова модель шарнірного підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами: а – підшипник в зборі, б – підшипник із перетином зовнішньої обойми та композиційних матеріалів, в – перетин моделі підшипника.

Для спрощення розрахунків та процесів моделювання було визначено, що сумарна товщина антифрикційного композиційного матеріалу 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 композиційних матеріалів та в майбутньому допомагає зменшити коефіцієнт тертя та момент зміщення підшипника. Другий шар композиційних матеріалів має товщину в 0,9 мм та є основним матеріалом, який працює на тертя під час роботи шарнірного підшипника.

### **Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану елементів шарнірних підшипників із композиційними антифрикційними матеріалами**

Для повноти моделювань шарнірного підшипника необхідно визначити окрім комбінацій полімерних композиційних матеріалів ще і варіанти із зміною матеріалів обойм шарнірного підшипника. Тому було визначено для моделювання два комплекти шарнірних підшипників із матеріалами обойм сталі 95X18Ш та титанового сплаву ВТ-22. Також всі матеріали та комбінації підшипників мають бути співставленні із оригінальними шарнірними підшипниками на металополімерній стрічці.

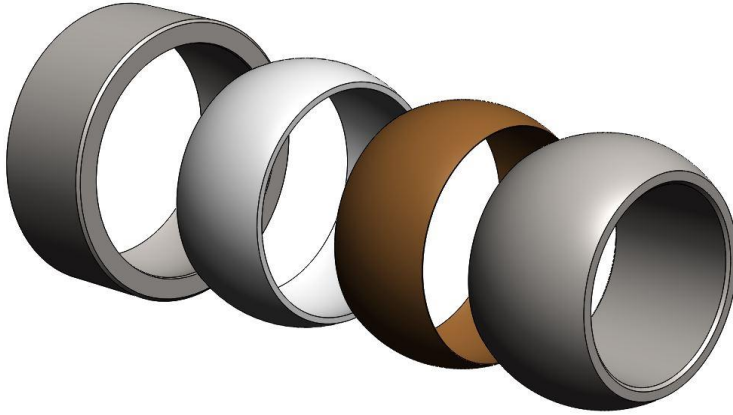


Рис. 2. Розкладка основних елементів шарнірного підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами при моделюванні.

На рис. 3 представлено шари матеріалів для моделювання процесів в шарнірних підшипниках, а в таблиці 1 представлено варіанти матеріалів, які використовували для моделювання процесів напружено-деформованого стану антифрикційних композиційних матеріалів.

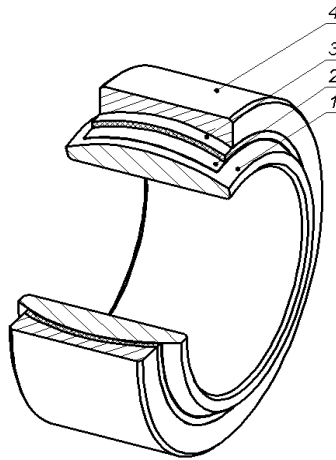


Рис. 3. Шари матеріалів для моделювання напружено-деформованого стану в шарнірному підшипнику: 1 – внутрішня обойма підшипника, 2 – внутрішній шар композиційного антифрикційного матеріалу (PTFE), 3 – основний шар композиційного антифрикційного матеріалу, 4 – зовнішня обойма підшипника.

Зразок № 1 відповідає реальним шарнірним підшипникам які використовують в якості антифрикційного матеріалу металополімерну стрічку та випускаються масово для повітряних суден.

Зразки № 2, 3, 4 – це комбінації вискоефективних антифрикційних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників, які знаходяться між сталевими обоймами підшипникової сталі 95X18Ш. 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 захоплення. Тому поверхня тертя обойми

шарнірного підшипника має бути покрита шаром молібдену, товщиною близько 100 мкм, для підвищення зносостійкості. Для досліджень напружено-деформованого стану шарнірних підшипників покриття молібдену не враховувалось тому, що основна увага буде приділена розподілу навантаження в процесі роботи підшипника із антифрикційними композиційними матеріалами.

Таблиця 1

**Варіанти комбінацій елементів шарнірного підшипника із композиційними антифрикційними матеріалами для досліджень**

Зразок	Матеріал шарів підшипника			
	Елемент 1	Елемент 2	Елемент 3	Елемент 4
1	Сталь 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

За основу моделі розрахунку напружено-деформованого стану варіантів шарнірних підшипників 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 шарнірного підшипника на валу із зовнішнім розподіленням навантаженням від важеля конструкції літака. Моделювання напружено-деформованого стану композиційних матеріалів 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 напружено-деформованого стану приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Фізико-механічні властивості матеріалів елементів шарнірних підшипників**

Характеристика матеріалів	95X18	Бронза олов.	PTFE	Вуглеволокно	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 <sup>3</sup>	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

Приклад отриманих результатів моделювань шарнірних підшипників та елементів антифрикційних композиційних матеріалів представлено на рис. 4-6 (для зразка № 1).

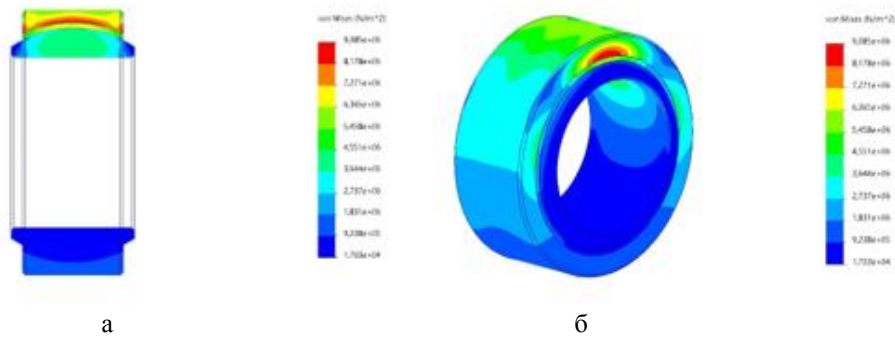


Рис. 4. Характер розподілу напружень в моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3 кН: а – переріз моделі, б – повна модель.

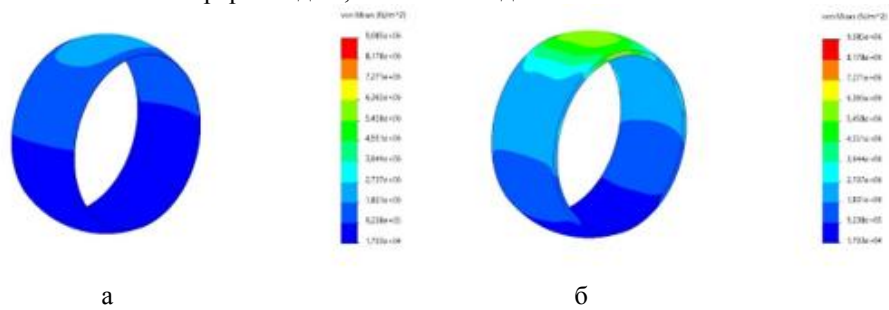


Рис. 5. Характер розподілу напружень в елементах композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3кН: а – елемент 2, б – елемент 3.

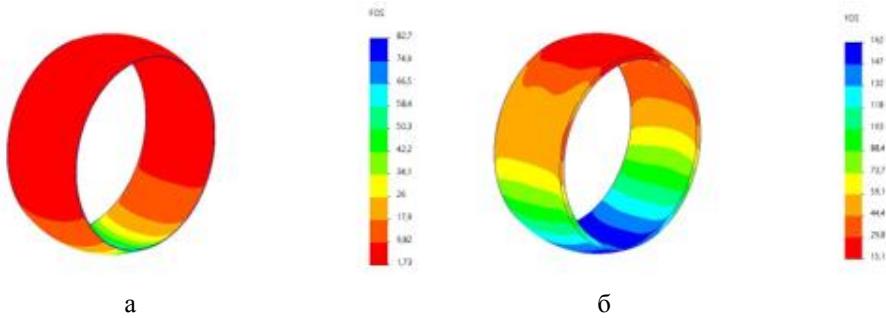


Рис. 6. Запас міцності в елементах композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 1) при навантаженні 3кН: а – елемент 2, б – елемент 3.

Проаналізувавши отримані результати напружено-деформованого стану моделей шарнірних підшипників із різними варіантами антифрикційних композиційних матеріалів 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. 7) та виступає в реальному шарнірному підшипнику, як шар для припрацювання основного композиційного матеріалу (елемент 3).

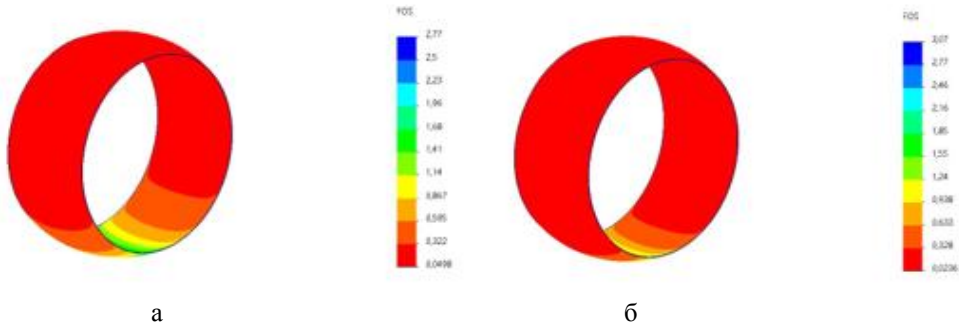


Рис. 7. Запас міцності елемента 2 композиційного антифрикційного матеріалу моделі підшипника (зразок № 3) при навантаженнях: а – 100 кН, б – 200 кН.

Також при аналізі результатів впровадження титанових обойм в моделях зразків № 5, 6, 7 ми бачимо зменшення питомих напружень у поверхнях шарнірних підшипників, порівняно із матеріалом 95X18Ш для зразків № 2, 3, 4. Такий ефект спостерігається на всіх етапах моделювання напружено-деформованого стану шарнірних підшипників при співставленні зразків №: 2-5 (рис. 8), 3-6 (рис. 9), 4-7 (рис. 10) при навантаженнях в 3, 100 та 200 кН.

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

Такий ефект можна пояснити тим, що, титановий сплав більш пластичний ніж матеріал 95X18Ш (див. табл. 2) та більше демпфує та перерозподіляє навантаження серед елементів шарнірного підшипника.

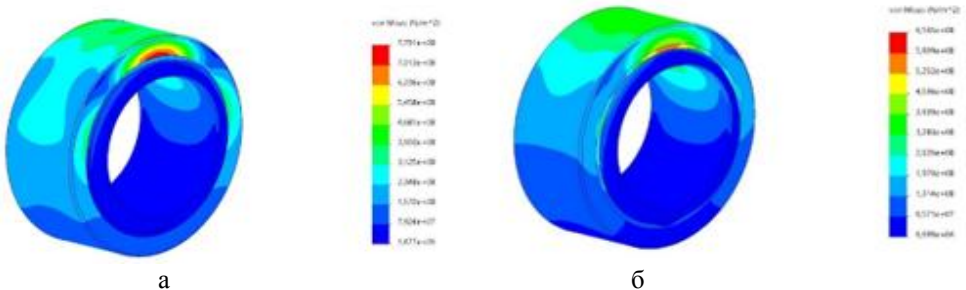


Рис. 8. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 2, б – зразок № 5.

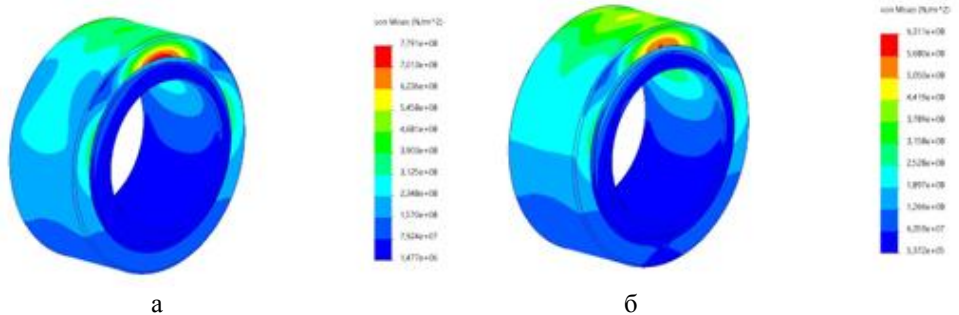


Рис. 9. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 3, б – зразок № 6.



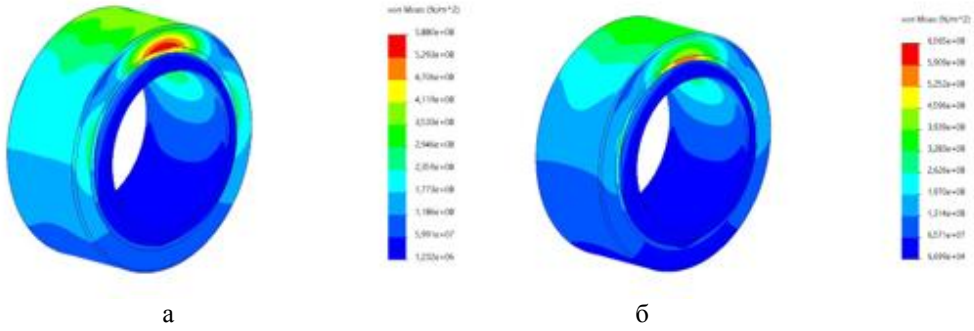


Рис. 10. Характер розподілу напружень в моделі підшипника при навантаженні 200 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

В роботах [6-7] показано переваги титанових матеріалів по розподіленню навантажень під час випробувань на зносостійкість. Так, в роботі [7] 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. 11) та запасом міцності (рис. 12) у композиційних матеріалах (елемент 3) при моделюванні напружено-деформованого стану шарнірних підшипників, якщо порівнювати обидва із титанового сплаву та сталі.

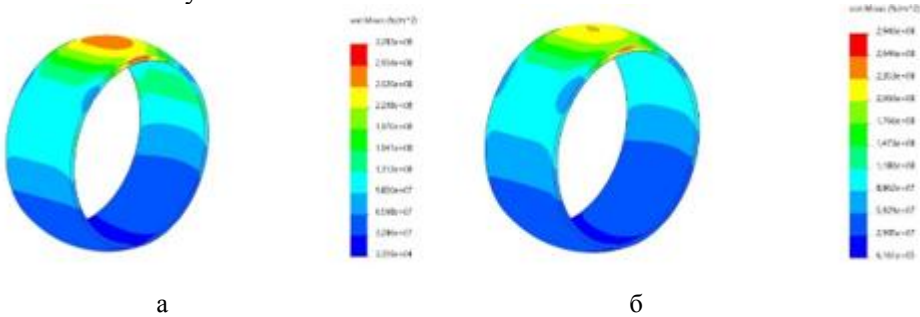


Рис. 11. Характер розподілу напружень в композиційному матеріалі (елемент 3) при навантаженні 100 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

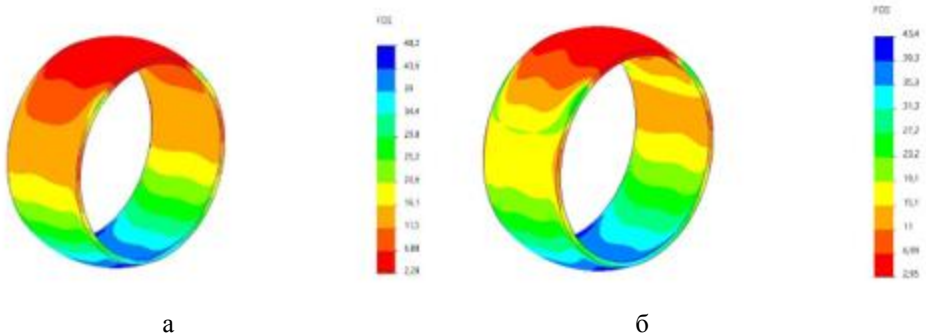


Рис. 12. Запас міцності композиційного матеріалу (елемент 3) при навантаженні 100 кН: а – зразок № 4, б – зразок № 7.

При аналізі напружень та запасу міцності композиційних матеріалів (елемент № 3, зразки № 2-4) в порівнянні із моделлю підшипника з металополімерною стрічкою (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 металополімерною стрічкою та матеріалом моделі на основі вуглецевих волокон, без сполучника (рис. 13). Модель вуглецевих волокон має навіть на 10-15 % більші напруження, в порівнянні із металополімерною стрічкою. Це пояснюється високими фізико-механічними характеристиками вуглеволокон (див. табл. 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.

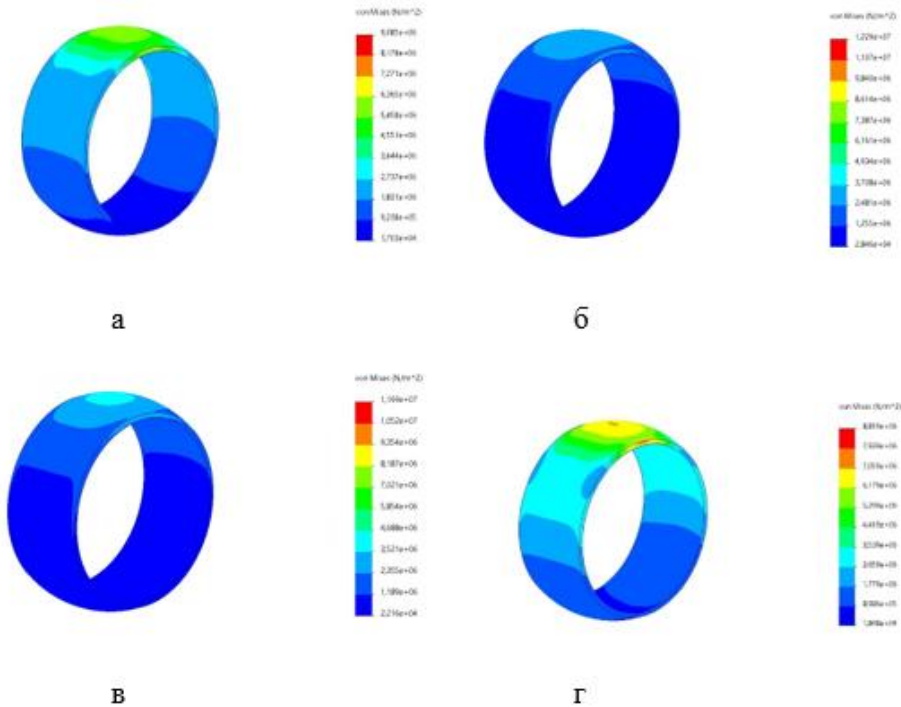


Рис. 13 – Характер розподілу напружень в композиційних матеріалах (елемент № 3, зразки № 1-4) моделі підшипника при навантаженні 3 кН: а – бронза олов., б – ZX-324VMT, в – TX1, г – вуглеволоконна.

Проаналізувавши запас міцності композиційних матеріалів (елемент № 3, зразки 1-4) при навантаженні в 3 кН (рис. 14) можна стверджувати, що композиційні матеріали 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 матеріалі із металополімерною стрічкою (15,1) та можуть опосередковано свідчити про зносостійкість композиційних матеріалів.



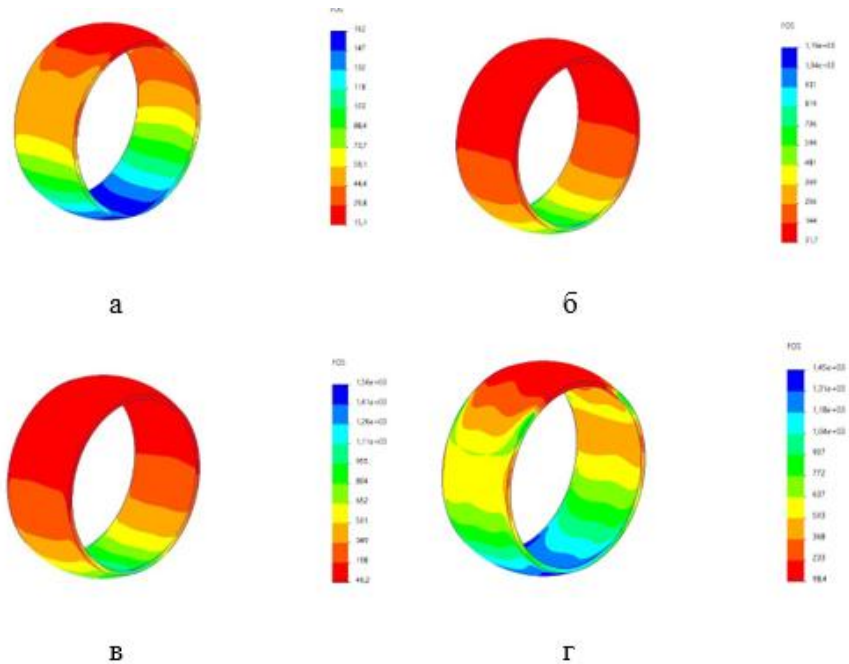


Рис. 14. Запас міцності композиційних матеріалів (елемент № 3, зразки № 1-4) моделі підшипника при навантаженні 3 кН: а – бронза олов., б – ZX-324VMT, в – TX1, г – вуглеволокна.

При навантаженнях в 100 та 200 кН зберігається аналогічна залежність при розрахунку запасу міцності композиційних матеріалів. При навантаженнях в 200 кН розрахунки показують запаси міцності в композиційних матеріалів 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 композиційних матеріалів в зоні контакту.

Для більш наочного аналізу напружено-деформованого стану композиційних матеріалів з використанням обоєм шарнірних підшипників із матеріалів 95X18Ш та ВТ-22 представимо гістограми для підшипника із металополімерної стрічки (зразок № 1) та із вуглеволокна (зразок № 4 та 7). На рис. 15 представлено максимальні значення розподілення нормальних напружень в композиційних матеріалах (елемент № 3) при навантаженнях 100 та 200 кН. Аналогічна залежність відбувається і при навантаженні в 3 кН.

За результатами оцінки напружено-деформованого стану 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 об'ємі зі сталі 95X18Ш та сплавів ВТ-22 відповідно, в порівнянні з металополімерною стрічкою. Зростання напружень обумовлено жорсткістю вуглецевих волокон, їх низькою релаксаційною здатністю, відсутністю сполучника, який забезпечує високі демпфуючі властивості в полімерних композиційних матеріалів. Зазначені чинники не враховуються при моделюванні, коефіцієнту запасу міцності зростає в 5-6 разів.

Використання полімерних композиційних матеріалів 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 металополімерною стрічкою. В разі використання в якості матеріалу внутрішньої та зовнішньої обойми шарнірних підшипників титанового сплаву BT-22, нормальні напруження по Мізеру в моделях з полімерних композиційних матеріалів Zedex та Iglidur зменшуються в 2,08 та 1,55 раз, в порівнянні з металополімерною стрічкою на сталі. Зазначимо, що при використанні сплаву BT-22 зменшення нормальних напружень при моделюванні встановлено на 11 та 7 % для полімерних композиційних матеріалів Zedex та Iglidur, в порівнянні з напруженнями в даних полімерних композиційних матеріалів на сталевих обоймах, що позначається на результатах зношування [8-10].

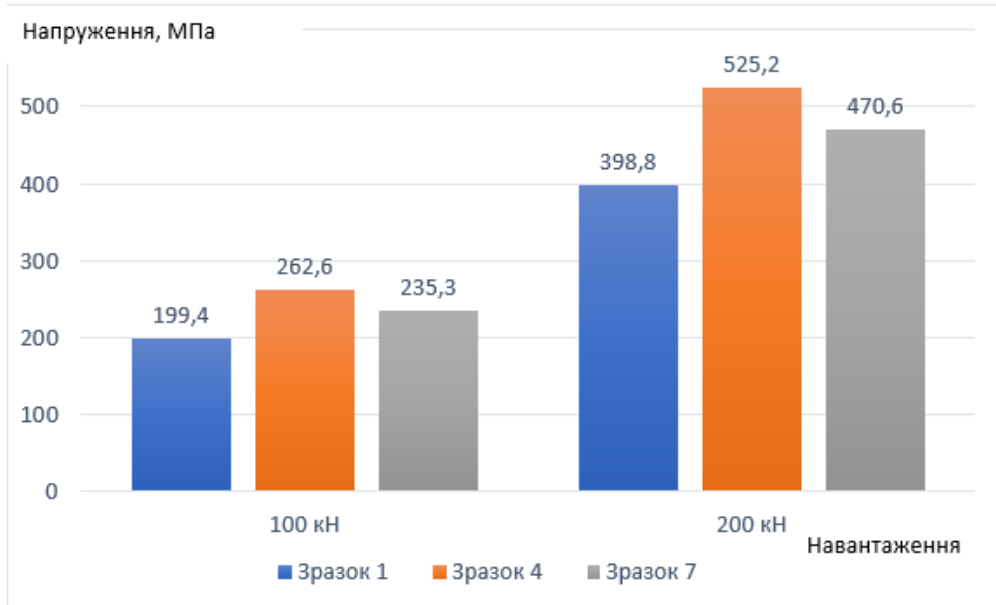


Рис. 15 – Гістограма розподілу напружень в композиційних матеріалах (елемент № 3) при моделюванні напружено-деформованого стану шарнірних підшипників при навантаженнях в 100 та 200 кН:

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

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

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

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

Таким чином, результати моделювання напружено-деформованого стану свідчать про ефективність використання полімерних композиційних матеріалів Zedex ZX-324VMT та Iglidur TX1, армованих вуглецевими волокнами, в якості зносостійких антифрикційних композиційних матеріалів для зовнішньої обойми шарнірних підшипників. Заміна сталевий обойми на обойму з поверхневозміцненого титанового сплаву забезпечує більш ефективну релаксацію напружень та збільшення коефіцієнту запасу міцності при моделюванні.

#### Висновки.

1. 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.

2. 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.

#### Список літератури

1. 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](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31982/1/Pidshypnyky_kovzannia.pdf)
2. 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>
3. Khimko M., Khimko A., Mnatsakanov R., Mikosyanchuk O. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry/ Problems of tribology. V.29, № 2/112-2024, P.16-22.
4. 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.
5. 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.
6. 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
7. 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
8. 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
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.
10. 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)

Стаття надійшла до редакції 10.02.2025.

---

A.M. KHIMKO, M.S. KHIMKO, O.V. POPOV, V.V. KLIPACHENKO

### ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIGHTENING STATE OF COMPOSITE MATERIALS FOR SPHERICAL PLAIN BEARINGS

A model of a spherical plain bearing made of composite materials for the expansion of a stress-strain state has been developed. The model allows to estimate the stress and safety margin of the spherical plain bearing elements. The structure of the bearing model is determined from the storage of high-engineering composite materials. The strength and reserve capacity of the stress-strain state machine in elements of composite materials from various combinations of bearing races at pressures of 3, 100 and 200 kN have been identified. The use of polymer composite materials Zedex ZX-324VMT and Iglidur TX1 on steel 95X18III ensures a reduction in normal Mizer stress by 1.45 and by 1.27 times, equal to the same. with metal-polymer stitching. Depending on the internal and external frame of the spherical plain bearings of titanium alloy BT-22, the normal stress according to Mizer in models with polymer composite materials Zedex and Iglidur change by 2.08 and 1.55 times, when aligned with metal-polymer stitching on steel. Modeling of the stress-strain state of the spherical plane bearings made of composite antifriction materials resulted in a change in the pressure stress on the surface balls of the bearing materials when replacing titanium alloys BT22 instead of bearing steel 95X18III up to 20%, depending on the material and loading conditions

The results of stress-strain modeling indicate the effectiveness of using Zedex ZX-324VMT and Iglidur TX1 carbon fiber-reinforced polymer composite materials as wear-resistant antifriction composite materials for the outer race of spherical plain bearings. Replacing the steel race with a race made of surface-hardened titanium alloy provides more effective stress relaxation and an increase in the safety factor during modeling.

**Keywords:** spherical plain bearing, polymer composite materials, structures, stress-strain state, reversible motion, operating conditions.

#### References

1. Skyrativskiy A.K. Plain bearings. Educational visual aid. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. 38p. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31982/1/Pidshyynyky\\_kovzannia.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31982/1/Pidshyynyky_kovzannia.pdf)
2. 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>
3. Khimko M., Khimko A., Mnatsakanov R., Mikosianchyk O. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry/ Problems of tribology. V.29, № 2/112-2024, P.16-22.
4. Khimko M.S., Khimko A.M., Mnatsakanov R.H., Klipachenko V.V., Makarenko R.O. Wear resistance of polymer composite materials for plane spherical bearings. Friction and wear problems. 2024. № 2 (103). P. 29-42.
5. Khimko M.S., Klipachenko V.V., Filonenko O.Y. Analysis of composite polymer materials for aviation spherical bearings. XVII International Scientific and Practical Conference "Integrated Intelligent Robotic Complexes" (IIPTK-2024), 21-22 of May 2024, Kyiv: NAU, 2024. – P. 121-123.
6. Pohreliuk I.M. The physico-chemical foundations of nitriding process intensification of titanium alloys and strengthened layers engineering with higher wear and corrosive resistance: manuscript, Lviv, 2001.320 pages.
7. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. Friction and wear problems: scientific and technical collection. 2011. Ed. 55. P. 112–117. DOI: 10.18372/0370-2197.55.3249

8. 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

9. Khimko M.S., Khimko A.M., Mnatsakanov R.H., Mikosianchyk O.O. Influence of thermophysical properties of the metal of polymer composite materials on wear resistance. Friction and wear problems. 2024. № 3 (104). P. 91-100.

10. 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)

**Khimko Andrii Mykolayovych** – candidate of technical science, associate professor, associate professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, Kyiv Aviation Institute, Lybomyra Huzara av., 1, Kyiv city, Ukraine, 03058, tel.: +380444067658, E-mail: andrii.khimko@npp.kai.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>

**Khimko Marharyta Serhiivna** – First deputy Director of the airline “H3Operations” LLC, Staronavodnytska str., 6b, Kyiv city, Ukraine, 01015, tel/fax: +380934415942, E-mail: [m.khimko@h3ops.com](mailto:m.khimko@h3ops.com). <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

**Popov Oleksandr Viktorovych** – candidate of technical science, associate professor, head of the Aircraft Continuing Airworthiness Department, Kyiv Aviation Institute, Lybomyra Huzara av., 1, Kyiv city, Ukraine, 03058, tel.: +380444082955, E-mail: oleksandr.popov@npp.kai.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-1029-2767>

**Klipachenko Vladyslav Volodymyrovych** – Director of the airline 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>

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

**Хімко Маргарита Сергіївна** – перший заступник директора Авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС», вул. Староноводницька, 6б, м. Київ, Україна, 01015, тел/факс: +380934415942, E-mail: [margarytakhimko@gmail.com](mailto:margarytakhimko@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

**Попов Олександр Вікторович** - канд. техн. наук, завідувач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Київський авіаційний інститут, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444082955, E-mail: oleksandr.popov@npp.kai.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-1029-2767>

**Кліпаченко Владислав Володимирович** – директор Авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШІНС», 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>