

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»  
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «**Підвищення довговічності герметизуючих пристроїв  
ходової частини машин на гусеничному ході»**»

Шифр **МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ**

Виконав: студент 2-го курсу, група МТВАмз 23-1

  
Підпис

Д.О.Волков  
Ініціали, прізвище


Керівник к.т.н., доц. каф. ТАМ.

  
Підпис

О.П.Бабак  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.

  
Підпис О.В. Духа  
Ініціали, прізвище

16 12 2024 р.

Хмельницький, 2024

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

7 жовтня 2024 року

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Волкову Дмитру Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту (роботи) «Підвищення довговічності герметизуючих пристроїв ходової частини машин на гусеничному ході».

Рівень проекту (роботи) Бабак Олег Петрович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 28 серпня 2024 р. № 60 (Д28)

2. Строк подання студентом проекту на кафедру 2 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналіз структури та властивостей полімерних композиційних матеріалів, конструкцій та умов експлуатації підтримуючих котків багатоцільових гусеничних машин (БГМ); 2 Методи та засоби експериментальних досліджень; 3 Розробка та дослідження ПКМ; 4 Розробка герметизуючого пристрою підтримуючих катків багатоцільових гусеничних машин

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

### 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_----

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2024</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10. 2024</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2024</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2024</i>	
5	<i>Оформлення презентації магістерської роботи</i>	<i>1.12. 2024</i>	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	<i>5.12. 2024</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2024</i>	

Студент

  
Підпис

Д.О. Волков  
Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)

О.П. Бабак  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра робота Волкова Дмитра Олександровича на тему: «Підвищення довговічності герметизуючих пристроїв ходової частини машин на гусеничному ходу».

Кваліфікаційна робота магістра викладена на 84 сторінках машинописного тексту, і включає вступ та чотири розділи основного матеріалу та висновок, бібліографічний список з 68 найменувань та додатку.

Вирішенню цього завдання разом із розробкою більш досконалої конструкції ГУ ходової частини БГМ з використанням нового ПКМ, що забезпечує підвищення експлуатаційної надійності герметизуючих пристроїв ходової частини та присвячена моя кваліфікаційна робота.

У першому розділі наведено аналіз структури та властивостей відомих полімерних композиційних матеріалів та методів підвищення їх механічних та триботехнічних властивостей, а також аналіз конструкції та умов експлуатації герметизуючих пристроїв підтримуючих котків БГМ. Причиною відмови серійних герметизуючих пристроїв є передчасне старіння, підвищений знос і пошкодження гумових манжет ущільнювачів. На основі результатів аналізу сформульовано завдання кваліфікаційної роботи.

Примітка

Друга глава присвячена опису вибраних методів і засобів експериментального дослідження структури та властивостей полімерного композиційного матеріалу (включаючи оптимізаційні дослідження), розроблених установок і методик для дослідження герметизуючих і триботехнічних властивостей розробленої конструкції герметизуючого пристрою.

У третьому розділі розглянуто результати дослідження надмолекулярної структури, фізико-механічних та триботехнічних властивостей ПКМ.

У четвертому розділі наведено результати розрахунку основних конструктивних параметрів розробленого герметизуючого пристрою та дано опис ущільнювального елемента – манжети з розробленого ПКМ, наведено результати стендових випробувань, що дозволяють визначити характеристики швидкості та інтенсивності зношування ущільнювальних манжет в умовах навантаження, аналогічних умов експлуатації у складі БГМ.

У випускній роботі на захист виносяться такі наукові результати:

Встановлено закономірності процесів структурної модифікації наповненого ПТФЕ, що відображають взаємозв'язок виду та концентрації полідисперсних модифікаторів, включаючи нанорозмірні, на морфологію, ступінь кристалічності та розміри кристалічних утворень.

Отримано залежності механічних та триботехнічних властивостей полімерних нанокompозитів на основі ПТФЕ від концентрації вуглецевих нанотрубок (УНТ) у складі комплексного наповнювача модифікатора та обмеження об'ємного теплового розширення при термообробці ПКМ.

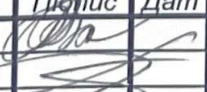



Ключові слова: УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ МАНЖЕТ, ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПЗИТІВ, ГЕРМЕТИЗУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ХОДОВА ЧАСТИНА, МОДИФІКАЦІЇ НАПОВНЕНОГО ПТФЕ.

Д.О. Волков  
Ініціали, прізвище

О.П. Бабак  
Ініціали, прізвище

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 Аналіз структури та властивостей полімерних композиційних матеріалів, конструкцій та умов експлуатації підтримуючих котків багатоцільових гусеничних машин (БГМ).....	12
1.1 Структура та властивості ПТФЕ як полімерної основи композиційних матеріалів (КМ) триботехнічного призначення.....	12
1.2 Аналіз конструкції, умов експлуатації та надійності підтримуючих катків БГМ.....	14
1.3 Вплив наповнювачів-модифікаторів на структуру та властивості політетрафторетилену.....	20
1.4 Вплив способу виготовлення та режимів технологічного процесу на структуру та властивості ПКМ на основі ПТФЕ.....	26
1.5 Обґрунтування складу наповнювачів-модифікаторів та способу виготовлення ПКМ на основі ПТФЕ.....	30
Висновки, мета та завдання дослідження.....	32
2 Методи та засоби експериментальних досліджень.....	34
2.1 Методи дослідження фазового складу та структури композиційних матеріалів.....	35
2.2 Методи та засоби дослідження механічних та триботехнічних властивостей.....	36
2.3 Методика розробки та оптимізації нового полімерного композиційного матеріалу.....	42

<b>МРТАМ 24.23469.000 ПЗ</b>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроб.		Волков		
Перевір.		Бабак		
Реценз.				
Н. Контр.		Маковкін		
Затверд.		Дихаєв		
Підвищення довговічності герметизуючих пристроїв ходової частини машин на гусеничному ході			Лім.	Арк.
			4	86
ХНУ група МТВАмз 23-1				

3 Розробка та дослідження ПКМ .....	45
3.1 Розробка та дослідження механічних та триботехнічних властивостей зносостійкого ПКМ .....	45
3.2 Оптимізація складу ПКМ за критеріями якості .....	49
3.3 Розробка технології виготовлення зразків ПКМ.....	51
3.4 Дослідження фазового складу та надмолекулярної структури полімерних нанокомпозитів .....	55
Висновки.....	65
4 Розробка герметизуючого пристрою підтримуючих катків багатоцільових гусеничних машин .....	66
4.1 Аналіз матеріалів герметизуючих пристроїв підтримуючих катків... ..	66
4.2 Механізми герметизації та тертя.....	69
4.3 Розробка конструкції герметизуючого пристрою підтримуючого катка .....	70
4.4 Лабораторне випробування герметизуючого пристрою.....	74
Висновки .....	78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ .....	79
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	80
ДОДАТКИ.....	86

## ВСТУП

Проблема забезпечення високого ступеня герметичності рухомо сполучених поверхонь деталей машин відноситься до одного зі складних науково-технічних завдань матеріалознавства, трибології та герметології в галузі машинобудування. Значні труднощі, що виникають розробки теорії герметизації і ущільнювальної техніки, пов'язані з необхідністю вирішення комплексних завдань з кінця низки природничих наук: фізики, хімії, матеріалознавства, трибології. Механізм герметизації рухомих сполучень обумовлений механічною взаємодією контактуючих поверхонь, що включає процеси тертя та зношування матеріалів у зоні контакту, а також фізико-хімічними процесами структурно-фазових перетворень матеріалів у процесі експлуатації в різних середовищах за різних температур.

Аналіз досліджень у галузі трибології та трибоматеріалознавства показує, що загальними у всіх випадках фрикційної взаємодії є одночасно відбуваються процеси структурних змін і фазових перетворень у поверхневому шарі деталей, що труться, розсіювання (дисипації) механічної та теплової енергії та перетворення її у внутрішню енергію мікро збільшенням щільності внутрішньої енергії та температури.

Унікальні фізико-хімічні та антифрикційні властивості політетрафторетилену (ПТФЕ) дозволяють вважати його найкращим матеріалом для полімерної основи антифрикційних композиційних матеріалів металополімерних вузлів тертя. Введення в ПТФЕ різних наповнювачів-модифікаторів: волокнистих, дисперсних нанорозмірних вуглецевих, металевих та інших матеріалів дозволяє суттєво підвищити зносостійкість та керувати фізико-механічними властивостями одержуваних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Для герметизації сполучених циліндричних поверхонь обертального руху застосовують ущільнення різних типів:

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- еластомірні (гумові) манжети радіальні,
- еластомірні торцеві манжети,
- торцеві механічні ущільнення,
- пластмасові кільцеві ущільнення.

Вибір типу ущільнення залежить від умов роботи, вимог до надійності та герметичності. При цьому слід мати на увазі, що при забезпеченні високого ступеня герметичності погіршуються умови змащення робочої кромки елемента ущільнювача, збільшується робота тертя і температура, особливо при високих значеннях робочого тиску і швидкості ковзання. Названі обставини суттєво ускладнюють завдання забезпечення працездатності протягом ресурсу.

Герметизуючий пристрій (ГУ) маточок підтримуючих котків являє собою пристрій з трьох радіальних гумових манжет. Цей тип ущільнень широко застосовується для ущільнення осей та валів машин. За певних умов вони забезпечують досить високий рівень герметичності.

Однак даної конструкції ГУ притаманний ряд недоліків, що значною мірою знижують їх надійність і обмежують сферу застосування з таких причин:

- відхиленням сполученої поверхні вала від правильної геометричної форми та похибкою його установки;
- високою швидкістю ковзання валу щодо ущільнюючої кромки манжети;
- нестабільністю в'язкопружних властивостей гуми внаслідок процесів старіння та релаксації;
- високим коефіцієнтом тертя та зносом робочих поверхонь манжети.

Названі недоліки повною мірою відносяться до манжетних ущільнень осей підтримуючих котків ходової частини БГМ, що суттєво знижує їхню надійність і призводить до значних витрат на відновлення працездатності ГУ маточини ходової частини.

Використання ПКМ для ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв (ГУ) різних механізмів та виробів дозволяє суттєво підвищувати

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність та довговічність машин та технологічного обладнання. Полімерний композиційний матеріал відноситься до матеріальних об'єктів, довговічність і збереження яких визначають надійність і ресурс будь-якого виробу машинобудування. Сказане повною мірою відноситься до надійності герметизуючих пристроїв багатоцільових гусеничних машин (БГМ) як однієї з найважливіших характеристик якості та функціональної ефективності сучасної транспортної техніки. Специфіка умов експлуатації БГМ створює напружені умови роботи для підшипникових вузлів та ущільнень ступиць опорних та підтримуючих котків, що направляють коліс ходової частини машини.

Аналіз фізико-механічних властивостей полімерів різних видів показує, що зменшити негативний вплив процесів старіння та зношування можна шляхом застосування пластмас замість еластомерів, які мають більш високу хімічну стійкість і кращі антифрикційні властивості. Більшість гумових сумішей, у тому числі на основі нітрільних каучуків СКН-18, СКН-26, які застосовуються для виготовлення манжетних ущільнень, набухають у робочих рідинах і старіють, втрачаючи пружну еластичність. Під впливом робочого середовища відбувається дифузійний масообмін, що призводить до зміни об'єму та складу компонентів матеріалу ущільнювальних елементів, а також хімічні реакції (переважно окислювальні), що призводять до зміни структури та властивостей еластомеру.

У той же час термопластичні полімери, особливо карбоцепні, що не мають подвійних зв'язків в основних ланцюгах, виявляють високу хімічну стійкість до морської води, кисню, органічних середовищ і кислот. Найбільшу хімічну стійкість має ПТФЕ, який не набухає, зберігає працездатність і не крихчиться при низьких і навіть при криогенних температурах. ПТФЕ має найкращі антифрикційні властивості; при сухому терті сталі він має коефіцієнт тертя на рівні 0,04-0,08, який зменшується з збільшенням тиску та температури і практично не залежить від тривалості тертя.

Названі унікальні фізико-хімічні та антифрикційні властивості ПТФЕ

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

дозволяють вважати його найкращим матеріалом для полімерної основи антифрикційних ПКМ.

Встановлено, що зміна властивостей наповнених полімерів пов'язана з особливостями їх структурної організації на молекулярному та надмолекулярному рівнях, що виражається у зміні фазового стану, молекулярної рухливості сегментів та ланцюгів макромолекул, зміні параметрів та типу надмолекулярної структури. В останні десятиліття накопичено значний експериментальний матеріал, що відображає вплив виду та параметрів надмолекулярної структури на фізико-механічні та триботехнічні властивості багатокомпонентних ПТФЕ-композитів, що містять волокнисті та дисперсні наповнювачі-модифікатори [15, 45, 48-50 та ін.]. Комплексні дослідження структурно-фазового стану наповненого та чистого ПТФЕ методами рентгеноструктурного, електронномікроскопічного, термографічного аналізів, а також дослідження теплофізичних та триботехнічних властивостей дозволили вивчити основні закономірності та механізми впливу окремих та комплексних наповнювачів на процеси модифікування структури, фізико-механічних та триботехнічних, [44, 84 та ін]. Великий інтерес представляє вивчення впливу комплексних наповнювачів, що включають два і більше компоненти з різними фізико-механічними властивостями, розмірами та геометрією частинок, у тому числі наночастинок на розвиток процесів структурної модифікації ПТФЕ [40, 52, 62, 78] з метою підвищення зносостійкості ПТФЕ-композитів. Вирішенню цього завдання разом із розробкою більш досконалої конструкції ГУ ходової частини БГМ з використанням нового ПКМ, що забезпечує підвищення експлуатаційної надійності герметизуючих пристроїв ходової частини та присвячена моя кваліфікаційна робота.

У першому розділі наведено аналіз структури та властивостей відомих полімерних композиційних матеріалів та методів підвищення їх механічних та триботехнічних властивостей, а також аналіз конструкції та умов експлуатації герметизуючих пристроїв підтримуючих котків БГМ. Показано, що котки, що

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримують, працюють в умовах інтенсивного зовнішнього забруднення, що містить абразивні частинки, тому, ущільнюючи сполучені поверхні, вони самі є недостатньо захищеними елементами конструкції ходової частини. У процесі роботи в зоні герметизації та тертя утворюється абразивна маса, що призводить до інтенсивного зношування рухомо пов'язаних поверхонь ущільнювальних манжет. Причиною відмови серійних герметизуючих пристроїв є передчасне старіння, підвищений знос і пошкодження гумових манжет ущільнювачів. На основі результатів аналізу сформульовано завдання кваліфікаційної роботи.

Друга глава присвячена опису вибраних методів і засобів експериментального дослідження структури та властивостей полімерного композиційного матеріалу (включаючи оптимізаційні дослідження), розроблених установок і методик для дослідження герметизуючих і триботехнічних властивостей розробленої конструкції герметизуючого пристрою.

У третьому розділі розглянуто результати дослідження надмолекулярної структури, фізико-механічних та триботехнічних властивостей ПКМ, що розробляється, проаналізовано особливості впливу комплексного наповнювача (вуглецеві нанотрубки + ультрадисперсний прихований кристалічний графіт + дисперсний дисульфід молібдену) на структурно-фазовий стан та параметри триботехнічні властивості ПКМ.

У четвертому розділі наведено результати розрахунку основних конструктивних параметрів розробленого герметизуючого пристрою та дано опис ущільнювального елемента – манжети з розробленого ПКМ, наведено результати стендових випробувань, що дозволяють визначити характеристики швидкості та інтенсивності зношування ущільнювальних манжет в умовах навантаження, аналогічних умов експлуатації у складі БГМ.

У випускній роботі на захист виносяться такі наукові результати:

1. Встановлено закономірності процесів структурної модифікації наповненого ПТФЕ, що відображають взаємозв'язок виду та концентрації

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полідисперсних модифікаторів, включаючи нанорозмірні, на морфологію, ступінь кристалічності та розміри кристалічних утворень.

2. Отримано залежності механічних та триботехнічних властивостей полімерних нанокомпозитів на основі ПТФЕ від концентрації вуглецевих нанотрубок (УНТ) у складі комплексного наповнювача модифікатора та обмеження об'ємного теплового розширення при термообробці ПКМ.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		11

# 1 Аналіз структури та властивостей полімерних композиційних матеріалів, конструкцій та умов експлуатації підтримуючих котків багатоцільових гусеничних машин (БГМ)

## 1.1 Структура та властивості ПТФЕ як полімерної основи композиційних матеріалів (КМ) триботехнічного призначення

Аналіз умов експлуатації ходової частини БГМ та властивостей відомих ПКМ триботехнічного призначення показує, що найбільш перспективним матеріалом для ущільнюючих елементів герметизуючого пристрою підтримуючого катка слід вважати полімерний композиційний матеріал (ПКМ) на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) [22, 44]. Він зберігає високі антифрикційні властивості, зносостійкість і працездатність у широкому інтервалі температур від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , має високу хімічну стійкість, гідрофобен і тому не схильний до швидкого старіння в умовах експлуатації герметизуючих пристроїв ходової частини БГМ.

Полімерні композиційні матеріали на основі ПТФЕ належать до найефективніших матеріалів триботехнічного призначення. До теперішнього часу накопичено великий експериментальний матеріал з вивчення впливу різних наповнювачів-модифікаторів на структуру та фізико-механічні властивості таких матеріалів [22, 44, 77, 87]. Незважаючи на це вивчення процесів структуроутворення в ПКМ на основі ПТФЕ при використанні нових наповнювачів-модифікаторів, що забезпечують подальше підвищення триботехнічних властивостей ПКМ, зберігає свою актуальність. Це пов'язано з різноманітністю умов експлуатації матеріалів у деталях та вузлах сучасних машин та механізмів, особливо у вузлах тертя транспортних та технологічних машин. Тому дуже складно створити ПКМ, які б задовольняли всім різноманітним умовам експлуатації. Також немає універсального наповнювача,

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що дозволяє створити такий матеріал. Крім того, відсутня єдина наукова теорія синтезу ПКМ, що дозволяє прогнозувати їх властивості під час використання нових наповнювачів.

Відомо, що комплекс фізико-механічних та триботехнічних властивостей полімерної матриці визначає ефективність використання композиту у металополімерних трибосистемах. Особливості будови та властивостей ПТФЕ як представника термостійких частково-кристалічних полімерів докладно описані у багатьох роботах [13, 16, 22, 41, 44, 55, 56]. ПТФЕ – це типовий карбоцепний лінійний частково-кристалічний полімер. Його унікальність полягає в тому, що навіть при температурі, вищій за температуру плавлення, він не переходить у в'язкотекучий стан, тобто, на відміну від багатьох інших гнучких полімерів, може перебувати тільки в двох станах: високоеластичному і склоподібному.

ПТФЕ має унікальну хімічну стійкість, тому що великий розмір атомів фтору, їх спіральне розташування навколо вуглецевого ланцюга та висока міцність фторвуглецевого зв'язку роблять недоступним зв'язок С-З впливу хімічних реагентів [55, 64]. Крім того, ПТФЕ, володіючи високою термостійкістю, зберігає пластичні властивості при криогенних температурах, що дозволяє експлуатувати його в широкому інтервалі температур [16, 56, 64].

ПТФЕ має високі антифрикційні властивості, у нього найнижчий серед полімерних матеріалів триботехнічного призначення коефіцієнт тертя. В умовах сухого тертя сталі коефіцієнт тертя становить 0,04-0,05 при швидкості ковзання до 0,01 м/с проти 0,2-0,6 для більшості полімерів [22, 44]. Це дозволяє забезпечити в зоні тертя режим самозмащування та використовувати ПТФЕ у різних вузлах тертя без мастила. При збільшенні швидкості ковзання на два порядки коефіцієнт тертя ПТФЕ зростає у 2-3 рази [45]. Низькі значення коефіцієнта тертя та мала адгезійна здатність ПТФЕ обумовлені невисоким рівнем поверхневої енергії його молекул - одним із найнижчих для твердих тіл, що пояснюється будовою макромолекул ПТФЕ та слабкою міжмолекулярною

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

взаємодією.

Таким чином, використання ПТФЕ як полімерної основи антифрикційних композиційних полімерних матеріалів у порівнянні з іншими полімерами має ряд істотних переваг, що дає можливість створювати ПКМ, в тому числі полімерні нанокомпозити з високими характеристиками механічних і триботехнічних властивостей.

## **1.2 Аналіз конструкції, умов експлуатації та надійності підтримуючих катків БГМ**

Гусеничний рушій БГМ - це сукупність елементів ходової частини, що створюють силу тяги. Він включає такі елементи: напрямні колеса з механізмами натягу; підтримуючі катки; гусениці; провідні колеса; опорні ковзанки (рис.1.1).

Підтримуючі катки розміщені вздовж бортів гусеничної машини і призначені для надання необхідної форми верхньої гілки гусениці з метою скорочення втрат потужності та зменшення динамічних навантажень під час руху машини. На машині встановлено шість катків, що підтримують: по три на кожному борту.

Підтримуючі катки встановлюються на двох роликівих та одному кульковому підшипниках на кронштейнах, які кріпляться до борту машини болтами. Мастило підшипників здійснюється рідким мастилом. Для запобігання її витіканню, а також виключенню потрапляння води та бруду передбачені лабіринтні ущільнення.

Підтримуючий каток складається з маточини 1 з напресованою гумовою шиною 2 і сталевим ободом 12, кронштейна 6 і одному кульковому 3. Підшипники кріпляться 3 .

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

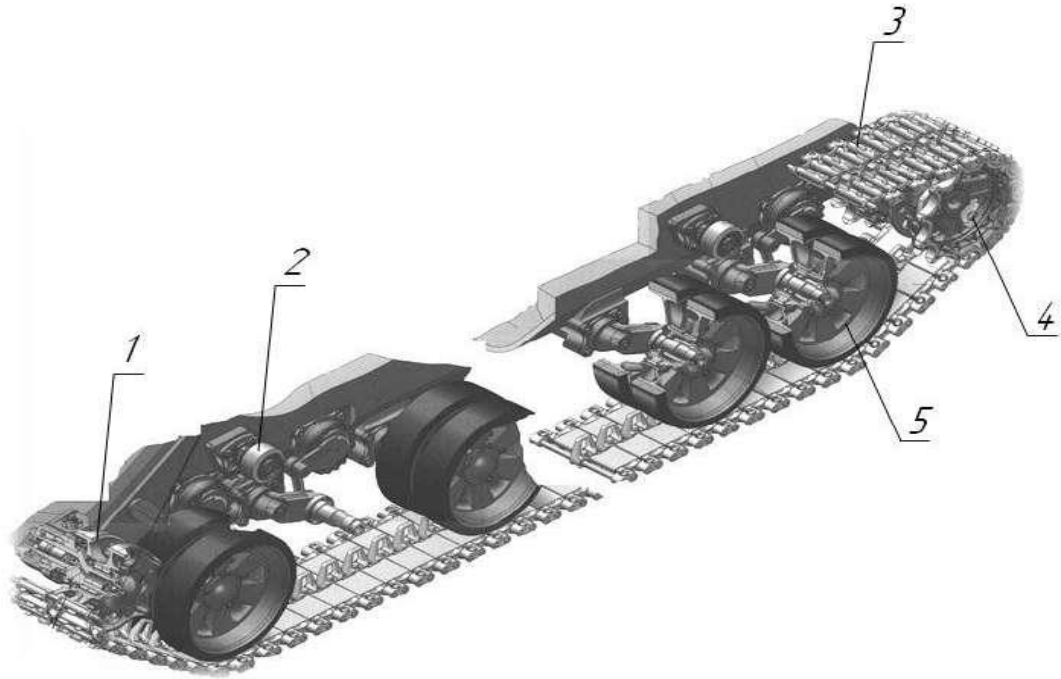


Рисунок 1.1 - Гусеничний рушій

1 – спрямовуюче колесо з механізмом натягу; 2 - підтримуючий каток; 3 – гусениця; 4 – провідне колесо; 5 – опорна ковзанка

У кронштейні 6 виконано радіальне свердління, призначене для подачі мастила до робочих кромek манжет. Радіальний канал має верхнє розташування, через нього здійснюється мастило манжети, яке частково потрапляє в підшипники.

Ущільнювальна кришка 4 кріпиться до маточини болтами 10. У кришку запресовані три манжети 5, кромки яких притискаються до поверхні кронштейнів пружинними кільцями. У виточку кришки встановлено гумове кільце ущільнювача 11. Кришка 4 і лабіринтне кільце 9 утворюють лабіринтне ущільнення. Кільце 9 напресовано на вісь кронштейна та приварено. У каток, що підтримує, заправляється масло ТСЗп-8 до рівня нижньої кромки заправного отвору в маточині. Отвір закривається пробкою 14 з конусом ущільнювача.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

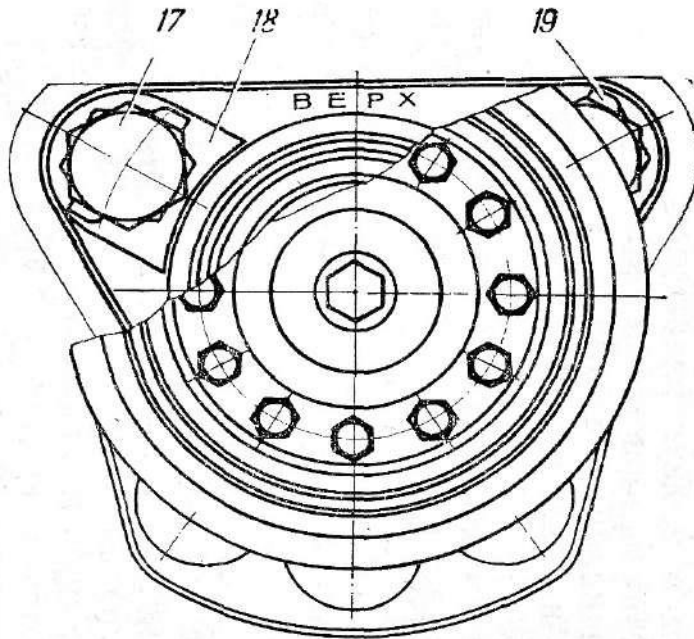
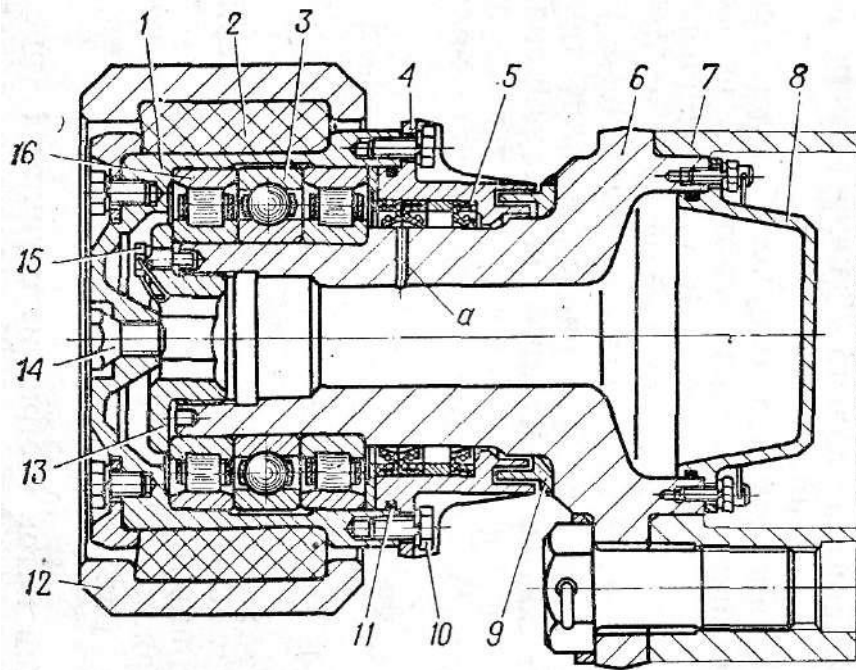


Рисунок 1.2 - Підтримуючий каток:

1-ступиця; 2-шина; 3-кулькопідшипник; 4-ущільнювальна кришка; 5-манжета;  
 6-кронштейн; 7-приварний кронштейн; 8-кришка; 9-кільце лабіринту; 10 та 17-  
 болти; 11-гумова кільце; 12-обод; 13-гайка; 14-пробка; 15-стопорний болт; 16-  
 роликпідшипники; 18-стопорна шайба; 19-шплінт; а-свердління

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ

Арк.

16

Мастило працездатне в інтервалі температур від - 40 до + 130 °С, водостійке, тобто не розчиняється у воді, не змивається і не поглинає вологу з навколишнього середовища. Спостереження за зміною якості мастила при тривалому її зберіганні в різних кліматичних зонах показало, що воно може зберігатися більше 5 років без істотних змін його властивостей. При експлуатації відповідно до вимог ГОСТ 6473-73 наявність механічних домішок у мастилі, які не розчиняються в соляній кислоті, не допускається.

Причиною відмови серійних герметизуючих пристроїв є передчасне старіння, знос і пошкодження гумових ущільнювальних манжет, оскільки гума схильна до прискореного старіння при динамічному навантаженні і зміні температури навколишнього середовища, набуваючи залишкову деформацію і втрачаючи властивість пружної еластичності. Крім того, гума має погані триботехнічні властивості і часто руйнується при запуску машини після тривалого зберігання.

Підтримуючі котки працюють в умовах інтенсивного зовнішнього забруднення, частота обертання яких досягає 3450 об/хв. За таких умов гумові ущільнення не забезпечують необхідної герметичності, мастило витікає і підшипники виходять із ладу.

У цьому зв'язку дослідження надійності герметизуючих пристроїв підшипникових вузлів опорних і підтримуючих катків ходової частини БГМ має важливе і актуальне значення. Крім того, працездатність цих елементів поряд з іншими складальними одиницями та деталями ходової частини визначають найважливішу властивість машини – рухливість.

Статистичний матеріал повинен, по-перше, об'єктивно відбивати фактичну надійність герметизуючих пристроїв підтримують катків протягом заданого ресурсу до виходу машини на капітальний ремонт, тобто. до 14 000 км пробігу.

По-друге, статистичний матеріал повинен відображати працездатність герметизуючих пристроїв у межах заданого ресурсу в залежності від термінів

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

експлуатації та зберігання.

Проведені раніше дослідження надійності функціонування підшипникових вузлів маточок підтримують катків показали, що основною причиною виходу їх з ладу є влучення абразиву в закриту порожнину маточини катка.

При цьому відмова герметизуючих пристроїв може бути обумовлена багатьма причинами. До основних їх можна віднести такі:

- умови експлуатації;
- недосконалість конструкції ГУ;
- недостатній рівень механічних та триботехнічних властивостей матеріалів ГУ.

З метою аналізу статистичного матеріалу про відмови МДМ у роботі аналізувалися дані про відмови МДМ із різними термінами експлуатації від 5 до 15 років. Оцінка працездатності герметизуючих пристроїв опорних катків здійснювалися кожної групи в діапазоні від 0 до 14000 км пробігу з періодичністю 1000 км. Контроль піддавалося 100 % підтримуючих катків, і загальна кількість підконтрольних об'єктів кожної групи становило 60 одиниць.

Отримані дані кількості параметричних відмов у кожній групі підконтрольних об'єктів оброблялися методом математичної статистики і використовувалися для отримання кількісних показників надійності ГУ. Для статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи обчислювали частість відмов за формулою 1.1:

$$P_i(A) = m_i / N, \quad (1.1)$$

де  $m_i$  - число ГУ об'єктів, що мають пробіг  $t_i$ ;

$N$  – загальна кількість об'єктів з непрацездатними ГУ.

Ймовірність безвідмовної роботи визначалася за формулою 1.2:

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (1.2)$$

де  $F(t)$  – функція розподілу частоти відмов.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

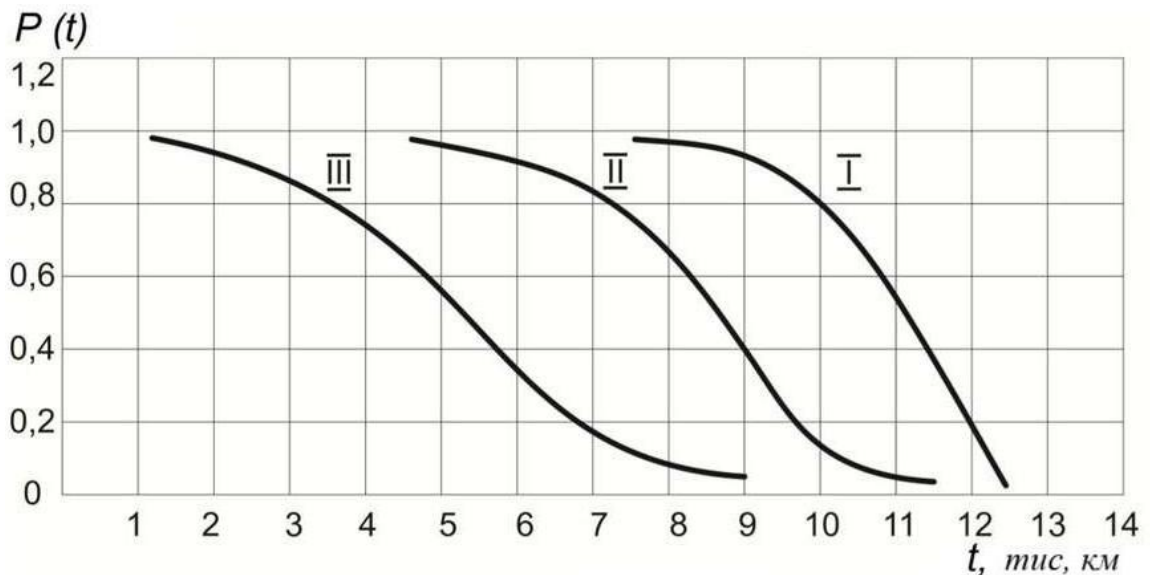


Рисунок 1.3 - Залежність ймовірностей безвідмовної роботи герметизуючих пристроїв:

I – до 5 років; II – від 5 до 10 років; III - від 10 до 15 років

Для герметизуючих пристроїв маточок підтримуючих і опорних катків, що відносяться до категорії високонадійних виробів, показник ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  повинен зберігатися протягом до 14000 км пробігу на рівні не менше  $P(t) = 0,9$ . Результати розрахунків показали, що зниження показника ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  нижче 0,9 відзначається: для першої групи машин з пробігу 9 тис. км, для другої групи машин з 6,5 тис. км, а для третьої групи машин уже з 2,0 тис. км (рис.1.3). Ця обставина обумовлена процесами зношування та старіння матеріалів манжет герметизуючих пристроїв, що характеризується тим, що зі збільшенням терміну експлуатації (зберігання) підвищується ймовірність виникнення відмови. Аналіз кількісних значень  $P(t)$  показав недостатній рівень надійності герметизуючих пристроїв для першої групи машин, надзвичайно низький для другої і неприпустимий для третьої групи.

### 1.3 Вплив наповнювачів-модифікаторів на структуру та властивості політетрафторетилену

Введення в полімер наповнювачів-модифікаторів є ефективним способом спрямовано змінювати структуру матеріалу та отримувати ПКМ з високими фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Вибір наповнювачів та ступінь наповнення полімерної основи залежить від призначення готового виробу.

До основних критеріїв при виборі наповнювача належать:

здатність витримувати температурний режим переробки (до 375 ° C),  
хімічна та термічна стабільність при температурах переробки полімеру,  
хімічна та корозійна стійкість,

хороша теплопровідність та високі механічні та триботехнічні властивості [59].

Геометрична форма і розмір частинок, хімічна природа наповнювача значно впливають на процес формування структури ПКМ. Вивченню цього впливу та дослідженню закономірностей впливу дисперсних наповнювачів на структуру та властивості ПКМ присвячено багато робіт [8, 34, 36, 58, 69].

Залежно від характеру енергетичного на структуру та властивості полімерної матриці наповнювачі прийнято розділяти на структурно активні і неактивні, відносячи ці поняття до будь-якої властивості ПКМ [74].

Вважається, що наповнювач має структурну активність, якщо при його введенні в полімері відбувається зміна: характеристик надмолекулярної структури (форма, розміри та розподіл за розмірами структурних одиниць); щільності упаковки, співвідношення між упорядкованою та неупорядкованою частинами (ступінь кристалічності) або всіх вищезгаданих структурних характеристик одночасно [34, 74].

Встановлено, що ступінь прояву структурної активності може бути вибіркоким. При високій структурній активності наповнювача навіть при

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

невеликих концентраціях його частинки можуть модифікувати не тільки прикордонні шари полімеру, але й його об'єм. При недостатній структурній активності зміни у структурі матриці відбуватимуться лише міжфазних (граничних з наповнювачем) шарах.

Активний наповнювач впливає на процеси структуроутворення в матриці, причому його частинки можуть виконувати роль штучних зародків. Структурна активність наповнювача виявляється у активізації процесу кристалізації; у більшості випадків введення таких частинок призводить до значного підвищення швидкості кристалізації полімеру [24]. При високому відсотковому змісті вплив наповнювача на структуру та властивості полімеру може призводити до аморфізації матриці, утворення безперервних структур (фаз) з частинок наповнювача, зростання числа дефектів і т.п. [34].

Крім структурної, може проявлятися і кінетична активність наповнювачів [34, 74], що впливає рухливість кінетичних одиниць різних розмірів та на спектр часів релаксації полімеру. Природа полімер-наповнювача, дисперсністю останнього, термодинамічні умови взаємодії наповнювача з матрицею - це чинники, які впливають характер і ступінь кінетичної активності наповнювачів.

Під впливом частинок наповнювача змінюється кінетика процесу кристалізації матриці. Збільшення кількості центрів кристалізації призводить до підвищення швидкості кристалізації та зменшення розмірів кристалічних утворень – сферолітів, що сприяє подрібненню елементів надмолекулярної структури та збільшенню їх однорідності, підвищує стабільність структури та, відповідно, властивостей ПКМ [34]. Отже, змінюючи природу, зміст, розміри та форму частинок наповнювача, можна спрямовано та значно змінювати структуру та властивості ПКМ.

Дисперсні наповнювачі за розмірами їх часток можна розбити на групи. Частинки, що мають середній діаметр менше 100 нм, відносять до нанорозмірних, менше 1 мкм до ультрадисперсних; розміри

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середньодисперсних порошків потрапляють до інтервалу від 10 до 40 мкм; а діаметр крупнодисперсних частинок більше 40 мкм [59]. Порошки двох перших груп у порівнянні з частинками третьої - четвертої мають більш високу питому поверхню та вільну поверхневу енергію і як наслідок високу поверхневу активність. Ультрадисперсні та нанорозмірні частинки можуть бути центрами кристалізації і, відповідно, ставати центрами сферолітів. Великодисперсні частинки не можуть бути центрами сферолітів, але окремі активні ділянки поверхні частинок впливають на процес зародка утворення [34]. При цьому можуть утворюватись різні морфологічні типи надмолекулярних структур.

Структурні зміни в ПТФЕ при його модифікації дисперсним наповнювачем описуються в ряді робіт [44, 45, 77], однак єдиного підходу, що пояснює вплив наповнювача на структуру та властивості ПКМ, поки що не існує. У роботі [12] розглядається зміна структури ПТФЕ при його модифікації ультрадисперсними наповнювачами. Отримані результати підтверджують характерну для частково-кристалічних полімерів закономірність: при малій концентрації наповнювача його частинки відіграють роль штучних зародків, при цьому проявляється ефект армування, що сприяє максимальному структуруванню полімеру внаслідок здатності наночастинок створювати ансамблі на кшталт кластерів [60].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що ультрадисперсний наповнювач надає на полімерну матрицю багатосторонній та складний вплив. Структурна модифікація полімеру запровадженням структурно- активних ультрадисперсних наповнювачів викликають значну зміну його властивостей. Робот, присвячених вивченню впливу таких наповнювачів на фізико-механічні властивості ПКМ, досить багато. Наприклад, показано, що модифікація ПТФЕ різними наповнювачами може призводити до підвищення жорсткості та теплопровідності у 2-3 рази; зносостійкість до 700 разів; твердості на 10-15%; термічне розширення може зменшуватися у 2-2,5 рази [16, 22, 48, 56, 70, 83]. Водночас запровадження у ПТФЕ наповнювачів різної природи може

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

призводити до зниження межі міцності при розтягуванні та відносно подовження при розриві [16].

Структура ПКМ та її зміни на всіх рівнях молекулярної та надмолекулярної організації також впливають на триботехнічні властивості ПКМ та в умовах тертя визначають механізм фрикційної взаємодії полімерів та композитів на їх основі [7, 45]. Отже, змінюючи надмолекулярну структуру полімеру, особливо у поверхневих шарах, можна спрямовано регулювати триботехнічні властивості композиту [44, 46]. Так, при введенні волокнистих і дисперсних наповнювачів у ПКМ на основі ПТФЕ збільшується (в 1,5-2 рази) коефіцієнт тертя, але значно знижується швидкість зношування (до 600-800 разів [46, 47]). Встановлено, що це пов'язано з утворенням у полімерній матриці сферолітів різних форм та розмірів, руйнування яких потребує більших енергетичних витрат, ніж руйнування структурних утворень ненаповненого ПТФЕ. Наповнювачі, що мають шарувату структуру (MoS<sub>2</sub>, графіт), або набувають її в процесі тертя (вуглецеве волокно), не перешкоджають утворенню на поверхні тертя структури типу рідкокристалічної і можуть обмежувати рухливість шарів полімеру, що сприяє суттєвому збільшенню зносостійкості ПКМ на основі ПТФЕ [44].

Велику дослідницьку роботу з вивчення механізму фрикційної взаємодії та зношування ПКМ на основі ПТФЕ проведено колективом авторів під керівництвом Ю.К. Машкова [44-46]. На основі узагальнення результатів комплексних досліджень та даних літературних джерел авторами була запропонована фізична та термодинамічна моделі процесів тертя та зношування ПКМ на основі ПТФЕ. Обґрунтовано механізм формування плівки фрикційного перенесення та фізико-хімічні процеси утворення дисипативних трибоструктур при терті.

Проблема прогнозування триботехнічних властивостей полімерних композиційних матеріалів набуває все більшої актуальності. Частіше всього завдання вибору, як виду, і кількісного змісту наповнювачів вирішується суто

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментально. Істотно полегшує вирішення такого завдання дослідження подвійних систем, в яких як безперервна основа є полімер, а наповнювач - модифікатор представлений дисперсними частинками.

Для матеріалів герметизуючих пристроїв необхідно забезпечити оптимальне поєднання стабільності таких конкретних властивостей як пластичність, міцність та висока зносостійкість. Великий внесок у вивчення механізму зміцнення та оптимізації властивостей наповнювачів створення композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену зробили колективи за роботами А.А.Охлопкова, А.К. Погосяна, А.І. Свириденко, Ю.К. Машкова та ін.

Встановлено, що металеві та вуглецеві наповнювачі підвищують теплопровідність композиційного матеріалу, що забезпечує працездатність незмазуваних вузлів тертя. У свою чергу, введені у вигляді волокон вуглець, бронза, скло мають високу міцність, тепло-і електропровідність, хороші пружні властивості. Можна відзначити, що такі позитивні властивості графіту як гнучкість, термопластичність та хімічна стійкість пояснюють інтерес, який виявляють розробники композиційних матеріалів цього наповнювача в останні десятиліття. У низці робіт показано, що з комплексної зміни властивостей матеріалу необхідно вводити відразу кілька наповнювачів, виконують різні функції.

В Україні та за кордоном випускається велика кількість композиційних матеріалів на основі ПТФЕ. Найбільш широке застосування отримали композиційні матеріали, наповнені скловолокном, подрібненим коксом або вуглецевими волокнами з дисперсними наповнювачами: графіт, дисульфід молібдену, порошки свинцю, бронзи .

Більшість відомих композиційних матеріалів характерна високий рівень наповнення (від 15 до 50 відсотків за масою), що викликає значне підвищення жорсткості матеріалу. Водночас збереження помірної жорсткості композиційного матеріалу в межах 250-300 Мпа є найважливішою умовою при

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанні їх як ущільнювальні елементи герметизуючих пристроїв БГМ та інших машин.

Завдання отримання ПКМ з помірною жорсткістю може бути вирішена шляхом розробки герметизуючих композицій, які забезпечують досить високу зносостійкість із заданим рівнем модуля пружності. При цьому слід враховувати, що зміна робочої температури істотно впливає на фізико-механічні та герметизуючі властивості полімерних композиційних матеріалів. В умовах експлуатації герметизуючих пристроїв ходової частини БГМ робоча температура в ГУ маточини може змінюватися від  $-50$  до  $+120$  °С, тому необхідно враховувати вплив температури на механічні та герметизуючі властивості ПКМ при розробці ГУ БГМ. Залежність межі міцності таких матеріалів від температури показують, що з підвищенням температури в 2 рази від 30 Мпа до 15 Мпа межа міцності ПКМ Кріолон-3 та Кріолон-5 знижується. Найменшою міцністю у всьому діапазоні температур має Ф4К20, що містить як наповнювач 20% меленого коксу [50].

Встановлено, що загальною закономірністю для всіх матеріалів є зниження межі міцності  $\sigma_b$  і модуля пружності  $E_p$  при підвищенні температури. Значне підвищення міцності і жорсткості матеріалу при зниженні температури призводить до погіршення герметизуючої здатності ущільнювальних елементів значне, а зниження характеристик міцності при підвищенні температури призводить до зниження пружних властивостей і, як наслідок, до значних залишкових деформацій і також до втрати герметизуючої здатності. Отже, досягнення максимальної стабільності фізико-механічних властивостей у заданому діапазоні робочих температур є одним з найважливіших завдань розробки композиційних матеріалів для ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.4 Вплив способу виготовлення та режимів технологічного процесу на структуру та властивості ПКМ на основі ПТФЕ

Технологія виготовлення ПКМ на основі ПТФЕ має свої особливості та включає наступні операції:

1. перемішування з подрібненнями механоактивацією всіх компонентів у подрібнювачі-активаторі;
2. просіювання підготовленої композиції через сито з коміркою 40-70мкм і рівномірне заповнення прес-форм за допомогою спеціального оснащення та обладнання;
3. холодне пресування композиційної суміші із заданим зусиллям (60 - 80 МПа);
4. термообробка (спікання) відпресованих заготовок за заданим режимом (швидкість нагріву, витримка при постійній температурі спікання, швидкість охолодження).

Кожна з вищезгаданих операцій впливає на структуру та властивості ПКМ. Тиск пресування та тривалість витримки під навантаженням впливають на ступінь зближення активованих частинок компонентів, на рівень їхньої адгезійної взаємодії і в результаті на механічні та інші властивості композитів. Режими термообробки впливають на рівномірність нагрівання композиції в обсязі заготівлі, умови фазових перетворень та процеси кристалізації полімерної матриці, формування фазового складу, міжфазного шару, параметри надмолекулярної структури та властивості ПКМ.

Зміна режимів технологічних операцій дозволяє регулювати тип та параметри надмолекулярної структури ПТФЕ та фізико-механічні властивості одержуваних матеріалів.

Необхідність та доцільність розглянутих технологічних операцій, переваги та недоліки їх здійснення, вибір оптимальних параметрів докладно описані у ряді робіт [16,25,33,64,70].

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільший інтерес з точки зору підвищення структурної активності наповнювача та ефективності модифікації структури ПКМ представляє заключна стадія синтезу ПКМ - термообробка пресованої заготовки. Режими термообробки багато в чому визначають процеси кристалізації полімерної матриці, формування фазового складу та міжфазних шарів, впливають на параметри надмолекулярної структури та фізикомеханічних властивостей ПКМ. У переважній більшості випадків через простоту промислової реалізації для виготовлення ПКМ на основі ПТФЕ використовується спосіб вільного спікання, який передбачає механоактивацію наповнювачів у млині в присутності порошку ПТФЕ протягом заданого часу, холодне пресування та вільне спікання (термообробку). Відповідно до цієї технології композиційну суміш рівномірно засипають у прес-форму і пресують при тиску 70 - 80 МПа. Відпресовану заготовку поміщають у піч і спікають при температурі  $360 \pm 5$  °С витримкою при названій температурі з розрахунку 8 - 9 хв на 1 мм товщини стінки заготовки. За допомогою програмного регулятора температури заготівлі нагрівають до температури спікання зі швидкістю 1,5 - 2,0 град/хв, охолоджують від температури спікання до 327 °С - зі швидкістю 0,3 - 0,4 град/хв і від 327 °С до 20 - 25 °С охолоджують разом із піччю [6]. Властивості та структура ПКМ, виготовлених за технологією вільного спікання, добре вивчені [58, 91]. Отримані вироби характеризуються незначною внутрішньою напругою і в деяких випадках підвищеною пористістю і малою міцністю.

У процесі термообробки у заготовці відбуваються такі:

- термічне розширення матеріалу протягом часу нагрівання аж до максимальної температури;
- перехід кристалічної фази полімеру в аморфну;
- термічна релаксація напруг, створених у процесі пресування;
- формування з окремих частинок матеріалу суцільного моноліту в умовах адгезійної взаємодії, що супроводжується деяким зменшенням обсягу заготівлі та збільшенням щільності матеріалу.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані вільним спіканням вироби мають невисокі внутрішні напруги, що забезпечує більшу стабільність форми та розмірів виробів в умовах експлуатації [82]. Але в деяких випадках виготовлення матеріалів за вказаною технологією призводить до підвищеної пористості та зниження міцності композиційного матеріалу.

Для отримання виробів з ПКМ на основі ПТФЕ зазвичай використовуються стандартні технології, що включають усі ці операції технологічного процесу. Однак у деяких випадках з метою підвищення характеристик фізико-механічних властивостей спікання та охолодження заготовок виробляють у спеціальних пристосуваннях при обмеженні теплового розширення у напрямі зусилля пресування [16, 70]. Крім названих способів термообробки виготовлення ПКМ використовується термообробка заготовок в замкнутому обсязі - гаряче пресування, гаряче пресування передбачає спікання заготовок в замкнутому обсязі [90]. При цій технології композиція поміщається у спеціальну закриту пресформу, оточену потужною нагрівальною спіраллю та ізолюючою "водяною сорочкою". У процесі нагрівання заготовки до температури спікання проводиться пресування та подальше контрольоване охолодження пресформи разом із заготівлею ПКМ. Технологічні режими виготовлення композиційного матеріалу за даною технологією потребують великих витрат на виготовлення технологічного оснащення і важко реалізуються у виробництві через критичні за технікою безпеки умови, низьку (порівняно з вільним спіканням) продуктивність і високу трудомісткість.

При синтезі ПКМ у такий спосіб можлива реалізація процесів формування надмолекулярної структури за умов значного зближення частинок наповнювача та ПТФЕ як при пресуванні композиції, а й за її термообробке. За такої технології, коли формування структури відбувається під тиском всебічного стиснення, реалізуються сприятливі умови твердофазного синтезу більш міцного та зносостійкого композиційного матеріалу.

Для підвищення ефективності структурної модифікації ПКМ на основі

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПТФЕ пропонується виготовлення заготовлі в закритій формі [90], що забезпечує натяг і виникнення в заготовлі внутрішніх напруг стиснення за рахунок її теплового розширення в процесі термообробки. Обмеження теплового розширення по всій поверхні заготовки може призводити до розтріскування заготовки за рахунок виникнення надмірно високих внутрішніх напруг.

Також відомий спосіб та пристрій для спікання ПКМ, які передбачають наявність зазору в оправці для спікання [19]. Це дозволяє уникнути розтріскування заготовок та отримати стабільні та високі характеристики фізико-механічних властивостей. Недоліком цього є необхідність експериментального визначення ширини зазорів.

Технологічний процес отримання ПТФЕ, який включає нагрівання відпресованої заготовлі в прес-формі, подальше гаряче пресування та охолодження заготовлі разом з прес-формою, суттєво ускладнює технологічний процес. Для визначення ефективності цієї технології отримання ПКМ необхідно проведення додаткових досліджень.

У роботах [86] пропонується застосовувати вплив енергії ультразвукових коливань на заготовлю з ПКМ у процесі пресування, що є одним із варіантів способу вібраційного впливу. Отримані результати свідчать про зміну низки характеристик фізико-механічних властивостей: збільшення межі міцності при розтягуванні та модуля Юнга; зниження відносного подовження при розриві, швидкості зношування та коефіцієнта тертя.

На підставі проведеного аналізу був зроблений висновок про те, що для підвищення ефективності структурної модифікації ПТФЕ слід використовувати спосіб холодного пресування та термообробки заготовок закритій оснастці, що обмежує об'ємне теплове розширення спікаємого матеріалу.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.5 Обґрунтування складу наповнювачів-модифікаторів та способу виготовлення ПКМ на основі ПТФЕ

Згідно з проведеним аналізом умов експлуатації герметизуючих пристроїв та фізичних причин їх відмов матеріал ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв гусеничних машин повинен мати високу зносостійкість, помірну жорсткість і зберігати працездатність у досить широкому інтервалі температур при поганому мастилi. При цьому в зону тертя можливе проникнення часток різних речовин, у тому числі абразивних із навколишнього середовища. Тому матеріал повинен добре протистояти абразивному зношуванню, повинен бути досить міцним та пружним. Крім того, для забезпечення герметичності ущільнення матеріал ущільнювального елемента повинен при відносно невеликому рівні контактного тиску легко деформуватися на мікровиступах і швидко заповнювати на поверхні ущільнюваної мікропадини. Нарешті, композиційний матеріал протягом тривалого періоду часу зберігання та експлуатації (не менше 10 років) при різних температурах навколишнього середовища повинен зберігати свої характеристики в'язкопружних та триботехнічних властивостей у заданих межах.

Аналіз фізико-механічних властивостей відомих полімерів, результатів експериментальних досліджень та досвіду застосування полімерів у різних герметизуючих пристроях транспортних та технологічних машин показує, що найбільшою мірою комплексом необхідних властивостей має політетрафторетилен [51, 64]. Маючи кращі в порівнянні з іншими полімерами та еластомерами антифрикційні властивості, він зберігає свої в'язкопружні властивості у широкому інтервалі температур і відрізняється високою довговічністю завдяки виняткової хімічної стійкості та гідрофобності. На підставі викладеного та з урахуванням досвіду застосування ПКМ на основі ПТФЕ в металополімерних вузлах тертя сільськогосподарської, транспортної,

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аерокосмічної техніки він був обраний як полімерна основа ПКМ, що розробляється.

Різноманітність матеріалів, що застосовуються як наповнювачі ПКМ, і відсутність систематизованих даних про вплив різних наповнювачів-модифікаторів на фізико-механічні властивості ПКМ ускладнює вибір виду та концентрації наповнювачів, що вводяться. У той же час серія робіт, виконаних під керівництвом Ю.К. Машкова, А.А. показує, що найбільший ефект підвищення зносостійкості можна отримати введенням комплексних наповнювачів, що включають два і більше компоненти з різними фізико-механічними властивостями, розмірами та геометрією частинок, у тому числі наночастинок [40, 52, 62, 78].

В останні роки ведуться роботи з дослідження можливості та ефективності введення в полімери вуглецевих нанотрубок (УНТ). Механічні властивості вуглецевих нанотрубок роблять їх дуже перспективними для застосування як наповнювачів при створенні полімерних нанокомпозитів [68]. УНТ характеризуються високою міцністю та жорсткістю; не руйнуються та відновлюють свою форму після значних деформацій; модуль пружності у нанотрубок майже в 10 разів, а межа міцності при розтягуванні в десятки разів вища, ніж у сталі. Однією з основних причин таких властивостей є високий рівень структурної досконалості УНТ (структурні дефекти практично відсутні). Вуглецеві нанотрубки складаються з 10-15 шарів трубок із зовнішнім діаметром 10-15 нм і довжиною 1-15 мкм із середньою щільністю 50- 150 кг/м<sup>3</sup>. Вони випускаються в гранульованому вигляді, що ускладнює їх диспергування та рівномірний розподіл у композиції [20].

Відомо, що композиційні матеріали, що мають як наповнювач графіт, найбільш пристосовані для роботи в середовищі повітрі, активних та вологих газах, рідких середовищах. Застосування як наповнювачів дисульфиду молібдену та вуглецевого волокна дозволяє отримати низький коефіцієнт тертя у вакуумі, серед осушених газів у широкому діапазоні температур.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки, мета та завдання дослідження

1. Надійність та довговічність герметизуючих пристроїв ходової частини БГМ обмежуються низьким рівнем надійності та довговічності серійних гумових ущільнювальних елементів, що викликає необхідність їх заміни на більш надійні із зміною конструкції ГУ та заміною матеріалу ущільнювальних елементів.

2. Унікальні властивості ПТФЕ визначають вибір його як полімерну основу нових антифрикційних композиційних матеріалів для ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв.

3. Модифікація ПТФЕ комплексними полідисперсними наповнювачами при синтезі нового композиційного матеріалу викликає зміну структури матриці на всіх рівнях молекулярної та надмолекулярної організації, що супроводжується підвищенням комплексу фізико-механічних властивостей ПКМ та суттєво розширює можливу сферу їх застосування.

4. Вуглецеві нанотрубки як наповнювач-модифікатор характеризуються високою структурною активністю, міцністю та жорсткістю внаслідок високого ступеня структурної досконалості (структурні дефекти практично відсутні).

5. Для підвищення ефективності структурної модифікації ПТФЕ комплексним наповнювачем доцільно використовувати метод холодного пресування та термообробку заготовок у спеціальних закритих пристроях, що обмежують об'ємне теплове розширення композиційного матеріалу.

На підставі аналізу опублікованих у літературних джерелах результатів досліджень, а також результатів попередніх досліджень було сформульовано мету роботи:

Підвищення зносостійкості полімерного антифрикційного композиційного матеріалу в умовах експлуатації в якості ущільнюючих елементів

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

герметизуючих металополімерних пристроїв, наприклад, ходової частини багатоцільових гусеничних машин (БГМ), що забезпечує підвищення працездатності і довговічності герметизуючих пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. На основі аналізу відомих матеріалів металополімерних вузлів тертя і трибосистем розробити новий ПКМ на основі ПТФЕ, що володіє високою зносостійкістю в умовах експлуатації як ущільнюючі елементи ГУ в широкому інтервалі температур.

2. Дослідити особливості процесів структурної модифікації ПТФЕ запровадженням наповнювачів різного виду, у тому числі комплексних з нанорозмірними компонентами та їх впливу на параметри надмолекулярної структури полімерної матриці ПКМ.

3. Дослідити закономірності впливу параметрів надмолекулярної структури ПТФЕ наповнюваного вуглецевими модифікаторами на механічні та триботехнічні властивості ПКМ.

4. Дослідити вплив обмеження об'ємного теплового розширення заготовок ПКМ при їх термообробці на структуру та властивості ПКМ.

5. Розробити конструкцію комбінованого герметизуючого пристрою осі підтримуючого котка ходової частини БГМ з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів силового та ущільнюючого елементів та умов експлуатації ГУ.

6. Розробити установку та методику для дослідження зносостійкості ущільнюючих елементів ГУ з нового ПКМ, оцінити працездатність та довговічність розробленого герметизуючого пристрою.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2 Методи та засоби експериментальних досліджень

Методи та засоби експериментальних досліджень повинні забезпечувати досягнення цілей та завдань науково-дослідної роботи за достатньої достовірності експериментальних даних, необхідних для обґрунтування висновків та наукових положень. У відповідності з метою справжньої роботи її кінцевим результатом повинні бути нові наукові результати, що забезпечують підвищення надійності та ресурсу герметизуючих пристроїв, що підтримують катків багатоцільових гусеничних машин шляхом удосконалення конструкції герметизуючих пристроїв, розробки та застосування нових полімерних композиційних матеріалів, що володіють більш високими характеристиками зносостійкості.

Отже, методи дослідження повинні передбачати дослідження механічних і триботехнічних властивостей матеріалів, що розробляються, тобто їх міцності, зносостійкості та антифрикційності. Відомо, що триботехнічні властивості матеріалів залежать від їх механічних властивостей (міцності, пружності, пластичності), які, у свою чергу, як показано вище, визначаються природою, хімічною будовою та структурою матеріалу. Звідси впливає необхідність дослідження структурно-фазового стану та надмолекулярної структури полімерних композиційних матеріалів.

Умови застосування ПКМ, що розробляються, для ущільнюючих елементів герметизуючих пристроїв накладають певні вимоги до комплексу їх механічних і триботехнічних властивостей. Основні з них: висока зносостійкість, необхідна жорсткість та висока збереження в умовах тривалого зберігання та експлуатації. Ці вимоги викликають необхідність проведення оптимізаційних досліджень ПКМ з метою визначення оптимального складу параметрів оптимізації (зносостійкість) та обмеження (межа міцності, модуль пружності) властивостей ПКМ.

Високі триботехнічні властивості ПКМ реалізуються в конструкції

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

герметизуючих пристроїв, що розробляється, забезпечуючи підвищення працездатності і довговічності останніх. Тому методи та засоби дослідження повинні забезпечувати випробування та дослідження розроблених ущільнюючих елементів у складі герметизуючих пристроїв на лабораторних стендах-імітаторах.

На підставі викладеного в роботі, використано методи та засоби експериментальних досліджень за такими напрямками:

- дослідження механічних властивостей ПКМ;
- дослідження тріботехнічних властивостей ПКМ;
- оптимізаційне дослідження складу ПКМ, що розробляється;
  - дослідження структурно-фазового стану та надмолекулярної структури наповненого ПТФЕ;
  - дослідження зносостійкості ущільнювальних елементів та працездатності розробленого герметизуючого пристрою в умовах навантаження, відповідних експлуатаційним.

## **2.1 Методи дослідження фазового складу та структури композиційних матеріалів**

ПКМ на основі ПТФЕ є гетерогенною багаторівневою системою. Найбільший інтерес представляє дослідження структури ПКМ на мікро- та нанорівнях, що дозволяє аналізувати зміни в надмолекулярній структурі полімерної матриці під впливом наповнювачів-модифікаторів [9, 41, 77].

Рентгенівські методи є ефективними прямими методами вивчення структури ПКМ, що дозволяють отримувати безпосередні відомості про їх молекулярну та надмолекулярну структуру. Ці методи використовуються для якісного визначення елементів структури композитів на мікро- та нанорівнях та визначення їх кількісного складу (оцінки лінійних розмірів кристалітів, параметрів кристалічного осередку полімерної матриці та ступеня

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кристалічності) [2, 9].

Для вивчення надмолекулярної структури полімерних матеріалів використовується електронна мікроскопія. Відомі кілька методів дослідження структури з використанням тонких плівок, що осаджуються з розчину, реплік з поверхні шліфу зразка, реплік зі сколів або самих сколів. Найбільш підходящими методами дослідження полімерних матеріалів, як показує практика, є методи, що використовують репліки зі сколу або самі сколи. Передбачається, що при низькотемпературному зламі полімерного зразка тендітна тріщина поширюється на межі надмолекулярних утворень.

Поширений метод вивчення надмолекулярної структури безпосередньо на поверхні сколу. Підготовку зразків проводили методом низькотемпературного (при температурі рідкого азоту) крихкого зламу. На поверхню скола наносять електропровідне покриття завтовшки близько 10 нм шляхом напилення алюмінію або золота за високого вакууму. Для отримання зображення структури використовували растровий електронний мікроскоп BS-350 (TESLA). Прискорююча напруга становила 16 кВ, а збільшення досягало від 50 до 500 разів.

## **2.2 Методи та засоби дослідження механічних та триботехнічних властивостей**

Для вивчення механічних властивостей ПКМ використовували стандартні методики. Відомо, що для більшості ПКМ значення модулів пружності при розтягуванні та стиску близькі і, як правило, на кілька десятків відсотків більше модуля пружності при згині [42]. Тому щодо механічних властивостей визначали лише модуль пружності при розтягуванні. Дослідження механічних властивостей (межі міцності та модуля пружності при розтягуванні, відносного подовження при розтягуванні) проводили на розривній машині Zwick Roell відповідно до ГОСТ 11262-80 «Пластмаси. Методи випробування на розтяг» та

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

ГОСТ 25.601-80 «Методи механічних випробувань композиційних матеріалів з полімерною матрицею (композитів). Метод випробування плоских зразків на розтяг при нормальній, підвищеній та зниженій температурах».

Дослідження проводили за кімнатної температури. Для кожного складу ПКМ виготовляли та випробовували по три зразки та визначали середнє значення досліджуваного параметра: тимчасовий опір при розтягуванні ( $\sigma_B$ ), відносне подовження при розриві ( $\delta$ ) та модуль пружності при розтягуванні (E).

Зразки для випробувань (рис. 2.1) виготовляються із заготовок у вигляді кілець прямокутного перерізу методом механічної обробки – точіння з наступним штампуванням у спеціальному вирубному штампі. Швидкість деформації при розтягуванні зразків становить 50 мм/хв. Методика забезпечує отримання даних з похибкою трохи більше 5%.

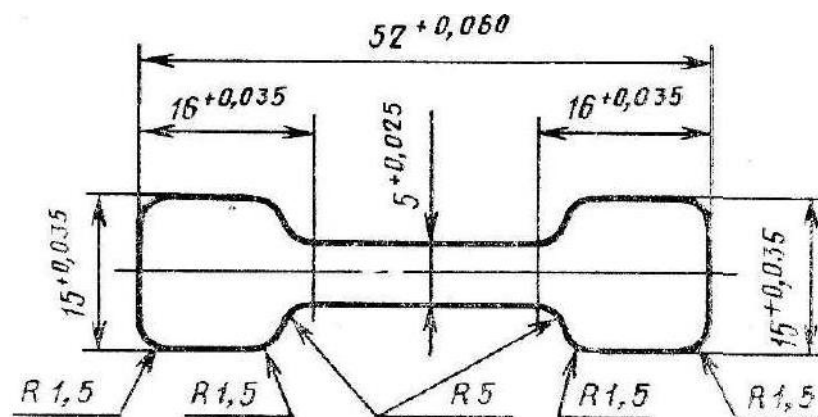


Рисунок 2.1 – Зразок для випробування на розтягування

Зразок у захватах випробувальної машини встановлюється так, щоб їх поздовжні осі збіглися з прямою, що з'єднує точки кріплення захватів у випробувальній машині. Для визначення межі міцності при розтягуванні відносного подовження при розриві зразок рівномірно навантажували із заданою швидкістю аж до його руйнування.

Межу міцності при розтягуванні в МПа, визначали за формулою 2.5:

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{b \cdot h}, \quad (2.5)$$

									Арк.
									37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ				

де  $F_{max}$  - максимальне навантаження, що передусє руйнуванню зразка, Н;

$b$  – ширина зразка, мм;

$h$  – товщина зразка, мм.

Для визначення модуля пружності зразок рівномірно із заданою швидкістю навантажували в межах початкової лінійної ділянки діаграми деформування та записували зміну поздовжньої деформації зразка  $\Delta l$  залежно від навантаження. Модуль пружності  $E$  визначали відношенням напруги до відповідної відносної деформації  $\sigma$ . Зразок піддавали при заданій швидкості триразовому навантаженню-розвантаженню до необхідного рівня (15 - 40%  $F_{max}$ ) і при кожному навантаженні зчитували показання деформацій при двох навантаженнях початкової, що дорівнює 2 - 5% від величини руйнівного навантаження  $F_{max}$  і максимальною. За результатами вимірів деформації для кожного навантаження визначали модуль пружності. За результат брали середнє арифметичне значення всіх навантажень.

Модуль пружності при розтягуванні ( $E$ ) МПа, визначали за формулою 2.6:

$$E = \frac{\Delta F}{b \cdot h} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta F}{b \cdot h} \cdot \frac{1}{\Delta \varepsilon}, \quad (2.6)$$

де  $\Delta F$  - збільшення навантаження, Н;

$\Delta l$  - збільшення розрахункової довжини зразка за зміни навантаження на  $\Delta F$ , мм.

Для визначення відносного подовження при руйнуванні зразок навантажували та записували зміну поздовжньої деформації в залежності від навантаження. Відносне подовження при руйнуванні  $\delta\%$  визначали за формулою 2.7:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.7)$$

де  $\Delta l$  – абсолютне подовження розрахункової довжини зразка при руйнуванні, мм;

$l$ - початкова розрахункова довжина зразка, мм.

Метод зняття діаграми деформування при розтягуванні заснований на

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірі деформації робочої частини зразка та відповідних зусиль при навантаженні аж до руйнування. Для запису діаграми деформування використовували автоматичні схеми запису навантаження – деформація в комплекті Zwick Roell. Розрахунки названих параметрів передбачені ГОСТ 25601-80. У наших дослідженнях з використанням автоматизованої розривної машини виконання та оформлення (роздруківка) в автоматичному режимі (гл.3).

Дослідження триботехнічних властивостей матеріалів (швидкості зношування та коефіцієнта тертя без мастила) проводили за методикою, викладеною в роботі [53], на спеціальному випробувальному стенді, створеному на базі настільного свердлувального верстата (рис. 2.2).

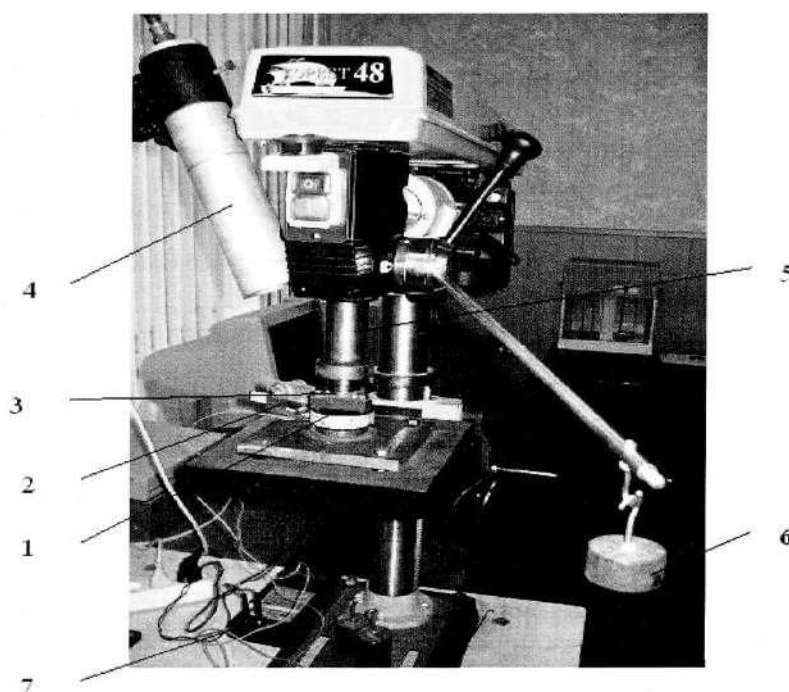


Рисунок 2.2 - Випробувальний стенд для дослідження триботехнічних властивостей ПКМ: 1-контртіло, 2-тензобалка, 3-тримач зразків, 4-пірометр, 5-шпиндель верстата, 6-вантаж змінний, 7-датчик тиску

Робочий вузол випробувального стенду показано на рис. 2.3. У тримач зразків (6) (рис. 2.3 а) одночасно встановлюються три циліндричні зразки (рис. 2.3 б) діаметром  $d = 5$  мм із досліджуваного ПКМ. Випробування проводяться

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за схемою торцевого тертя "палець (досліджуваний матеріал) - диск" по металевому контртілу із загартованої сталі 45 (рис. 2.3), з твердістю 48 – 52 HRC. Ретельно оброблена (шліфування та полірування) робоча поверхня контртіла має параметри шорсткості  $Ra < 0,32$  мкм. Методика випробування передбачає промивання робочої поверхні контртіла бензином-розчинником БР-1 та етиловим спиртом (ГОСТ 18300-72), протирання насухо серветкою та витримку на повітрі не менше 30 хвилин.

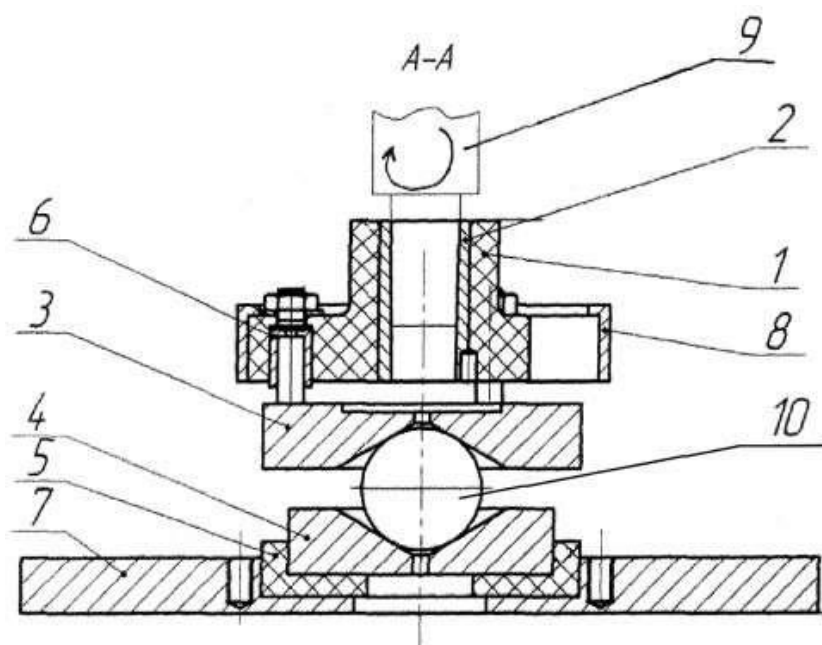


Рисунок 2.3 - Робочий вузол стану для випробування на тертя та знос:

1 корпус; 2-втулка; 3-контртіло; 4-опора; 5-втулка-ізолятор; 6-тримач зразків; 7-плита; 8-кожух; 9-шпиндель верстата; 10-кульова опора

Полімерні зразки перед початком випробування, після приробітку та кожного етапу випробувань протиралися серветкою, змоченою в етиловому спирті. Далі зразки проходили попередній годинний приробіток.

Для кожного матеріалу випробування проводилися не менше трьох разів по 5 годин при заданих швидкості ковзання та контактному тиску.

Після кожного випробування зразки протиралися, сушилися та

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

зважувалися на мікроаналітичних терезах типу ВЛР-200Г з похибкою не більше 0,015 мг. У процесі випробування через кожні 30 хвилин контролювався момент сили тертя (за показаннями потенціометричного датчика тиску ДМП-6А та цифрового вольтметра). Робочий вузол стану забезпечений кульовою опорою, з метою забезпечити самовстановлення контртіла, а також мінімізувати похибку визначення моменту сили тертя між полімерними зразками та металевим контртілом.

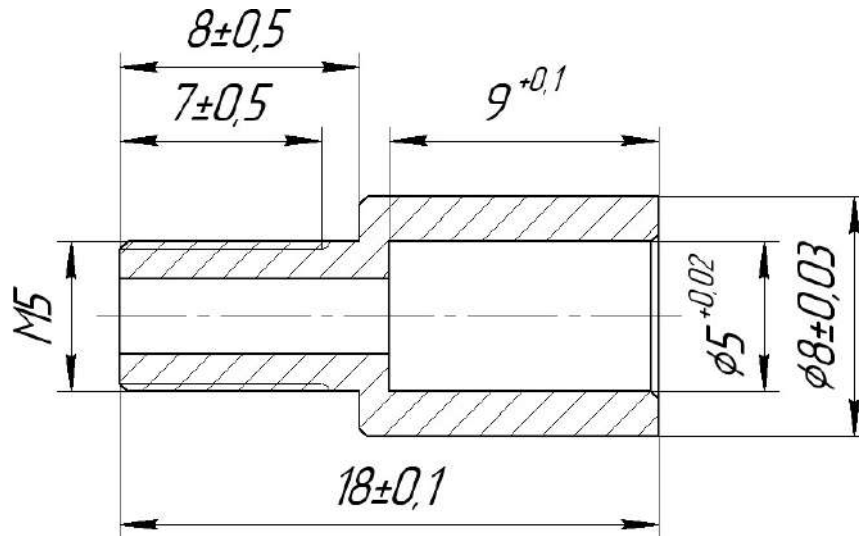


Рисунок 2.3а - Тримач зразків

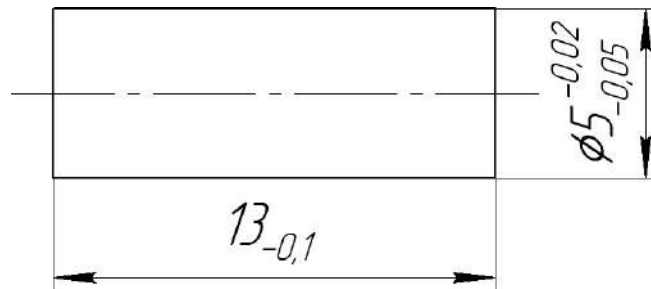


Рисунок 2.3б - Зразок ПКМ

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41



ПКМ з механічними та триботехнічними властивостями, що задовольняють різноманітні експлуатаційні вимоги. Крім того, відсутня єдина теорія синтезу ПКМ, що дозволяє прогнозувати їх властивості при використанні нових наповнювачів різної природи та розмірності полідисперсних частинок.

Для виготовлення використовували відому технологію холодного пресування ПКМ та вільного спікання. З метою підвищення ефективності структурної модифікації ПТФЕ, як показано вище, застосовували метод обмеження об'ємного теплового розширення, який буде розглянуто у розділі 3.

Методика розробки та оптимізації нового полімерного композиційного матеріалу на основі ПТФЕ передбачає дослідження простору параметрів, для якого набір пробних точок формується із застосуванням ЛПт-послідовностей, що застосовується при вирішенні багатокритеріальних завдань [72]. Метод включає такі загальні етапи.

1. Визначення критеріїв якості, параметрів та параметричних обмежень. У цій роботі підкритеріями якості розуміємо характеристики механічних та триботехнічних властивостей ПКМ, які пов'язані з якістю і позначення яких здійснюється оптимізація.

2. Вибір пробних точок у досліджуваному N-мірному просторі параметрів (N – кількість параметрів). Як такі точки в даному методі оптимізації використовуються точки ЛПт-послідовностей. Ці послідовності є рівномірними N-вимірному паралелепіпеді простору параметрів.

3. Упорядкування таблиць випробувань, що містять значення незалежних параметрів для кожної пробної точки, що відображають концентрацію компонентів ПКМ.

4. Вибір критеріальних обмежень, тобто найгірших значень критеріїв, які можуть вважатися прийнятними.

Для визначення оптимальної концентрації компонентів комплексного наповнювача для нанокompозиту, що розробляється, був сформований набір з 8 композицій, тобто, пробних точок відповідно до ЛПт-послідовностей. Значення

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів та результати випробувань у вигляді критеріїв якості наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення параметрів та результати випробувань ПКМ

№ зразка (пробні точки)	Незалежні параметри		
	К <sub>УНТ</sub> , %	К <sub>СКГ</sub> , %	К <sub>МоS2</sub> , %
1	2,5	6	1,5
2	1,25	9	0,75
3	3,75	3	2,25
4	0,625	7,5	2,625
5	3,125	1,5	1,125
6	1,875	4,5	1,875
7	4,375	10,5	0,375
8	0,313	11,25	2,063

В якості незалежних параметрів прийняті масові концентрації компонентів: скритокристалічний графіт (СКГ) - К<sub>СКГ</sub>, вуглецеві нанотрубки (УНТ) - К<sub>УНТ</sub>, дисульфід молібдену (ДМ) - К<sub>МоS2</sub>. Для кожного компонента визначено параметричні обмеження:  $0 < K_{СКГ} < 12 \%$ ,  $0 < K_{УНТ} < 5 \%$ ,  $0 < K_{ДМ} < 3 \%$ . Вибрано критерії якості ПКМ: швидкість зношування (J) та коефіцієнт тертя (f), а також визначено критеріальні обмеження:  $J_{кр}=18,5 \cdot 10^{-4} \text{г/год}$ ,  $f_{кр}=0,11$ , виходячи з характеристик відомих ПКМ на основі ПТФЕ.

5. Виготовлення та випробування восьми комплектів зразків для випробування на тертя та знос та на розтяг. За результатами випробувань оцінюється якість отриманих ПКМ та приймається рішення про продовження чи припинення оптимізаційного дослідження.

## 3 Розробка та дослідження ПКМ

### 3.1 Розробка та дослідження механічних та триботехнічних властивостей зносостійкого ПКМ

Залежно від умов експлуатації змінюються вимоги до властивостей композиційного матеріалу, якими можна керувати шляхом зміни складу та концентрації наповнювачів. Матеріал ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв повинен володіти високою міцністю зносостійкістю і достатньою пластичністю, щоб забезпечувати герметичність внутрішньої порожнини ступиць при досить високих швидкостях ковзання по поверхні ущільнювача осі (від 1,0 до 2,5 м/с) при поганому мастиллі в широкому діапазоні. Крім того, для забезпечення герметичності ущільнення реальної шорсткої поверхні осі підтримуючого катка, матеріал ущільнювального елемента повинен при невеликому рівні контактного тиску легко деформуватися на мікровиступах і швидко заповнювати всі мікровпадини, тобто, він повинен мати відносно високий модуль пружності.

На підставі аналізу структури та властивостей відомих ПКМ на основі ПТФЕ (п.1.5) з метою отримання необхідного поєднання міцнісних, в'язкопружних та триботехнічних властивостей композиційного матеріалу з урахуванням результатів попередніх досліджень для комплексного наповнювача-модифікатора були обрані три компоненти: вуглецеві нанотрубки (СКГ) природного походження та дисперсний дисульфід молібдену.

З урахуванням властивостей ПТФЕ обраний спосіб отримання зразків ПКМ, що передбачає механоактивацію компонентів у млині у присутності порошку ПТФЕ. У цьому випадку всі компоненти разом з полімерною основою перемішуються в змішувачі, забезпеченому ножами, що обертаються з високою частотою, що забезпечує механоактивацію компонентів. Приготовлена таким чином суміш просівається через сито і засипається в прессформи, встановлені

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на столі, що обертається.

Холодне пресування заготовок проводиться під тиском 70-80 МПа. Відпресовані заготовки згідно з технологією вільного спікання піддаються термообробці при температурі  $360 \pm 3$  °С. Тривалість спікання визначається залежно від величини мінімального перерізу заготовки-зразка.

Охолодження заготовок до температури 200 °С здійснюється з мінімальною швидкістю, подальше охолодження проводиться без контролю швидкості охолодження. Зі спечених заготовок шляхом механічної обробки виготовляли зразки для дослідження механічних і триботехнічних властивостей. Відомо, що підвищення зносостійкості композиційного полімерного матеріалу може бути досягнуто при досить високій структурно-енергетичній активності мікро- і нанорозмірних компонентів, наприклад, таких як вуглецеві нанотрубки (УНТ) і ультрадисперсний скритокристалічний графіт (СКГ). Такі структурно-активні наповнювачі суттєво підвищують рівень адгезійної взаємодії компонентів, інтенсивність структуроутворюючих процесів і сприяють формуванню щільноупакованої структури полімерного нанокомпозиту з підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями.

Для попередніх досліджень виготовляли зразки ПКМ, що містять: СКГ – 8-10%, УНТ – 1.5-3.5%, MoS<sub>2</sub> – 0,75-2,5 мас. %.

Зразки ПКМ (рис. 2.1), виготовлені за технологією холодного пресування і вільного спікання для визначення механічних властивостей, випробовували на розривній машині Zwick Roell з метою визначення межі міцності при розтягуванні Бв і відносного подовження при розриві δ за методиками ГОСТ 11262-80 Е - за методикою ГОСТ 9550-81. На підставі проведених випробувань автоматично будувалися діаграми «зусилля розтягування – деформація». На (рис.3.1) наведено таку діаграму розтягування для одного із зразків ПКМ. Результати випробувань трьох зразків однакового складу представлені у таблиці 3.1.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

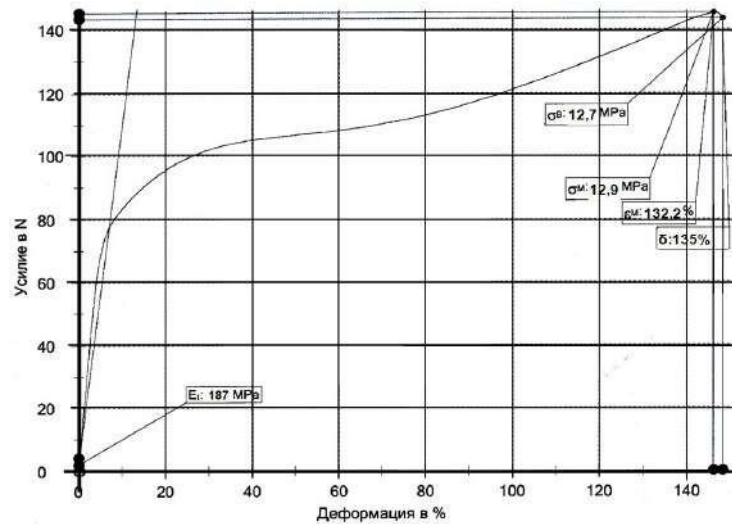


Рисунок 3.1 – Діаграма розтягування зразка №2

Таблиця 3.1. - Результати дослідження механічних властивостей зразків ПКМ

Склад ПКМ	№ зразка	Модуль пружності E, МПа	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Відносна подовж. $\delta$ , %
СКГ - 9 мас. % MoS <sub>2</sub> -0,75 мас. % УНТ-1,25 мас. % ПТФЕ-інше	1	181	13,1	142
	2	190	12,9	130
	3	189	12,3	132
	Ср.значення	187	12,7	135

Відомо, що структурна модифікація ПТФЕ запровадженням полідисперсних структурно-активних модифікаторів сприяє розвитку структуроутворюючих процесів і призводить до зміни надмолекулярної структури та підвищення фізико-механічних та триботехнічних властивостей композиційного матеріалу. Незважаючи на те, що УНТ вважаються дуже перспективними армуючими наповнювачами.

Модифікаторами завдяки своїм властивостям міцності і високої структурної активності до цього часу не розроблена технологія, що забезпечує рівномірний розподіл нанотрубок в матриці. Проте наші попередні дослідження зносостійкості ПТФЕ, модифікованого нанотрубками, показали, що введення нанотрубок призводить до значного підвищення зносостійкості ПТФЕ. На рис. 3.2 наведено результати триботехнічних випробувань ПКМ на основі ПТФЕ, що містить полідисперсний прихованокристалічний графіт (СКГ). З наведеного графіка видно, що у інтервалі концентрацій 8...20 % мас. швидкість зношування залишається постійною та рівною  $11,2 \cdot 10^{-4}$  г/год.

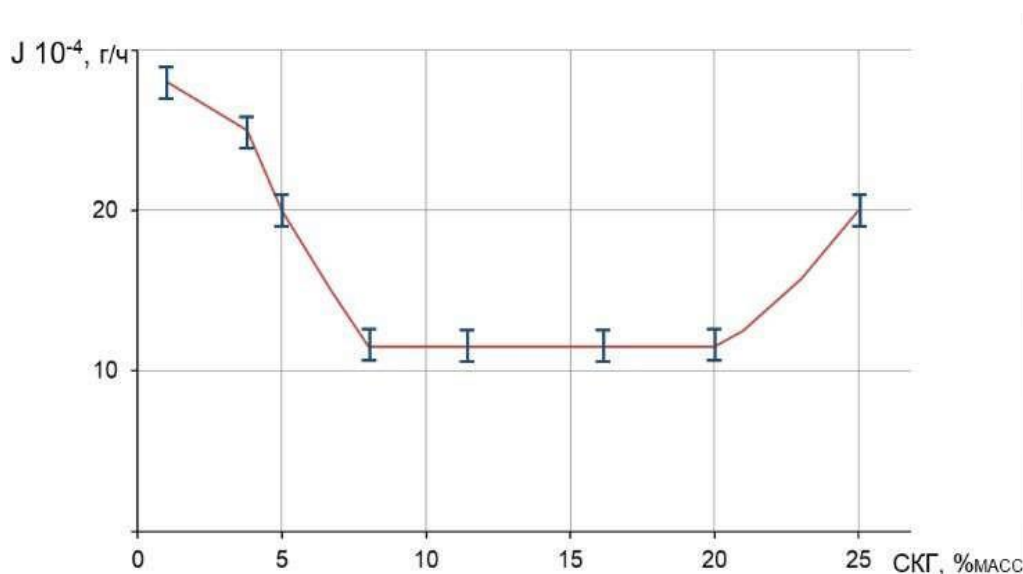


Рисунок 3.2 - Концентраційна залежність швидкості зношування ПКМ з ультрадисперсним СКГ

З метою визначення впливу УНТ на швидкість зношування було виготовлено та випробувано зразки ПКМ, що містять однакову кількість СКГ – 8% мас. і додатково від 0,5 до 3,5% мас. вуглецевих нанотрубок марки Graphistrength® фірми Arkema (УНТ). Результати випробувань показані рис. 3.3 як концентраційної залежності швидкості зношування ПКМ.

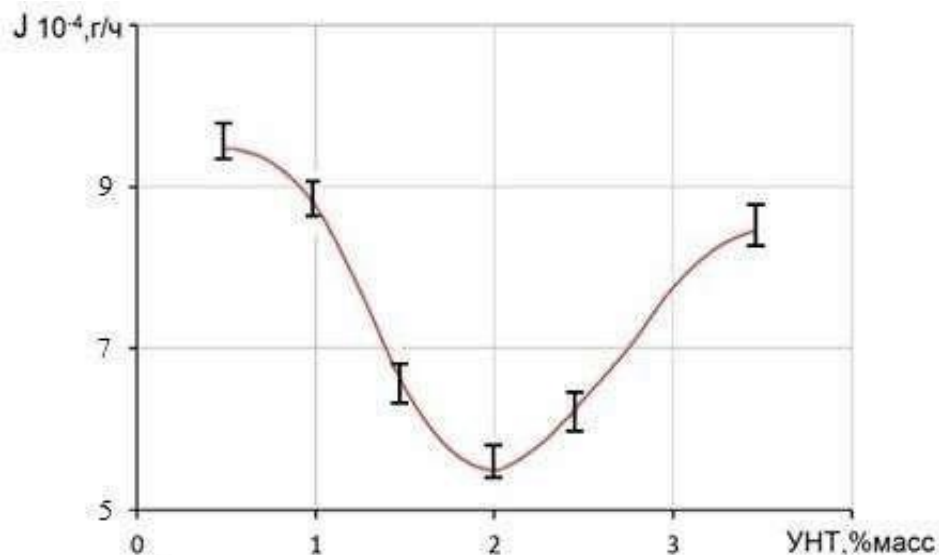


Рисунок 3.3 – Концентраційна залежність швидкості зношування ПКМ з наповнювачем: 8 % СКГ + УНТ

Як видно з графіка, запровадження нанорозмірного наповнювача УНТ у комплексі з ультрадисперсним СКГ значно підвищує зносостійкість ПКМ. Мінімальна швидкість зношування отримана при концентрації УНТ-2% мас. Вона становить  $5,6 \cdot 10^{-4}$  г/ч, що у 2 рази менше швидкості зношування композиційного матеріалу, що містить лише 8% мас. СКГ (рис.3.2). Порівняння залежностей на рис. 3.2 та 3.3 наочно показує, що введення нанорозмірного наповнювача до складу комплексного модифікатора забезпечує суттєве підвищення зносостійкості антифрикційного ПКМ на основі ПТФЕ.

### 3.2 Оптимізація складу ПКМ за критеріями якості

Оптимізацію нанокompозиту, що розробляється, на основі ПТФЕ виконували методом дослідження простору параметрів, набір пробних точок для якого формується із застосуванням ЛПт-послідовностей. Метод оптимізації, заснований на застосуванні таких послідовностей, може застосовуватися до

дослідження шматково-безперервних у просторі параметрів функцій. Раніше експериментально було показано, що залежність триботехнічних характеристик концентрації наповнювачів задовольняє цим вимогам деяких ПКМ.

Відповідно до методики оптимізації складу ПКМ (гл.2) як незалежні параметрів досліджуваної системи (композиційного матеріалу) було обрано масові концентрації компонентів:  $K_{СКГ}$  (СКГ),  $K_{УНТ}$  (УНТ),  $K_{ДМ}$  (ДМ). Прийнято такі допустимі межі зміни параметрів (параметричні обмеження):  $0 < K_{СКГ} < 12\%$ ,  $0 < K_{УНТ} < 5\%$ ,  $0 < K_{ДМ} < 3\%$ . Встановлено функціональне обмеження:  $K_{СКГ} + K_{УНТ} + K_{ДМ} + K_{ПТФЕ} = 1$  де  $K_{ПТФЕ}$  масова концентрація ПТФЕ. Для обраних критеріїв якості: швидкість зношування ( $J$ ) та коефіцієнт тертя ( $f$ ), критеріальні обмеження:  $J < J_{Кр}$ ,  $f < f_{Кр}$ , де  $J_{Кр} = 18,5 \cdot 10^{-4}$  г/ч - швидкість зношування матеріалу-прототипу в аналогічних умовах випробувань,  $f_{Кр} = 0,11$  - коефіцієнт тертя матеріалу кріолон-5 [45] для аналогічних умов випробувань. Дане значення коефіцієнта тертя відповідає сучасним вимогам до полімерних антифрикційних матеріалів. Відповідно до обраного алгоритму було визначено пробні точки (8 точок) та складено таблицю випробувань.

Значення незалежних параметрів системи - концентрація наповнювачів та результати випробувань з отриманими значеннями критеріїв якості наведено у таблиці 3.2 ). Отримані результати показують, що для всіх досліджуваних композицій виконується умова  $J < J_{Кр}$ , проте умова  $f < f_{Кр}$ , виконується лише для двох композицій: №2 і №4, а для інших композицій значення коефіцієнта тертя перевищує обране критеріальне значення. Це може бути обумовлено впливом нерівномірного розподілу УНТ у матриці та слабку адгезійну взаємодію наповнювача з полімером. Характеристики механічних властивостей  $\sigma_b$ ,  $E$ , мають відносно невисокі значення, але прийнятні для полімерних антифрикційних матеріалів триботехнічного призначення. Значення модуля пружності порівняно невелике, що сприяє підвищенню герметизуючої здатності ущільнювальних елементів.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 Значення критеріїв якості та параметрів обмеження

№ зразка	Критерії якості		Параметри обмеження		
	J, 10 <sup>-4</sup> г/год	f, %	E, МПа	σ <sub>в</sub> , МПа σ <sub>Б</sub>	δ, %
1	10,2	0,13	179	15,0	97
2	5,7	0,11	187	12,7	135
3	13,4	0,12	149	20,0	50
4	8,2	0,11	197	16,5	177
5	11,4	0,13	166	14,9	115
6	8,2	0,13	187	17,0	162
7	10,5	0,14	110	9,5	67
8	10,3	0,13	110	12,0	135

Таким чином, отримані композиційні матеріали, для яких значення швидкості зношування менше за критерій на 30-70 %, при цьому зразок № 2 має найменшу швидкість зношування  $5,7 \cdot 10^{-4}$  г/год, а зразки №4 і №6 мають  $J = 8,2 \cdot 10^{-4}$  г/год. Середня швидкість зношування трьох названих зразків дорівнює  $7,36 \cdot 10^{-4}$  г/ч, що у 2,5 рази менше  $J_{кр}$ . На цій підставі було прийнято рішення не продовжувати оптимізаційне дослідження та вважати оптимальною концентрацію наповнювачів в інтервалі концентрацій зразків № 2 та 4: прихований кристалічний графіт 7,5-9,0 мас.%, дисульфід молібдену 0,75-2,62 мас.%, вуглецеві нанотрубки 0,63-1,5 мас.%, інше - ПТФЕ. Названий склад є оптимальним за критеріями якості.

### 3.3 Розробка технології виготовлення зразків ПКМ

З метою максимального підвищення механічних та триботехнічних властивостей композиційного матеріалу та з урахуванням результатів попередніх досліджень для відпрацювання більш ефективних технологій було прийнято спосіб виготовлення ПКМ з обмеженням об'ємного розширення при

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термічній обробці (спіканні) Для реалізації цього способу було розроблено спеціальні закриті пристрої.

На рис. 3.4 показано закритий пристрій, в який встановлюються запресовані заготовки зразків досліджуваного ПКМ для випробування на тертя та зношування та поміщаються в піч для термообробки (спікання). Регулювальний диск забезпечує гарантований контакт зразка в осьовому напрямку компенсації теплового розширення корпусу 1 за рахунок попереднього тиску стиснення.

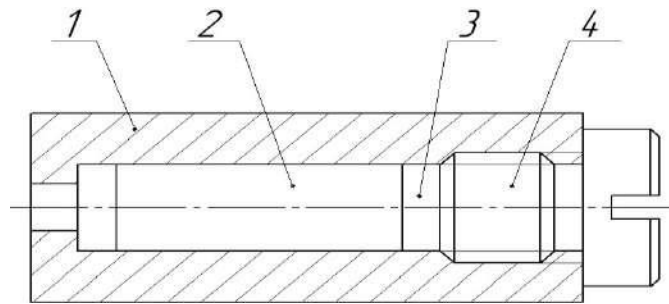


Рисунок 3.4 - Пристрій для термообробки заготовок ПКМ за умов всебічного стискання: 1 – корпус; 2 – зразок; 3 – диск регулювальний; 4 – кришка

На рис. 3.5 показано більш досконалий закритий пристрій, на який встановлювали пресовані заготовки зразків ПКМ і пружиною створювали необхідний тиск стиснення зразка в осьовому напрямку.

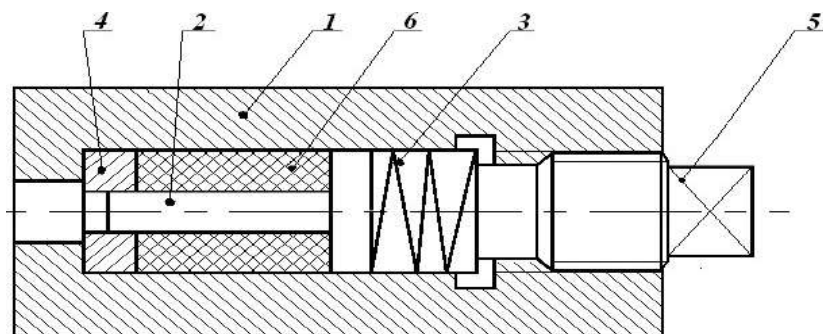


Рисунок 3.5 - Пристрій для термообробки заготовок ПКМ в умовах всебічного стиснення:

1 – стакан; 2 – пуансон; 3 – пружина стиснення; 4 - опорне кільце; 5 -

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Зібраний пристрій поміщали в піч і робили термообробку - нагрівання до 360 °С, витримку при цій температурі та охолодження за заданою програмою.

З метою скорочення витрат на проведення тривалих експериментальних досліджень використовували методику порівняльного аналізу впливу умов та режиму термообробки (спікання) дисперсно наповнених композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену на параметри контактної взаємодії частинок матриці та частинок наповнювача у процесі термообробки. Ця методика може використовуватися для попередньої оцінки ефективності режимів пресування та термообробки на параметри міжфазної взаємодії та напружено-деформованого стану (ПДВ). На прикладі композиту ПТФЕ+СКГ нижче показано ефективність названої методики. Методика включає імітаційне моделювання структури (рис. 3.6) мезооб'єму заготівлі полімерного композиційного матеріалу.

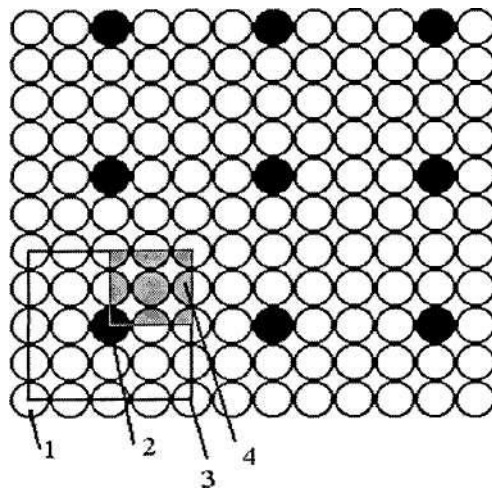


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель заготівлі ПКМ (мезооб'єм заготівлі ПКМ): 1 – частка полімеру; 2 - частка наповнювача; 3 - повторюваний елемент (комірка) структури матеріалу, що відповідає мезооб'єму;  
4 - розрахункова область

У наведеній моделі з урахуванням припущень розглядається взаємодія мікрочастинки наповнювача та мікрочастинок полімеру сферичної форми з однаковими розмірами (радіус 20 мкм).

Упаковка частинок на рис. 3.6 відповідає об'ємній концентрації наповнювача  $\varphi = 6,25\%$ : частинки наповнювача мають слабкий вплив один на одного, однак, оскільки властивості матеріалу помітно змінюються. Прийняті припущення, що суттєво спрощують вирішення завдання, впливають на кількісний результат, однак, дозволяють виявити та порівняти особливості контактної взаємодії частинок компонента в різних умовах спікання пресованої заготовки зразка.

Змінюючи умови термообробки (вільне спікання або з обмеженням теплового розширення), за допомогою моделі можна визначити значення параметрів контактної взаємодії для мезооб'єму. При перенесенні на макрооб'єм отримані результати мають якісний характер, проте дозволяють провести порівняльний аналіз впливу умов термообробки на параметри контактної взаємодії.

В умовах обмеження теплового розширення, коли обсяг заготівлі з підвищенням температури залишається практично постійним, виникає значний внутрішній тиск. Встановлено, що порівняно із вільним спіканням за результатами комп'ютерного моделювання контактний тиск стиснення між частинками при температурі 360 °C зростає в 3,5 рази, відносна поверхня контакту - до 2,4 рази, а пористість матеріалу зменшується в 2,6 рази. Зазначена зміна параметрів напружено-деформованого стану забезпечує значне посилення адгезійної взаємодії між компонентами (частинами полімеру та наповнювача) та за рахунок цього значне підвищення характеристик механічних та триботехнічних властивостей ПКМ. У таблиці 3.3 наведено порівняльні характеристики механічних та триботехнічних властивостей зразків ПКМ, термооброблених вільним спіканням та в умовах об'ємного обмеження теплового розширення.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 Характеристики механічних та триботехнічних властивостей ПКМ, виготовлених при двох різних способах спікання

Спосіб спікання (термообробки)	Характеристики властивостей (середні значення)				
	Швидкість зношування $J, 10^{-4}$ г/год.	Коефіцієнт тертя, $f$	Модуль пружності, $E, \text{Мпа}$	Межа міцності, $\sigma_b, \text{Мпа}$	Відносне подовження, $\delta, \%$
Вільне спікання	5,7	0,11	187	12,7	135
Спікання з обмеженням теплового розширення	4,5	0,10	248	18,9	170

Наведені дані показують, що при спіканні зразків з обмеженням теплового розширення межа міцності підвищується на 48%, модуль пружності – на 31,9 %, відносне подовження – на 26 %. При цьому швидкість зношування зменшується на 21 %, коефіцієнт тертя – на 9 %. Отже, запропонований спосіб термообробки закритому пристрої є дуже ефективним.

### 3.4 Дослідження фазового складу та надмолекулярної структури полімерних нанокомпозитів

Дослідження закономірностей структурно-фазових перетворень у матриці при модифікації ПТФЕ комплексним наповнювачем, у тому числі з використанням розглянутого способу термообробки, підвищує ефективність структурної модифікації, проводили методами рентгеноструктурного аналізу та електронної мікроскопії ПКМ, що розробляються.

Для виявлення закономірностей структурних змін у матриці при модифікації ПТФЕ комплексним наповнювачем та використанням технологічного прийому, що підвищує ефективність структурної зміни

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

модифікації, було проведено рентгеноструктурний аналіз ПКМ. Дифрактограми, представлені рис. 3.7, 3.8, отримані на рентгенівському дифрактометрі D8 Advance в монохроматизированном Cu-K $\alpha$  випромінюванні (графітовий монохроматор на дифрагированном пучку, кут монохроматора 26,4 градуса). Напруга та струм на трубці 40 кV і 40 mA, відповідно. По щілинах: Div. slit 0.5 мм, Ant. slit 0,5 мм.

Отримані дифрактограми відображають фазовий склад аморфно кристалічної структури ПТФЕ і містять основну корисну інформацію в області кутів дифракції  $2\theta = 10^\circ - 60^\circ$ . Зміст кристалічної фази характеризується параметрами кристалічних піків, частка аморфної фази визначається площею аморфного гало.

На рисунках 3.7 та 3.8 показані загальні дифрактограми від поверхонь зразків ПКМ, отриманих при вільному спіканні та в умовах обмеження теплового розширення.

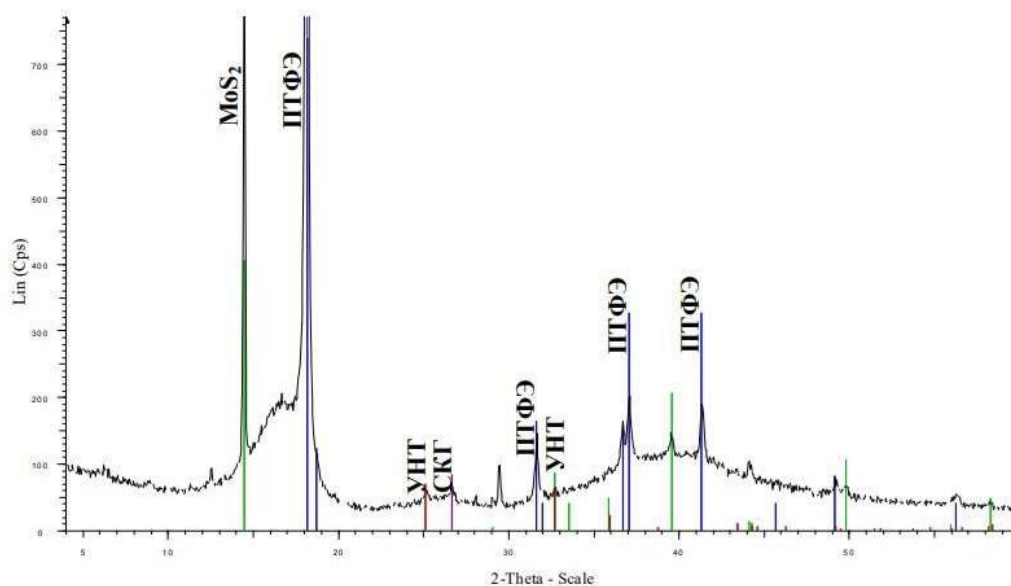


Рисунок 3.7 - Дифрактограма поверхні ПКМ, отриманого при вільному спіканні зразків складу: СКГ – 9 мас.%, MoS<sub>2</sub>–0,75мас.%, УНТ–1,25 мас.%, ПТФЕ–інше

Дифрактограми містять аморфне гало третього порядку відбиття від

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

площин (001) полімерної матриці ПТФЕ та дифракційні максимуми (003) та (100) від її кристалічних областей, а також рефлекси від наповнювачів. Полідисперсний СКГ проявляється у вигляді слабкого рефлексу, а дисульфід молібдену – у вигляді численних рефлексів, а також у вигляді слабких рефлексів виявлені вуглецеві нанотрубки.

З дифрактограм за положенням дифракційних максимумів та їх напівширині були розраховані параметри кристалічного осередку «а» і «с», а також розмір кристалітів «L» за формулами 2.1, 2.2. Ступінь кристалічності визначали як відношення площі, що займає кристалічні рефлекси, до загальної площі кривої відображення в області кутів  $2\beta = 10^\circ\text{-}20^\circ$  за вирахуванням фону (2.4).

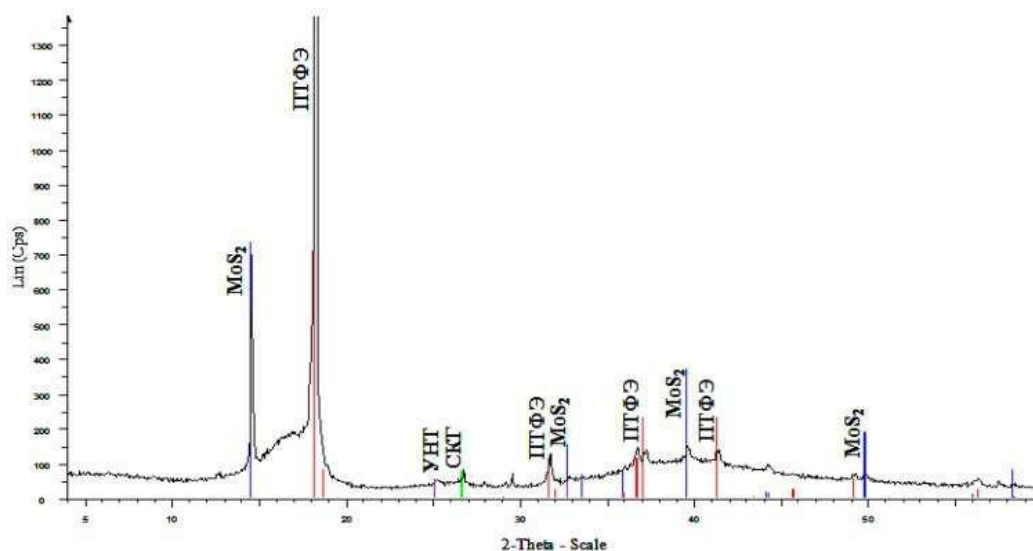


Рисунок 3.8 - Дифрактограма поверхні ПКМ, одержаного при спіканні в умовах обмеження теплового розширення зразка складу:

СКГ - 9 мас.%, MoS<sub>2</sub>-0,75мас.%, УНТ-1,25 мас.%, ПТФЕ-решта

На дифрактограмі поверхні зразків ПКМ, одержаних спіканням в умовах обмеження теплового розширення (рис.3.8) висота рефлексу значно вище за відповідний рефлекс дифрактограми поверхні ПКМ, отриманого вільним спіканням (рис.3.7). Це свідчить про те, що ступінь кристалічності полімерної

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці збільшився.

За положенням дифракційних максимумів та їх напівшириною були розраховані параметри кристалічного осередку «а» і «с», а також ступінь кристалічності «К» та розміри кристалітів «L» (табл. 3.4).

Таблиця 3.4. Результати рентгеноструктурного аналізу зразків ПКМ, виготовлених за різними технологіями

Технологія виготовлення зразків	Параметри надмолекулярної структури			
	а, нм	с, нм	К, %	L, нм
Вільне спікання	0,563	1,59	56	70
Спікання при обмеженні об'ємного теплового розширення	0,564	1,59	64	60

Результати рентгеноструктурних досліджень свідчать про сталість параметрів кристалічного осередку ПТФЕ ( $a = b = 0,56$  нм;  $c = 1,6$  нм) при вільному спіканні та при спіканні в умовах обмеження теплового розширення, значення яких відповідають ненаповненому ПТФЕ. Ступінь кристалічності ПКМ, синтезованих за умов вільного спікання становить 56 %, а умовах обмеження теплового розширення – 64 %. Середній розмір кристалітів, визначений формулою Шеррера, при вільному спіканні композиції становив 70 нм. При спіканні за умов обмеження теплового розширення отримали 60 нм. Отже, спікання заготовок ПКМ з обмеженням їхнього теплового розширення призводить до зменшення середнього розміру кристалітів на 14,3%. Дані (табл.3.4) показують, що параметри кристалічного осередку «а» і «с» у межах похибок вимірювань залишаються постійними і не залежать від ступеня наповнення полімеру та умов термообробки. Невисокі значення ступеня кристалічності ПКМ, що містять комплексний наповнювач, при відносно високому середньому розмірі кристалітів, свідчить про невелику частку кристалічних структурних елементів.

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати свідчать про збереження загальної закономірності формування упорядкованих областей у матриці при її модифікації структурно активними наповнювачами – зменшення розмірів упорядкованих областей матриці, що супроводжується, як правило, зміною морфології її надмолекулярної структури та підвищенням характеристик механічних та триботехнічних властивостей.

Результати рентгеноструктурного аналізу для композицій з різною концентрацією СКГ, отриманого за технологією вільного спікання з обмеженням теплового розширення представлені у вигляді концентраційних залежностей ступеня кристалічності  $K$  та розмірів кристалітів  $L$  (Рис. 3.9).

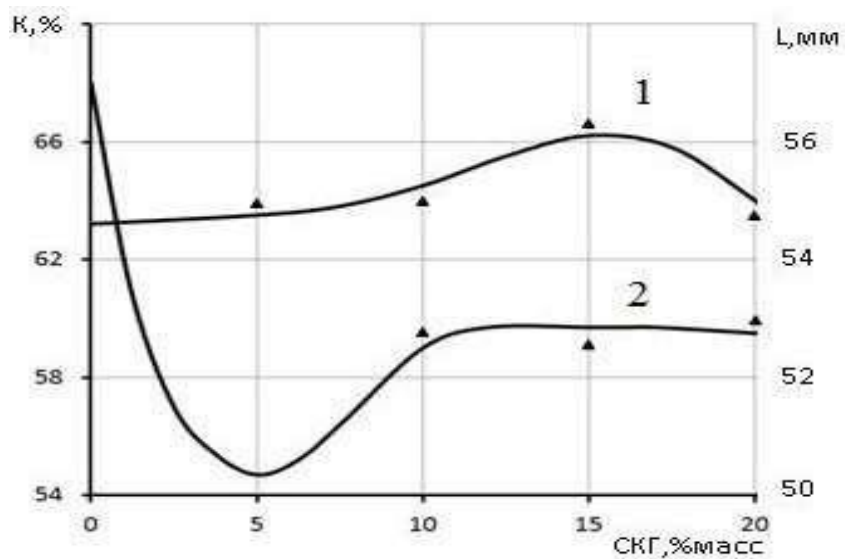


Рисунок 3.9 - Концентраційні залежності ступеня кристалічності (1) та розміру кристалітів (2) для ПКМ складу: ПТФЕ+СКГ

Отримані результати показали, що параметри кристалічного осередку «а» і «с» у межах похибок вимірів залишаються практично постійними і не залежать від ступеня наповнення полімеру. Середній розмір кристалітів при концентрації СКГ 5% мас. зменшується від 57 нм на 125 мас. і потім збільшується. В інтервалі концентрації 10-25% мас. становить 52-53 нм та зі збільшенням концентрації до 30 % мас. середній розмір кристалітів знову трохи зменшується.

Підвищення ступеня кристалічності спостерігається лише за досить високої концентрації графіту (15 %), коли геометричний вплив великої кількості частинок наповнювача на геометрію елементів структури пригнічується упорядкуванням кристалічних областей, оточених дисперсними частинками при кристалічного графіту.

Для порівняння ефективності запропонованого способу спікання зразків рис. 3.10 представлені концентраційні залежності ступеня кристалічності ПКМ, отриманого при вільному спіканні та в умовах об'ємного обмеження теплового розширення.

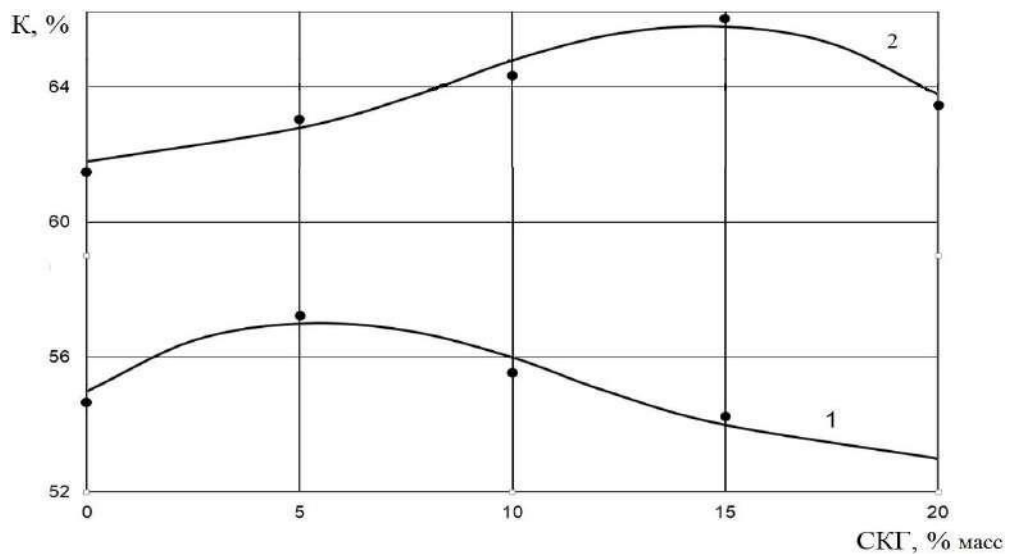


Рисунок 3.10 – Концентраційна залежність ступеня кристалічності ПКМ: 1 – при вільному спіканні; 2 – при спіканні з обмеженням теплового розширення

Наведені залежності показують, що при вільному спіканні ступінь кристалічності менший у всьому діапазоні концентрацій, що пов'язано зі зменшенням рівня адгезійної взаємодії частинок наповнювача та матриці при вільному спіканні. Отримані залежності ступеня кристалічності ПКМ свідчать про зниження структурної активності наповнювача та ефективність структурної модифікації ПТФЕ при вільному спіканні.

Відомо, що вуглецеві наповнювачі і особливо нанорозмірні мають високу структурну активність, викликаючи не тільки зміну параметрів, а й морфологію надмолекулярної структури, що забезпечує підвищення механічних і

трибологічних властивостей ПКМ на основі ПТФЕ. З метою вивчення особливостей процесів структурної модифікації ПТФЕ при введенні мікророзмірного СКГ та нанорозмірних УНТ проводили дослідження структури ПКМ методом електронно-мікроскопічного аналізу.

Результати досліджень показали, що у всьому діапазоні зміни концентрації СКГ композити, синтезовані при вільному спіканні, мають однотипну структуру, схожу на ламелярну структуру вихідного ПТФЕ, але більш роздроблену (рис. 3.11). Поверхня сколу зразка ПКМ пухка, роздроблена, пориста; відсутні межі утворень, ідентифікованих як сфероліти, не виявлено кристалічних утворень поблизу поверхонь частинок наповнювача.

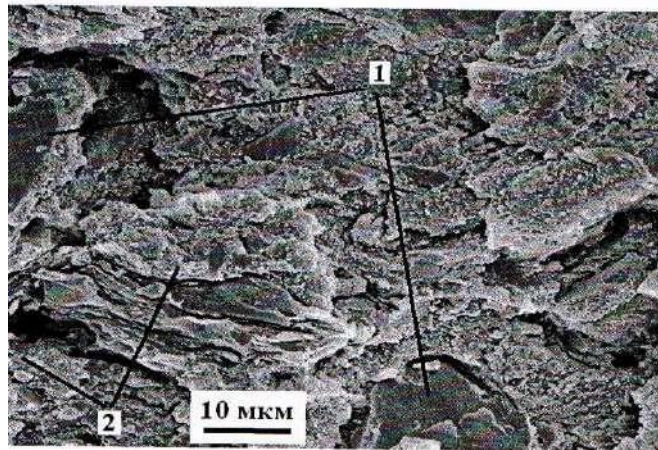


Рисунок 3.11 - Мікрофотографії сколу зразка ПТФЕ, що містить 20% СКГ синтезованого вільним спіканням: 1 - частинки наповнювача; 2 - аморфна фаза матриці

Відомо, що найбільшу зносостійкість мають ПКМ з високою впорядкованістю структурної організації. Підвищення зносостійкості ПКМ пов'язане з утворенням у матриці сферолітів різних форм і розмірів, руйнування яких потребує більших енергетичних витрат, ніж руйнування структурних утворень ненаповненого ПТФЕ. Шарувата структура частинок скритокристалічного графіту знижує рухливість шарів полімеру, що може

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сприяти збільшенню зносостійкості ПКМ на основі ПТФЕ. Однак, вплив структурної активності прихованого кристалічного графіту на процес структуроутворення в ПТФЕ не великий.

З метою підвищення структурної активності СКГ, як показано в п.3.3, був застосований спосіб спікання заготовок ПКМ у спеціальному пристрої, що обмежує об'ємне теплове розширення спікаємого матеріалу. При синтезі ПКМ у закритому пристрої розвивається процес формування надмолекулярної структури в умовах значного зближення частинок СКГ та ПТФЕ не тільки при пресуванні композиції, але і при її спіканні внаслідок обмеження теплового розширення заготовки. Встановлено [31], що зразки, виготовлені з обмеженням теплового розширення, мають меншу пористість, більш високу міцність та щільність, меншу кількість дефектів у матеріалі (пор, несплошностей тощо), що сприяє підвищенню механічних властивостей та зносостійкості композиційного матеріалу.

Результати рентгеноструктурного аналізу та електронно-мікроскопічних досліджень дозволяють зробити висновок про те, що зміна властивостей ПТФЕ при його модифікації активними модифікаторами обумовлена зміною фазового складу та параметрів його надмолекулярної структури. Поряд із надмолекулярними утвореннями, властивими ПТФЕ, в матриці виявляються ділянки полімеру зі структурою, не характерною для чистого ПТФЕ, які можуть бути ідентифіковані як дефектні сфероліти неправильної форми (рис. 3.12).

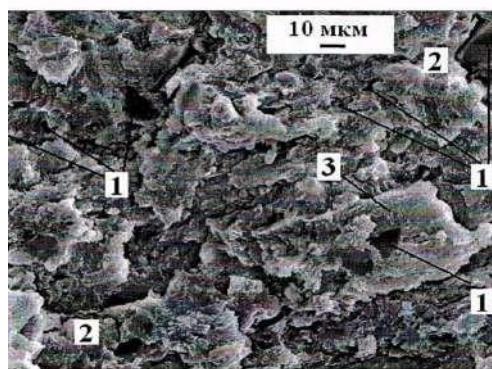


Рисунок 3. 12 - Мікрофотографії сколу зразка ПТФЕ, що містить 20% СКГ

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

синтезованого в умовах обмеження теплового розширення: 1 - частинки наповнювача; 2 – аморфна фаза матриці; 3 – сфероліт

Методом електронної мікроскопії встановлено, що введення в ПТФЕ вуглецевих нанотрубок у кількості 1,5 - 3,5 % мас також призводить до подрібнення вихідної ламелярної структури полімеру (рис. 3.13, 3.14), яка розбивається нанотрубками на невеликі (щодо структури ненаповненого) . При цьому спостерігається значна зміна морфології надмолекулярної структури ПТФЕ з утворенням дефектних сферолітів неправильної форми. Поява сферолітів спостерігається поблизу нанотрубок та вздовж нанотрубок. Встановлено, що окремі нанотрубки та пучки нанотрубок не тільки є центрами кристалізації, а й можуть впроваджуватися в аморфні та кристалічні області матриці, особливо у разі збільшення концентрації УНТ (рис. 3.14).

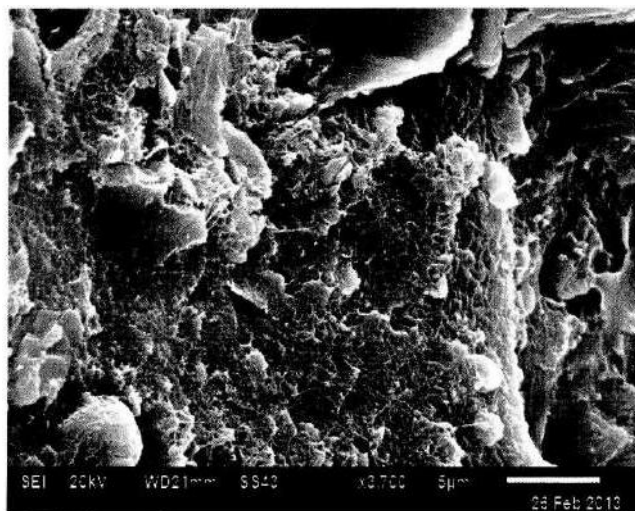


Рисунок 3.13 – Мікрофотографія сколу зразка (композиція № 2, табл. 3.2), синтезованого вільним спіканням (збільшення 3700)

Нерівномірність розподілу частинок у матриці призводить до наявності в композиційному матеріалі областей, в яких відсутні нанотрубки та, відповідно, сфероліти (рис. 3.13, 3.14). При збільшенні концентрації наповнювача помітно проявляється ефект розпушування на матрицю (рис. 3.14).

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

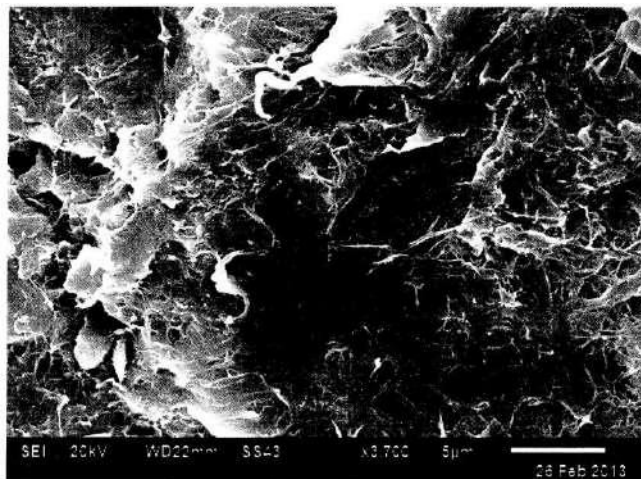


Рисунок 3.14 - Мікрофотографія сколу зразка (композиція № 2, табл. 3.2), синтезованого спіканням в умовах обмеження теплового розширення (збільшення 3700)

Таким чином, значна зміна структури полімерної матриці, що спостерігається, порівняно з вихідною структурою ПТФЕ, що виражається в змінах характеристик надмолекулярної структури (типу, форми, параметрів надмолекулярної структури) свідчить про високу структурну активність УНТ. Практично однакові значення  $L$  і для матеріалів, що містять нанотрубки без СКГ і з СКГ, свідчать про визначальний вплив нанотрубок в порівнянні з мікророзмірним наповнювачем СКГ. Це можна пояснити більшою структурною активністю нанонаповнювача в порівнянні з мікророзмірним наповнювачем, що пояснюється більш розвиненою та активною поверхнею нанонаповнювача. Тому при відносно невеликих концентраціях нанонаповнювача матриця переходить у стан «насичення», коли утворення полімерних прошарків між частинками наповнювача при подальшому збільшенні їх кількості неможливе без порушення "суцільності" матеріалу.

Отже, застосування УНТ як компонента комплексного наповнювача та обмеження об'ємного теплового розширення при спіканні виробу з ПКМ дозволяє отримати антифрикційний матеріал з більш високою зносостійкістю та характеристиками механічних властивостей, що відповідають сучасним

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимогам до матеріалів, що застосовуються у вузлах тертя, у тому числі у металополімерних герметизах. Нанорозмірний наповнювач (УНТ), що застосовується, можна характеризувати як структурно активний модифікатор, ступінь впливу якого на матрицю залежить від технології твердофазного синтезу композиту і зростає при використанні технології синтезу ПКМ з обмеженням теплового розширення.

## **Висновки**

1. Вуглецеві наповнювачі по відношенню до ПТФЕ виявляє структурну активність, значно впливаючи на морфологію та ступінь упорядкованості полімерної матриці.

2. При використанні наповнювачів з розвиненою питомою поверхнею (нано наповнювачів) «насичення» матриці наповнювачем відбувається при невеликих концентраціях (декілька масових відсотків), у той час як при введенні мікророзмірного СКГ це відбувається при 8-10% мас.

3. Підвищення ефективності структурної модифікації може досягатися спіканням матеріалу в умовах об'ємного обмеження теплового розширення, що призводить до посилення контактної взаємодії та адгезійних зв'язків полімерної матриці з наповнювачем, що забезпечує підвищення характеристик механічних та триботехнічних властивостей.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **4 Розробка герметизуючого пристрою підтримуючих катків багатопільових гусеничних машин**

### **4.1 Аналіз матеріалів герметизуючих пристроїв підтримуючих катків**

В ущільненнях підтримують катків як матеріали ущільнювальних елементів використовують гуму СКН-18.

Кількісні показники якості гуми задаються ГОСТ 38.005204-71, яким регламентовано групи з фізико-механічних властивостей. Відповідно до вимог стандарту гума відноситься до класу - еластомери, підкласу - по базовому каучуку СКН-18, групі - середньотверда олійностійка гума для ущільнень гідросистем машин при швидкості ковзання до 3 м/с, тиску робочого середовища до 40 МПа, робоче середовище - нафтове РШ при температурі – 60 - 100 °С, підгрупі – СКН-18.

Основним компонентом гуми є каучук, який визначає її експлуатаційні властивості і, насамперед, сумісність із робочими середовищами, робочі температури та механічні властивості.

Гуми на основі СКН мало набухають у мінеральних оліях і паливах, воді та водомістких рідинах, розчинні в ароматичних вуглеводнях - бензолі, толуолі, етилацетаті та хлороформі. Чим вище вміст СКН акрилонітрилу, тим вище масло- і бензостійкість, але нижче морозостійкість. Розглянута марка гуми характеризується низьким модулем еластичності, середньою твердістю та міцністю при розриві та досить високими показниками морозостійкості. У той же час у процесі експлуатації та зберігання під дією різних причин відбувається зміна хімічного складу та фізичного стану гуми, що призводить до зміни вищевказаних стандартних показників, властивостей, що веде до зниження працездатності пристроїв, виготовлених з даного матеріалу. Таку зміну властивостей гуми у часі називають старінням. З безлічі факторів, що стимулюють процес старіння, необхідно виділити тиск (статичний та

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

динамічний) і температуру.

Зміна температури та тиску призводить до зміни властивостей еластомеру внаслідок релаксації та інших фізико-хімічних процесів. Механізм деформації еластомеру має особливості. Високоеластичний стан є проміжним між рідким (текучим) та склоподібним, тому в комплексі механічних властивостей гуми можна виявити властивості твердого та рідкого тіла. У процесі деформації відбувається перебіг (рух) сегментів макромолекул під впливом зовнішніх сил. Цей процес супроводжується подоланням внутрішнього тертя і, як наслідок, розсіюванням (дисипацією) енергії.

При терті без мастильного матеріалу та в умовах граничного мастила сила тертя  $P_f$  для еластомерів зі зниженням температури лінійно збільшується до деякої максимальної величини і далі різко знижується до рівня, характерного для температури 40-60<sup>0</sup>С (рис. 4.1).

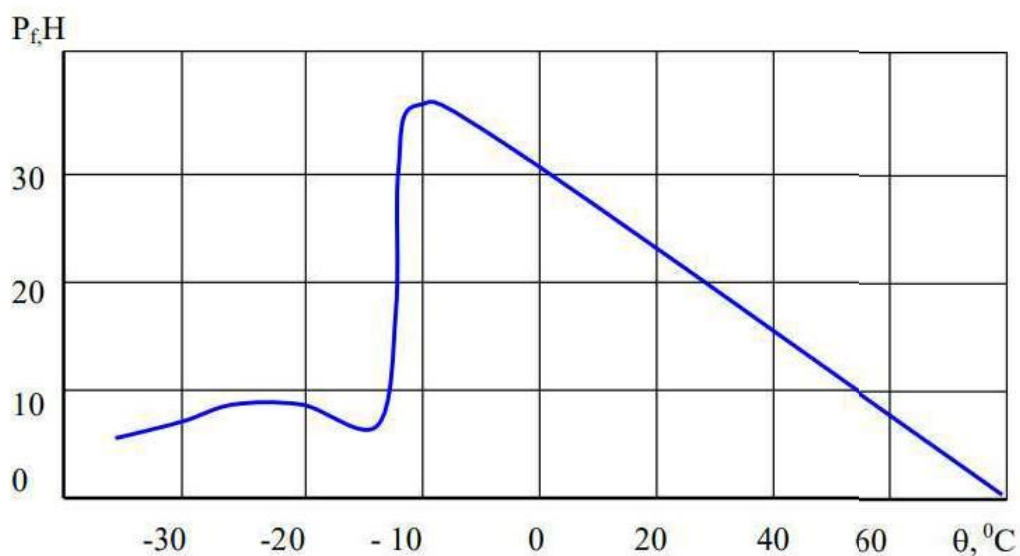


Рисунок 4.1 - Залежність  $P_f$  від температури для гуми СКН-18

Таким чином, в результаті аналізу властивостей матеріалу еластомеру, що використовується в пристроях, що герметизують підтримуючих катків, можна відзначити наступне:

1. У процесі експлуатації та зберігання при зміні тиску та температури

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в еластомері відбуваються структурні зміни та розвиваються релаксаційні процеси, що призводять до неприпустимих змін характеристик механічних властивостей та до втрати однієї з основних функціональних властивостей - пружної еластичності, та появи залишкової деформації, що характерно особливо при тривалому періоді зберігання.

2. Гума має низькі антифрикційні властивості, особливо в області нульових та невеликих відємних температур, а схильність до виникнення адгезійних зв'язків з контртілом навіть при мінімальних контактних тисках в умовах за відсутності відносного руху призводить до механічних пошкоджень гумових елементів ущільнювачів.

Надійність герметизуючих пристроїв підшипникового вузла маточини підтримуючої ковзанки, оцінюється головним критерієм – заданим ступенем герметичності протягом встановленого технічною документацією терміну зберігання та експлуатації. Забезпечення необхідного рівня надійності для трибосистем типу герметизуючих пристроїв вимагає комплексного підходу при вирішенні цієї проблеми. Це тим, що механізм герметизації даного вузла зумовлений як механічним взаємодією контактуючих поверхонь, так й процесами тертя і зношування у зоні контакту, і навіть фізико- хімічними перетвореннями матеріалу у процесі експлуатації під час контакту з різними середовищами.

Отже, вирішення завдання забезпечення заданого рівня надійності ГУ протягом тривалої експлуатації може бути здійснено лише шляхом підвищення та оптимізації герметизуючих властивостей ущільнень з урахуванням всіх факторів, що негативно впливають в умовах експлуатації. Виконання даної задачі доцільно здійснювати за двома напрямками: перше - розробка нових матеріалів, фізико-механічні властивості яких перевершують властивості відомих ущільнювальних матеріалів; друге – розробка оптимальної конструкції герметизуючого пристрою, що дозволяє реалізувати з найбільшою ефективністю механічні та триботехнічні властивості ущільнюючого матеріалу.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4.2 Механізми герметизації та тертя

Механізм герметизації щодо м'яких полімерів, до яких відноситься і наповнений ПТФЕ, визначається, головним чином, природою їх деформаційних властивостей, що характеризуються відносно малою областю пружних деформацій (~5 %), великою областю вимушено еластичної деформації, залежністю модуля пружності від швидкості деформування і температури [ 6]. У приладах, що герметизують, контактна взаємодія щодо м'якої поверхні ущільнювального елемента ( $H = 40 - 80$  Мпа) відбувається з твердою шорсткою поверхнею циліндра ( $Ra = 0,16 - 0,32$  мкм). Спостерігається пластична деформація, сполучена поверхня ущільнювального елемента – губки набуває форми шорсткої поверхні циліндра, заповнюючи западини мікронерівностей. При їх відносному переміщенні для забезпечення герметичності контактна поверхня губки ущільнювального елемента повинна копіювати форму циліндра, що рухається, здійснюючи радіальні мікро- і макропереміщення, які обумовлені радіальними переміщеннями циліндричної поверхні осі катка в межах радіального зазору  $\delta = 100 - 150$  мкм. При цьому макродеформації відбуваються по всьому об'єму губки, що ущільнює, і мають пружний характер, якщо відносна деформація не перевищує 0,5 %. Мікродеформації реалізуються тільки в тонкому поверхневому шарі губки, що ущільнює.

Наявність мікронерівностей різної величини на поверхні, що ущільнюється, і відносне переміщення поверхонь не дозволяє отримати абсолютну герметичність ущільнення, і перетічки робочої рідини можливі по незакритих мікроканалах під впливом перепаду тисків  $\Delta p$ . Певні успіхи у розвитку ущільнювальної техніки дозволяють якісно пояснити механізм герметизації в такий спосіб.

Ущільнювальні елементи, виготовлені з ПТФЕ або ПКМ на основі ПТФЕ, вільні від цього недоліку. Сила тертя ПТФЕ з металевим контртілом також визначається пружнопластичним деформуванням поверхневого шару, оскільки

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

область пружних деформацій ПТФЕ невелика, та формуванням зв'язків з металевою поверхнею. Сила тертя в момент макрозміщення визначається розривом міжмолекулярних зв'язків, які значно менші за внутрішні, і на металевій поверхні швидко формується тонка полімерна плівка фрикційного переносу з частинок ПТФЕ. Тому подальше тертя здійснюється між двома полімерними поверхнями, сили взаємодії між якими невеликі, тому що макромолекули політетрафторетилену дуже стійкі та практичні не мають вільних хімічних зв'язків. У роботі [44] показано, що в процесі тертя можливе утворення впорядкованої шаруватої структури типу термотропних рідких кристалів, які сприяють значного зниження сили тертя (коефіцієнт тертя трохи більше 0,05) і інтенсивності зношування. При пусках після перерви в роботі сила тертя практично не збільшується, що особливо важливо для ущільнювальних елементів маточин підтримуючих ковзенок ходової частини після тривалої стоянки (зберігання) машин.

#### **4.3 Розробка конструкції герметизуючого пристрою підтримуючого катка**

При розробці герметизуючого пристрою підтримуючого катка ходової частини в якості прототипу використовували конструктивну схему ГУ осі опорного катка БГМ. З метою забезпечення взаємозамінності розроблюваного ГУ і серійних герметизуючих пристроїв, а також замість одного ущільнювального елемента встановлюються три з метою підвищення надійності пристрою.

Для визначення величини контактної тиску ущільнюючого елемента на ущільнювану поверхню кронштейна підтримуючого катка проведено аналіз кінематики руху деталей, що беруть участь у перетворенні руху та передачі зусиль між елементами конструкції катка, що підтримує. Для визначення положення точок верхньої гілки гусениці, що рухається, що лежить на

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						70
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

підтримуючих катках, (рисунок 4.2)

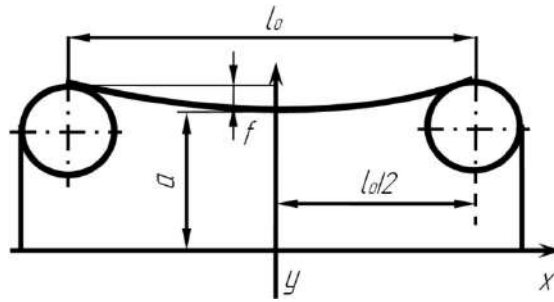


Рисунок 4.2 - Розрахункова схема натягу гусениці

Силу натягу гнучкої стрічки можна визначити, використовуючи схему сил, що діють на каток, що підтримує (рис. 4.3).

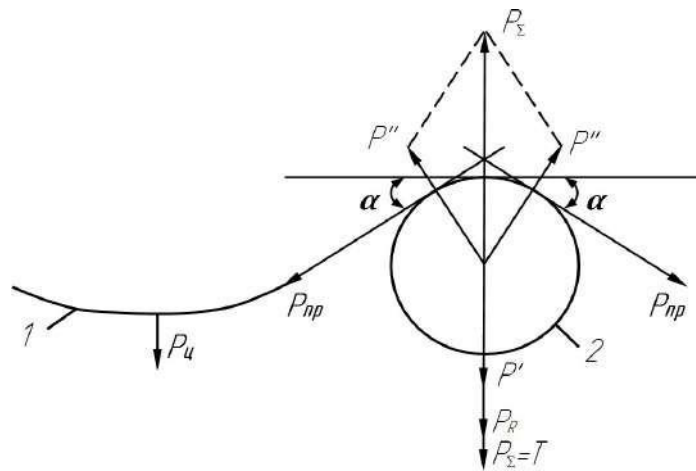


Рисунок 4.3 - Схема сил, що діють на каток, що підтримує: 1 – гусениця; 2 - підтримуючий каток

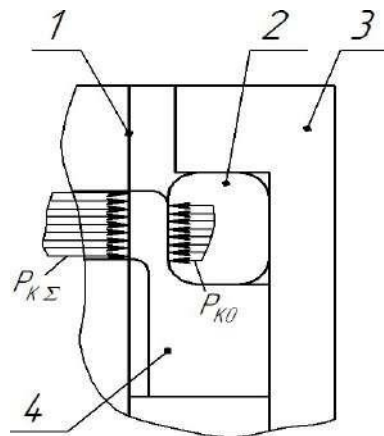


Рисунок 4.4 - Розрахункова схема ущільнювального елемента підтримуючого катка: 1 – поверхня валу, що ущільнюється; 2 – силовий елемент (гумова

кільце); 3 – корпус ГУ; 4 – ущільнюючий елемент;  $P_{k\Sigma}$  – тиск, створюваний ущільнюючим елементом;  $P_{k0}$  – тиск, створюваний силовим елементом

Отже, для забезпечення герметичності відносна деформація силового елемента – гумового кільця має бути в межах 0,1-0,11. Задану величину відносної деформації одержуємо, для визначення висоти кільця  $H$  у деформованому стані після складання вузла ущільнення:

$$H = 5,0 - 0,1 \cdot 0,5 = 4,95 \text{ мм.}$$

Для забезпечення герметичності висота  $H$  кільця у зібраному вузлі має бути не більше 4,95 мм.

Таким чином, умови забезпечення герметичності визначені основні конструктивні параметри деталей ущільнення з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів деталей герметизуючого пристрою.

У цьому розрахунку контактного тиску використані аналітичні вирази з деякими припущеннями та обмеженнями. Вони цілком прийнятні при розрахунку нерухомого поєднання гумового кільця з металевими деталями. У комбінованому ущільненні, що розробляється, це поєднання гумового кільця з поверхнями корпусу ущільнення з одного боку і з внутрішніми поверхнями полімерного ущільнювального елемента - манжети, з іншого боку.

Розмір відносної деформації при  $P_{k0}=1,2\text{МПа}$ , визначена по номограмі (рис. 4.6), становить 10%.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

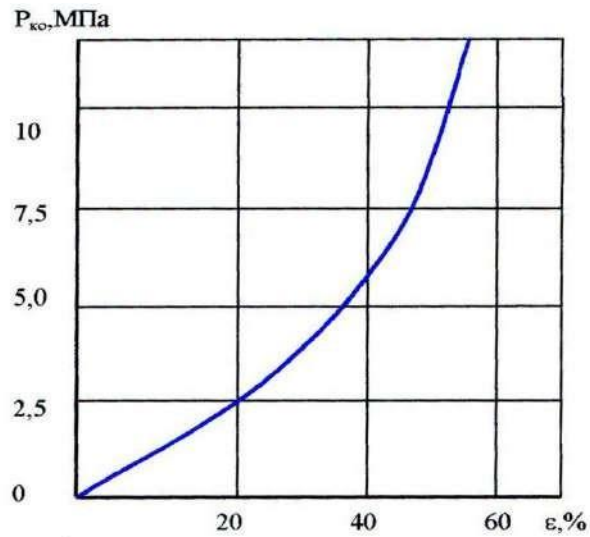


Рисунок 4.6 – Залежність середнього контактного тиску від відносної деформації стиснення

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 4.4) з урахуванням певних значень тисків ( $P_k$  і  $P_{ко}$ ) та величини необхідної деформації силового елемента гумового кільця спроектований ущільнювальний елемент ГУ, що розробляється (рис. 4.7).

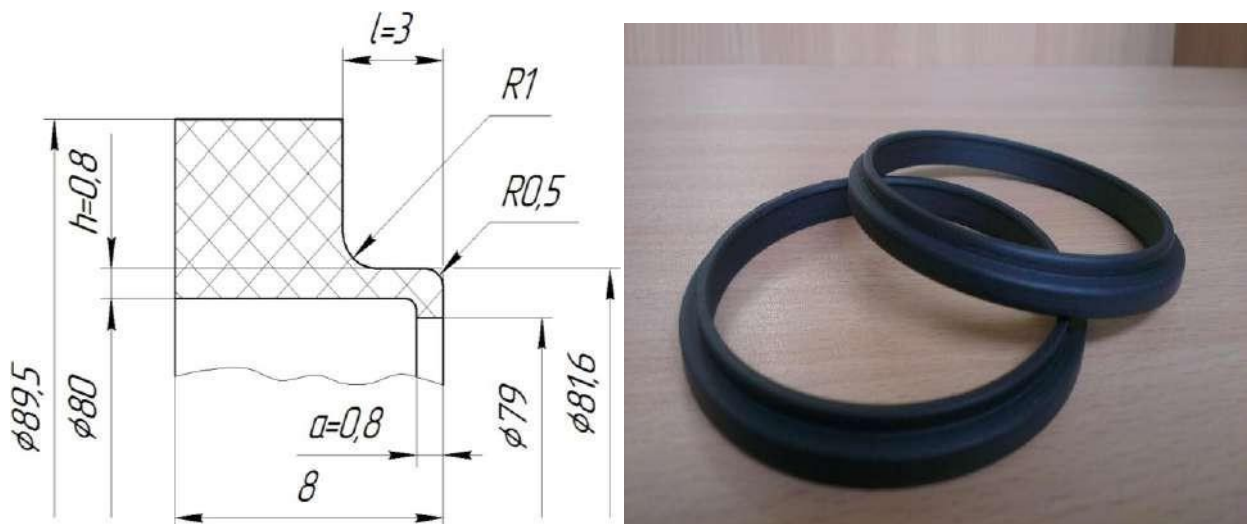


Рисунок 4.7 - Ущільнювальний елемент (манжета) герметизуючого пристрою, що підтримує катки

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Геометричні розміри ущільнювального елемента задані також з урахуванням взаємозамінності ГУ, що розробляється, з серійними ущільненнями осі підтримуючої ковзанки.

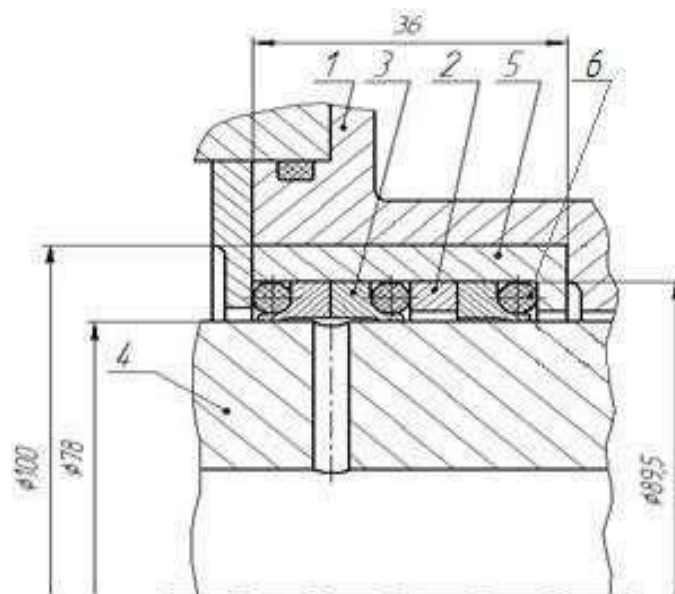


Рисунок 4.8 - Герметизуючий пристрій багатоколевих гусеничних машин, що підтримує катки:

1-кришка; 2-кільце розпірне; 3-манжета; 4-вал (кронштейн); 5-стакан; 6-силовий елемент

Герметизуючий пристрій осі підтримуючої катки у зборі показано на рис. 4.8. Воно складається з трьох манжет ущільнювачів з розробленого полімерного нанокompозиту, що забезпечують надійний захист від проникнення забруднень з навколишнього середовища, а також захист від витоків мастила з підшипникового вузла. Ущільнюючі губки манжет притискаються до поверхні валу, що ущільнюється, силовими елементами (гумові кільця круглого перерізу).

#### 4.4 Лабораторне випробування герметизуючого пристрою

Випробування ГУ з метою перевірки його працездатності проводили на

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

установці, яка обладнана на базі токарного верстата. Ступиця підтримуючого катка закріплюється в патроні токарного верстата і підтискається упором задньої бабки відповідно до схеми установки (рис.4.9). Зовнішній вигляд установки показано рис. 4.10.

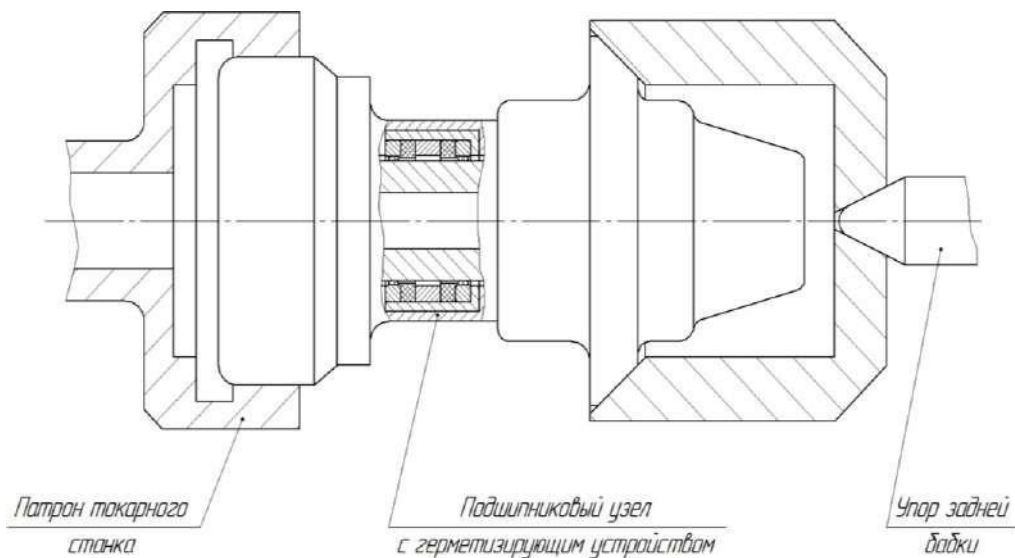


Рисунок 4.9 – Схема установки для випробування ГУ



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд установки для випробування ГУ

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Порядок підготовки, складання та встановлення ГУ:

1. Ущільнюючі манжети витримуються в термошафі при температурі 50...60 °С протягом 30 хвилин з метою випаровування вологи та зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,1мг.

2. Вимірюється внутрішній діаметр манжет по губках, що ущільнюють, з точністю до 1 мкм у двох взаємно перпендикулярних напрямках і визначається усереднене значення діаметра ущільнюючих губок.

3. Манжети встановлюються у стакан відповідно до складального креслення із забезпеченням занурення торця розпирного кільця щодо торця стакана трохи більше 0,2мм.

4. Стакан з манжетами монтується в кришку маточини і встановлюється на вал маточини після попереднього вимірювання його діаметра і шорсткості робочої поверхні в зонах контакту з манжетами.

5. У корпус маточини встановлюються підшипники кочення, заповнюється мастилом відповідно до ТУ і закривається кришкою.

Згідно з методикою (гл. 2), випробування проводиться циклами з чергуванням режимної роботи та зупинок. Тривалість безперервної роботи у циклі становить 120 хвилин при частоті обертання приводу 600 хв<sup>-1</sup>. Тривалість перерви у роботі 12...20 хв., щонайменше. Тривалість випробувань 180 годин, що відповідає 5500 км. пробігу БГМ.

У процесі випробувань контролюється температура мастила та температура корпусу (стакану) ущільнювальних манжет. Вимірювання із записом у журналі випробувань проводяться через кожні 30 хв роботи, перед початком випробувань та при їх закінченні.

Після закінчення випробувань і після кожних 40 годин зважувати комплект ущільнювальних манжет у склянці. Перед зважуванням, ущільнюючі манжети разом зі склянкою помістити в шафу, витримати при температурі 60 °С протягом 30 хв і зважувати на аналітичних вагах. Після зважування

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводиться вимірювання діаметра робочих поверхонь ущільнюючих губок. Результати вимірювань заносяться до робочого журналу. Визначаються середні значення та зміни розмірів у процесі випробування. За результатами вимірів побудовано графік залежності діаметрального зносу манжет від тривалості роботи герметизуючого пристрою (рис. 4.11). З графіка видно, що після 40 год роботи залежність зносу від часу стає практично лінійною та пропорційною тривалості випробування зі швидкістю, що дорівнює  $2,5 \cdot 10^{-6}$  м/годину.

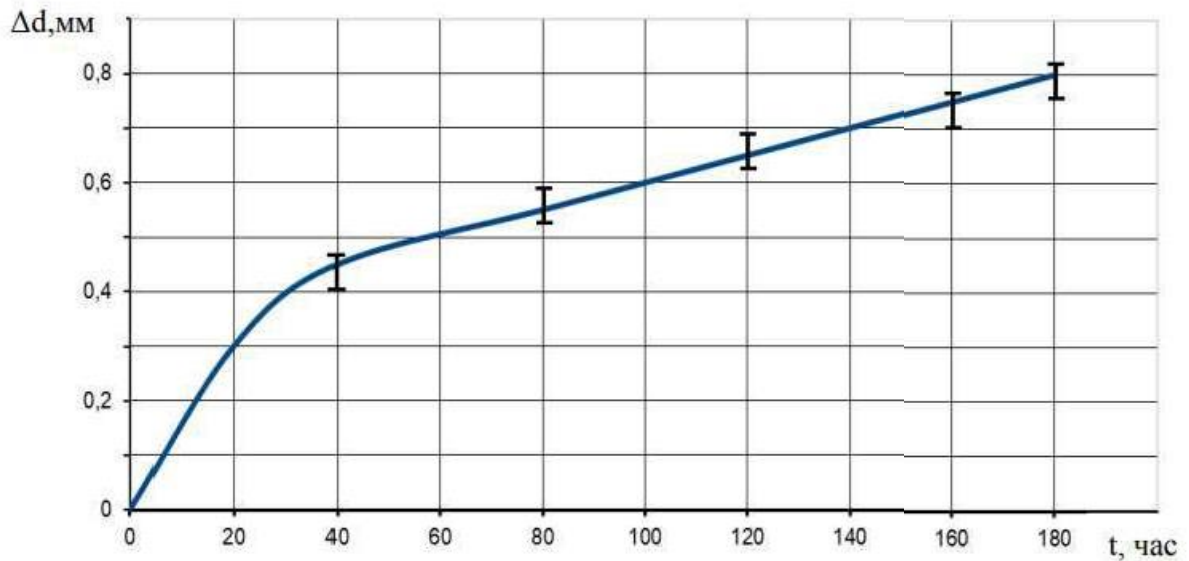


Рисунок 4.11 - Залежність величини зношування ущільнювального елемента  $\Delta d$  від часу роботи ГУ

Аналіз отриманих значень показує наявність періоду опрацювання в перші 40 годин. При цьому величина зносу в період приробітку співрівняна з величиною зносу протягом наступних годин проведення випробування. Після закінчення приробітку зношування йде практично з постійною швидкістю. Максимальний знос при швидкості ковзання 2,5 м/с за 180 годин випробувань, з урахуванням зносу в період опрацювання становив 0,8 мм, при гранично допустимому діаметральному зносі 0,9 мм. Зміна даного параметра має визначальне значення для забезпечення герметичності рухомого з'єднання, оскільки визначає величину натягу та контактного тиску на поверхні, що

									Арк.
									77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>				

ущільнюється.

Інтенсивність зношування кілець визначали як відношення лінійного зносу після завершення опрацювання до шляху тертя ( $55 \cdot 105$  м). Результати проведених випробувань показали, що інтенсивність зношування становить  $4 \cdot 10^{-10}$  за 180 годин стендових випробувань при частоті обертання приводу 600 об/хв та швидкості ковзання 2,5 м/с при частоті обертання 600 об/хв відповідає пробігу машини 5500 км зі швидкістю 30 км/год. Отже, розроблена конструкція ГУ з манжетами ущільнювачів з нового нанокompозиту на основі ПТФЕ забезпечує надійну роботу ущільнень підтримуючих катків протягом пробігу машини більше 5500 км, що відповідає міжремонтному ресурсу машин даного типу.

### **Висновки**

1. На підставі розрахунку контактних тисків в ущільненні підтримуючих котків з урахуванням пружних сил при деформації та силового елемента, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов роботи та особливості конструкції пристрою, визначено основні конструктивні параметри та розроблено конструкцію комбінованого металополімерного герметизуючого пристрою підтримуючої ковзанки.

2. Лабораторні прискорені випробування герметизуючих пристроїв з імітацією умов експлуатації дозволили визначити характеристики швидкості та інтенсивності зношування ущільнювальних манжет та прогнозувати ресурс (термін служби) розробленого герметизуючого пристрою.

3. Результати стендових випробувань показали значне підвищення працездатності та довговічності, що дозволяє забезпечити надійність роботи ущільнень підтримуючих ковзанонок машин при пробігу більш встановленого терміну експлуатації.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. На основі аналізу несправностей та відмов герметизуючих пристроїв маточин підтримуючих та опорних катків ходової частини БГМ в умовах експлуатації, що визначають ймовірність безвідмовної роботи серійної конструкції ущільнень, встановлені фізичні причини відмов та визначені шляхи підвищення надійності та ресурсу герметизуючих пристроїв підтримуючих катків.

2. Здійснено обґрунтований вибір полімерної основи і створено новий полімерний наноккомпозит на основі політетрафторетилену, що відповідають вимогам до матеріалів ущільнюючих елементів герметизуючих пристроїв, визначено оптимальну концентрацію наповнювачів-модифікаторів.

3. Методами рентгеноструктурного аналізу, міцнісних та триботехнічних випробувань вивчено вплив компонентів комплексного наповнювача на структуру та властивості модифікованого ПТФЕ, отримано концентраційні залежності параметрів надмолекулярної структури (ступінь кристалічності, розмір кристалітів) та триботехнічних властивостей розробленого наноккомпозиту.

4. Розроблено та випробувано нову конструкцію герметизуючого пристрою маточини підтримуючої ковзанки, що містить ущільнювальні елементи з розробленого композиційного матеріалу та силові елементи.

5. Розроблено установку та методику стендових випробувань герметизуючих пристроїв, що забезпечують імітацію експлуатаційних умов роботи ущільнень та отримання кількісних оцінок зносостійкості та ресурсу ущільнень маточини підтримуючої катки.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барновський В.М. Сучасні методи дослідження полімерних матеріалів: експериментальні методи дослідження структури, теплофізичних властивостей та газовиділення полімерних матеріалів: Навчальний посібник / за ред О.М. Задоріна. // Барновський В.М., Задоріна О.М., Крутілін В.М. - Харків.: Вид-во МАІ, 1993. - 64 с.
2. Бартенєв Г.М. Релаксаційні властивості полімерів./Г.М. Бартенєв, А.Г. Бартенєва – Харків.: Хімія, 1992. – 384 с.
3. Бартенєв Г.М. Курс фізики полімерів./Г.М. Бартенєв, Ю.В. Зеленьов. - Київ: Хімія, 1976. - 288 с.
4. Бартенєв Г.М. Фізика та механіка полімерів. / Г.М. Бартенєв, Ю.В. Зеленьов. - Харків: Вища школа, 1983. - 391 с.
5. Бартенєв Г.М., Лаврентьєв В.В. Тертя та знос полімерів. - Київ.: Хімія, 1972. - 240с.
6. Білий В.А. Тертя та знос матеріалів на основі полімерів / В.А. Білий, А.І. Свіріденок, М.І. Петраковець та ін. – Харків: Наука та техніка, 1976. – 430 с.
7. Брандон Д. Мікроструктура матеріалів. Методи дослідження та контролю. / Д. Брандон, У. Каплан. - Харків: Техносфера, 2004. - 384 с.
8. Виноградов О.В. Зносостійкість дисперснонаповненого політетрафторетилену та критичні концентрації ультрадисперсного наповнювача / О.В. Виноградов, А.А. Охлопкова // Тертя та знос. -1995. - Т.16 - № 5. - С. 931-937.
9. Вундерлі Б. Фізика макромолекул. Т. 1. Кристалічна структура, морфологія, дефекти. / Пер. з англ. Ю.К. Годовського та В.С. Папкова. - Харків: Мир, 1976. - 624 с.
10. Гладенко А.А., Зябліков В.С., Калістратова Л.Ф та ін. Структурна модифікація матеріалів металополімерних систем // Тертя та знос, т. 19, № 4,

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1998, С. 523-528

11. Коршак В.В. Технологія пластичних мас.- Київ: Хімія, 1976. - 608 с.
12. Гоулдстейн Дж. Ростова електронна мікроскопія та рентгенівський мікроаналіз. / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбері, П. Ечлін та ін. -: Світ, 1984. Кн.1 - 303 с.
13. Гуль В.Є. Структура та механічні властивості полімерів. / В.Є. Гуль, В.М. Кулезньов - Київ.: Вищ. Школа, 1979. - 352 с.
14. Єлецький А.Б. Механічні властивості вуглецевих наноструктур та матеріалів на їх основі // Успіхи фізичних наук. - 2007.-т.177. - №3. - С.233-274.
15. Журавльов В.А. Термодинаміка незворотних процесів. - Харків.: Хімія, 1972. - 240 с.
16. Істомін Н.П., Семенов А.П. Антифрикційні властивості композиційних матеріалів на основі фторполімерів. - Київ: Наука, 1981. - 146 с.
17. Каргін В.А. Про зародковий механізм дії твердих частинок в полімерах, що кристалізуються / В.А. Каргін, Т.І. Соколова, Т.К. Шапошникова // Високомоол. з'єдн. – 1965. – Т. 7 – № 3. – С. 385-388.
18. Кербер М.Л. Полімерні композиційні матеріали: структура, властивості, технологія: навчальний посібник. / М.Л. Кербер, В.М. Виноградів, Г.С. Головкін та ін. // Під ред А.А. Берлін. - СПб.: Професія. - 2008. - 560 с.
19. Кондаков Л.А. Робочі рідини та ущільнення гідравлічних систем. / Л.А. Кондаків. - Харків: Машинобудування. 1982. - 216 с.
20. Кондаков Л.А. Ущільнення та ущільнювальна техніка. Довідник. / Л. А. Кондаков, А.І. Голубєв та ін. - Київ: Машинобудування. 1994. - 448с.
21. Коршак В. В. Технологія пластичних мас.- Харків: Хімія, 1976. - 608 с.
22. Кропотін О.В. Розробка полімерних композитів триботехнічного призначення із мікророзмірними модифікаторами / О.В. Кропотін, Ю.К. Машков, В.А. Єгорова, О.А. Кургузова // науковий вісник. – 2013. № 2, – С. 92-94.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Кропотін О.В. Створення полімерного антифрикційного нанокompозиту на основі політетрафторетилену з підвищеною зносостійкістю / О.В. Кропотін, Ю.К. Машков, О.А. Кургузова // науковий вісник. – 2013. № 2, – С. 86-90.

24. Ліпатов Ю.С. Фізико-хімічні основи заповнення полімерів. - Харків: Хімія, 1991. - 260 с.

25. Ліпатов Ю.С. В'язкопружність полімерних композитів, що містять дисперсні та волокнисті наповнювачі // Механіка композитних матеріалів. – 1980. – №5. – С. 808-822.

26. Ліпатов Ю.С. Міжфазні явища у полімерах. – Київ: Наук. думка, 1980. - 260 с.

27. Ліпатов Ю.С. Методика дослідження в'язкопружних властивостей гетерогенних полімерних систем / Ю.С. Ліпатов, В.Б. Росовицький, В.Ф. Бабич// Нові методи дослідження полімерів. – Київ: Наук. думка, 1975. - С. 106-118.

28. Ліпатов Ю.С., Шилов В.В. та ін. Рентгенографічні методи вивчення полімерних систем. - Київ: Наук. Думка, 1982. – 296 с.

29. Мамаєв О.А. Розробка та дослідження полімерних композиційних матеріалів для ущільнювальних елементів герметизуючих пристроїв транспортних машин/ О.О. Мамаєв, Ю.К. Машков, Л.Ф. Калістратова, Р.І. Косаренко// науковий вісник. - 2007. №2, - С. 88-93.

30. Маріхін В.А. Надмолекулярна структура полімерів. / В.А. Маріхін, Л.П. М'ясників – Харків.: Хімія, 1977. – 240 с.

31. Марков О.В. Принципи вибору полімерних матеріалів виготовлення виробів. / А.В. Марков, С.В. Власов// Полімерні матеріали. Вироби. Устаткування. Технології. - 2004 - № 6-8 - С. 17-19; 26, 28, 29; 20.

32. Міркін Л.І. Довідник з рентгеноструктурного аналізу полікристалів. - Харків.: Фізматгіз, 1961. - 863 с.

33. Машков Ю.К. Композиційні матеріали на основі

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

політетрафторетилену. Структурна модифікація. / Ю.К. Машков, З.М. Овчар, В.І. Суріков та ін. – Харків.: Машинобудування, 2005. – 240 с.

34. Машков Ю.К. Полімерні композиційні матеріали у триботехніці. / Ю.К. Машков, З.Н.Овчар, М.Ю. Байбарацька, О.А. Мамаєв. - Київ: Надра. - 2004. - 262 с.

35. Машков Ю.К. Структура та зносостійкість модифікованого політетрафторетилену / Ю.К. Машков, Л.Ф. Калістратова, З.М. Вівчар. - Наук. вид. – Вид-во ОДТУ, 1998. – 144 с.

36. Машков Ю.К., Калістратова Л.Ф., Овчар З.М. Структура та зносостійкість модифікованого політетрафторетилену. -: Вид-во ОДТУ, 1998. - 144 с.

37. Машков Ю.К. Структура та зносостійкість модифікованого політетрафторетилену / Ю.К. Машков, Л.Ф. Калістратова, З.М. Овчар.-: Вид-во ОДТУ, 1998.-144 с.

38. Машков Ю.К., Калістрова А.Ф., Мамаєв О.А. та ін Підвищення експлуатаційних властивостей кополімерів на основі ПТФЕ. Частина 1. Вплив складу наповнювачів на структуру та властивості композитів // Тертя та знос.- 2002.т.23, №3.- С.181-187.

39. Міркін Л.І. Довідник з рентгеноструктурного аналізу полікристалів. - Харків.: Фізматгіз, 1961. - 863 с.

40. Михайлин Ю.А. Фторопласти// Полімерні матеріали. Вироби. Устаткування. Технології. – 2004. – № 2(57). – С.24-27.

41. Михайлин Ю.А. Термостійкі полімери та полімерні матеріали. - СПб.: Професія, 2006. - 624 с.

42. Моделювання контактної взаємодії елементів системи «наповнювач - полімер» за різних умов термообробки композиційного матеріалу / Ю. К. Машков [та ін.] // Матеріалознавство. -2008. - №6. - С. 13-20.

43. Метьюз Ф. Композитні матеріали. Механіка та технологія. / Ф.Метьюз, Р.Ролінгс. - Харків: Техносфера, 2004. - 408 с.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

44. Наповнювачі для композиційних полімерних матеріалів. Довідковий посібник/За ред. Г.С. Каца та Д.В. Мілевський: пров. з англ. за ред. П.Г. Бабаєвського. - Київ: Хімія, 1981. - 736 с.

45. Охлопкова А.А., Летрова П.М., Гогольова О.В., Федоров А.Л. Фторполімерні композити триботехнічного призначення // Тертя та знос, Т.28, №6, 2007. - С. 627-633

46. Охлопкова А.А. Трибологічні та механічні характеристики модифікованого політетрафторетилену/А.А.Охлопкова, Т.М. Сидоренко, О.В. Виноградів // Тертя та знос. – 1996. – Т.17 – №4 – С. 550-553.

47. Паншін Ю.А. Фторопласти/Ю.А. Паншін, С.Г. Малкевич, У.С. Дунаєвська. - Харків.: Хімія, 1978. - 230 с.

48. Перепічко І.І. Акустичні методи дослідження полімерів - Київ: Хімія, 1973. - 296 с.

49. Перепічко І.І. Введення у фізику полімерів. - Київ.: Хімія, 1978. 544 с.

50. Привалка В.П. Плавлення та кристалізація наповнених полімерів // Фізикохімія багатокомпонентних полімерних систем: У 2 т. / Т. 1: Наповнені полімери. – Київ: Наук. думка, 1986. - С. 106-129.

51. Пугачов А.К., Росляков О.А. Переробка фторопластів у виробі. Технологія та обладнання. – Харків.: Хімія, 1987. – 168 с.

52. Релаксаційні явища у полімерах / За ред. Г.М. Бартенєва та Ю.В. Зеленьова. - Київ.: Хімія, 1972. - 376 с.

53. Соломко В.П. Наповнені полімери, що кристалізуються. – Київ: Наук. думка, 1980. – 264 с.

54. Тертя та модифікація матеріалів трибосистем/Ю.К. Машков, К.М. Полещенко, С.М. Поворознюк, П.В. Орлов.- Київ.: Наука, 2000. - 280с.

55. Феррі Дж. В'язкопружні властивості полімерів: Пер. з англ. за ред. В.Є. Гуля. - Харків.: Іздатінліт, 1963. - 535 с.

56. Френкель С.Я. Проблема складання та деякі питання структурної механіки орієнтованих полімерних систем // За ред. Джейл Ф. Полімерні

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

монокристали. - Київ.: Хімія, 1968. - С. 524-542.

57. Чегода Д.Д. Фторопласти / Д.Д. Чегодаєв, З.К. Наумова, У.С. Дунаївська. - Харків.: Хімія, 1960. - 192 с.

58. Aderikha VN Effekct of filler surface properties на структурі, механічному і tribological behavior PTFE-carbon black composites / VNAderikha, VASharovalov // Wear. – 2010. – № 268. – P. 1455-1464.

59. Golchin A. Break-away friction з PTFE матеріалів в lubricated conditions / A. Golchin, GF Simmons, SBGlavatskih // Tribology International.

60. - 2012. - № 48. - P. 54-62.

61. Mashkov Yu. K. Multilevel структурна зміна полімерного композиційного матеріалу в synthesis and frictional loading /Yu. K. Mashkov, VI Surikov, LF Kalistratova // Abstracts VI International Conference «Computer-Aided of Design of Advanced Materials and Technologies».- Tomsk: ISP @ MSSB of Russian Academy of Sciences. – 2001. – P. 67-68.

62. McCrum NG low temperature transition in polytetrafluoroethylene

63. // J. Polimer Sci. – 1958. – V.27. – P. 555-597.

64. McCrum NG An internal friction study of polytetrafluoroethylene // J. Polimer Sci.- 1959. - V.34. – P. 355-369.

65. Stan F. Study of stress relaxation в polyteyrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation / F.Stan, C.Fetecau // Composites. - 2013/ - № 47.

66. - Part B. - P. 298-307.

67. Wang C. Polymers містить fullerene або карбона нанотубні структури /

68. C. Wang [et. al.] // Progress in Polymer Science. - 2004. - № 29. - P. 1079-1141.

					<i>МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ</i>	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					МРТАМ 24. 23469. 000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		