

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Теплофізичні властивості та зносостійкість композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів

Рівень вищої освіти бакалавр
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
Освітня програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр КРБМТВАТАМ 25.22156.000.ПЗ

Виконав студент 3-го курсу
група МТВАс 22-2
Шифр



Підпис

Вадим МАМЧУР
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н., доц.
Науковий ступінь, звання



Підпис

Владислав СВИДЕРСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва



Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 6.06.2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

6 06 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Мамчура Вадима Олеговича

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Термофізичні властивості та зносостійкість композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів»

керівник роботи Свідерський Владислав Петрович к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 7 лютого 2025р. № 23 (Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла дослідження; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт;

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

1. Аналіз застосування антифрикційних матеріалів на основі термостійких полімерів у вузлах тертя автомобілів.

2. Відпрацювання методики термофізичних та антифрикційних досліджень композиційних полімерних матеріалів.

3. Дослідження термофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів.

4. Встановлення кореляційного зв'язку між інтенсивністю зносу та коефіцієнтом теплопровідності композиційних полімерних матеріалів.

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Дата видачі завдання: 20.02. 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строки виконання	Примітка
1	Аналіз особливостей застосування антифрикційних матеріалів на основі термостійких полімерів в автомобільній техніці.	1.05.2025	
2	Відпрацювання методики теплофізичних та антифрикційних досліджень композиційних полімерних матеріалів.	15.05.2025	
3	Дослідження теплофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів.	25.05.2025	
4	Встановлення кореляційного зв'язку між інтенсивністю зносу та коефіцієнтом теплопровідності композиційних полімерних матеріалів.	1.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	2.06.2025	
6	Оформлення презентації бакалаврської роботи	5.06.2025	
7	Нормоконтроль бакалаврської роботи	9.06.2025	
8	Підписання розділів. Затвердження дати захисту	10.06.2025	

Студент

 Вадим МАМЧУР

Керівник роботи

 Владислав СВІДЕРСЬКИЙ

Кваліфікаційна бакалаврська робота студента групи МТВАс-22-1 Мамчура Вадима Олеговича на тему: «Теплофізичні властивості та зносостійкість композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів».

Обсяг роботи: 56 с., 5 табл., 7 рис., 15 джерел зі списку літератури, 1 додаток.

Метою роботи є дослідження теплофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 для вузлів тертя автомобільної техніки та встановлення кореляційного зв'язку між інтенсивністю зносу та коефіцієнтом теплопровідності цих матеріалів.

Об'єктом дослідження є технології дослідження теплофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 для вузлів тертя автомобільної техніки.

Виконано аналіз особливостей застосування антифрикційних матеріалів на основі термостійких полімерів в автомобільній техніці.

Відпрацьована методика теплофізичних та антифрикційних досліджень композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.

Досліджено теплоємність, теплопровідність та зносостійкість композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69. Встановлено, що теплоємність досліджуваних зразків полімерних композитів на основі ароматичного полііміду та графіту С-1 лінійно зростає із збільшенням температури, що є характерною особливістю лінійних полімерів і твердих колоїдних систем на їх основі. Результати досліджень показали, що під час введення в склад колоїдної системи графіту С-1, коефіцієнт теплопровідності спочатку лінійно зростає із збільшенням вмісту дисперсної фази (до 30% за масою), а потім при вмісті графіту С-1 більше 30 % за масою цей показник різко зростає, що можна пояснити утворенням теплопровідних каналів за даного вмісту графіту.

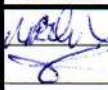



Отримано рівняння регресії, що відображає залежність інтенсивності зносу зразків з композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і графіту С-1 від коефіцієнта теплопровідності цих матеріалів. Застосовуючи дане рівняння, можна для досліджених композиційних матеріалів розрахувати інтенсивність зносу за відомого їх коефіцієнта теплопровідності.

Графічна частина представлена у вигляді презентації.

Ключові слова: ТЕПЛОЄМНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, КОМПОЗИЦІЙНИЙ ПОЛІМЕРНИЙ МАТЕРІАЛ, КОРЕЛЯЦІЙНИЙ ЗВ'ЯЗОК.

Зміст

Вступ.....	8
1 Антифрикційні матеріали на основі полімерів в автомобільній техніці.....	9
1.1 Аналіз особливостей застосування антифрикційних матеріалів на основі полімерів у вузлах тертя автомобілів.....	9
1.2 Основні зв'язники полімерних композиційних матеріалів.....	11
1.2.1 Смоли	11
1.2.2 Поліетилен, поліпропілен, полістирол, фторопласти, органічне скло ...	14
1.2.3 Поліаміди, полііміди, полівінілхлорид.....	16
1.3 Основні наповнювачі ПКМ, їх природа, особливості одержання та застосування.....	18
1.4 Формулювання завдання на дослідження теплофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів.....	27
2 Методика теплофізичних та антифрикційних досліджень полімерних матеріалів на основі термостійких полімерів.....	29
2.1 Теплова схема та принцип роботи приладу для вимірювання теплоємності ИТ-С-400.....	29
2.2 Теплова схема і принцип роботи вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400.....	31
2.3 Методика лабораторних випробувань зносостійкості пар тертя.....	36
3 Теплофізичні та антифрикційні дослідження композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.....	40
3.1 Аналітичний огляд літературних джерел по теплофізичних властивостях полімерних матеріалів.....	41
3.2 Результати експериментальних досліджень теплофізичних та антифрикційних властивостей полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.....	44

КРБМТВАТАМ.25.22156.000.ПЗ									
Зм.	Арк.	Надокум.	Підпис	Дата	Теплофізичні властивості та зносостійкість композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів	Літера	Аркуш	Аркушів	
Виконав		Мамчур В. О.		10.06.25		н		5	56
Перевірів		Свідерський В.П.		10.06.25					
Н.контр.		Бабак О.П.		10.06.25					
Затвер.		Диха О.В.		10.06.25					
						ХНУ, група МТВАс-22-1			

3.3 Встановлення кореляційного зв'язку між інтенсивністю зносу зразків з композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і графіту С-1 та коефіцієнтом теплопровідності.....48

Висновки.....53

Список використаних джерел.....54

ДОДАТКИ.....56

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Хімічною промисловістю виробляється багато різних полімерів. Проте, для застосування в автомобільній техніці найбільше відповідають вимогам матеріали на основі термостійких полімерів. Цим полімерам відповідають такі характеристики, як підвищена термостійкість та вогнестійкість, прекрасні механічні та діелектричні, антифрикційні та антиадгезійні властивості, а також достатня стійкість до хімічного впливу.

Крім цього, термостійкі полімери здатні зберігати перераховані характеристики при достатньо широкому діапазоні температур та тисків. Завдяки цим властивостям, деталі та вироби з термостійких полімерних матеріалів вирізняються підвищеною експлуатаційною надійністю, високим рівнем пожежної безпеки та тривалим терміном служби.

Поліімід ароматичний ПМ-69, застосовується у автомобілебудуванні для виготовлення деталей, які придатні як ущільнювальні, так і антифрикційні компоненти, які працюють без мащення у вузлах тертя [1].

Теплопровідність і теплоємність є одними з найважливіших характеристик складних колоїдних та дисперсних систем, виготовлених на основі полімерів. Знання про ці властивості матеріалів дає змогу обґрунтовано визначити сфери їх застосування в техніці та оптимальні температурні діапазони для експлуатації виробів із них.

На сьогоднішній день не існує єдиної та чіткої теорії, що пояснює теплопровідність і теплоємність не тільки твердих дисперсних систем на основі полімерних композиційних матеріалів, але й полімерів-матриць, які є твердим дисперсійним середовищем цих систем, зокрема гомополімерів. Це пояснюється особливостями молекулярної будови полімерів і структури твердих дисперсних систем на їх основі, значною різноманітністю структурних і фізико-хімічних перетворень, а також релаксаційною природою процесів, що в них відбуваються.

Відсутність теорії теплопровідності та теплоємності полімерів і дисперсних систем на їх основі ускладнює прогнозування теплофізичних властивостей нових полімерних матеріалів, що розробляються.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В таких умовах досить актуальними залишаються питання експериментального дослідження теплоємності і процесів теплопередачі, особливо теплопровідності в цілому у твердих дисперсних системах, у яких матриця полімерна є твердим середовищем дисперсним, а наповнювачами можуть бути волокна або порошки з твердою дисперсною фазою.

Вивчення та дослідження в повному обсязі цих процесів буде сприяти успішному рішенню поставленому перед науковцями актуального завдання у вирішенні теплофізичної проблеми полімерних композитів.

Все це сприяє, задовільненню потреби промисловості у плані паспортизації характеристик нових матеріалів, а також досягненню достатньої кількості експериментальних даних про теплофізичні характеристики винайдених нових полімерних композиційних матеріалів для застосування їх у вузлах тертя автомобілів [2].

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРІВ В АВТОМОБІЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ

1.1 Аналіз особливостей застосування антифрикційних матеріалів на основі полімерів у вузлах тертя автомобілів

Швидкий розвиток в наш час сучасної техніки неможливий без використання матеріалів, які характеризуються високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Досить важливе місце серед таких матеріалів займають композиційні полімерні матеріали, які застосовують як елементи різних виробів, деталей та конструкцій вузлів [1].

Композиційні полімерні матеріали є гетерофазними системами, що складаються із суцільної фази, такої, як матриця або зав'язуючий матеріал, що сприймає різні зовнішні навантаження та перерозподіляє ці навантаження на другу фазу, тобто на наповнювач. Безумовно, між фазами відбувається постійна взаємодія.

В композиційних полімерних матеріалах матрицею є синтетичні полімери, які є зв'язником композиції. Ефективність їх використання обумовлюється не тільки технологічними властивостями, а також досить специфічними властивостями такими, як теплостійкість та радіаційна стійкість, пружні та міцнісні характеристики та інші.

Із-за різноманітності властивостей та будови полімерних композицій їх класифікують за різними ознаками.

За основним складом ланцюга макромолекул полімери розділяють на:

- карболанцюгові, це такі, ланцюги макромолекул яких мають тільки атоми вуглецю;
- елементоланцюгові, у них в ланцюги макромолекул входять атоми алюмінію (Al), силіцію (Si), , нікелю (Ni), германію (Ge), титану (Ti), які не містяться у складі природних органічних сполук.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В залежності від зміни властивостей при нагрівання полімери ділять на дві групи: термопластичні та терморективні.

Що стосується термопластичних полімерів, то вони під час нагрівання розм'якшуються і стають еластичними, а при охолодженні навпаки тверднуть. Розм'якшення та затвердження може неодноразово повторюватись.

А терморективні полімери при нагріванні також розм'якшуються та тверднуть при охолодженні, але у випадку повторного нагрівання пом'якшення не відбувається. Терморективні полімери незворотно тверднуть.

Макромолекули полімерів за хімічним складом елементарних ланок можуть мати у складі різні функціональні групи, так як для їх синтезу застосовують органічні сполуки, яких молекули можуть мати подвійні зв'язки. У якості мономерів застосовують альдегіди, спирти, галогенопохідні та інші.

Побудова ланцюгів макромолекул полімерних сполук. Залежно від складу і молекул, а також Полімери можуть мати різну будову ланцюга. Це залежить від будови та складу вихідних мономерів, а також від методів та умов утворення макромолекул.

В об'ємі полімеру макромолекули розташовані хаотично, вони переплетені та вигнуті та являють собою складну просторову систему, яка має вигляд клубка сплутаних ниток. Це і приводить полімерний матеріал до високої механічної міцності, до еластичності та високої ударної в'язкості.

Властивості полімерів в основному залежать від структура макромолекул та їх взаємного розташування.

Полімери лінійні мають здатність розчинятись у деяких органічних розчинниках, утворюючи при цьому колоїдні розчини з різним ступенем в'язкості та текучості, який залежить від кількості розчинника. Пояснюється це здатністю ниткоподібних еластичних макромолекул полімерів від'єднуватись один від одного у розчиннику та створювати слабкішу систему сплутаних ниток.

В розгалужених полімерів здатність до розчинення знижується зі

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшенням кількості бічних ланцюгів.

Що стосується сітчастих полімерів, то вони не утворюють розчинів та здатні лише набухати і створювати драглисті системи.

У сітчастих та розгалужених полімерів система переплутаних молекул нагадує твердий каркас, який не може роз'єднатися у масі рідкого розчинника. Набухання полімеру проходить в результаті проникнення молекул розчинника між окремими ланцюгами, які є зв'язками в макромолекулах.

Полімери лінійні є термопластичні. Склоподібним називають твердий, жорсткий та пружний стан полімерів. При нагріві лінійні полімери переходять у розм'якшений стан. Високомолекулярні полімери не мають строго визначеної точки переходу з одного стану у інший. Перехід проходить у конкретному інтервалі температур, визначеному для кожної полімерної сполуки. Частіше всього, в результаті нагрівання речовина розм'якшується, а далі поступово переходить в еластичний стан, а потім у в'язко-текучий. При охолодженні полімеру зовнішні властивості змінюються в зворотньому напрямку.

Полімери сітчасті є термореактивними. У своїй масі є системою тісно зв'язаного каркасу з макромолекул, які не здатні до внутрішніх коливань. Тому вони розм'якшуються під час нагріву за вищих температур. Одночасно проходить подальше просторове з'єднання ланцюгів відгалужень, що обумовлює підвищення твердості каркасу. Ось чому, у випадку повторного нагрівання розгалужених та сітчастих полімерів, вони не переходять у еластичний та в'язко-текучий стан. Вони стають термостабільними.

1.2 Основні зв'язники полімерних композиційних матеріалів

1.2.1 Смоли

Епоксидні смоли. До епоксидних полімерів відносять велику групу високомолекулярних сполук, які утворюються при полімеризації

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

епіхлоргідрину, або дифенілпропану.

Ці створені речовини, які мають досить складну будову ланцюга, називають епоксидними смолами. Полімери епоксидні, одержані в результаті реакції полімеризації, є крихкими твердими речовинами, з невисокою молекулярною масою, температура розм'якшення їх усього 300–360 К. Епоксидні полімери добре розчиняються у органічних розчинниках таких, як ацетон, толуол та інші.

Що являють собою розчини епоксидних полімерів? Це в'язкі, тягучі речовини, які мають клеючі властивості. При введенні у епоксидні полімери ароматичних амінів, або фенолів чи двохосновних органічних кислот, вони зразу ж тверднуть і, відповідно, втрачають здатність плавитись при нагріванні, а також втрачають можливість розчинятися у органічних розчинниках та отримують комплекс зовсім нових фізичних властивостей.

В залежності від співвідношення у вихідній суміші полімеру та твердника, а також в залежності від хімічного складу та будови полімеру, затвердіння проходить за різних температур, від звичайної до 470 К. Відомі не менше десяти хімічних типів епоксидних смол, що тверднуть під дією різних твердників. Епоксидні полімери, які затверділи, мають деякі цінні властивості, а саме: високу стійкість до дії хімічних препаратів, малу щільність, а також чудову адгезію з поверхнями як неметалів, так і металів. Є ще одна перевага епоксидних полімерів – це здатність дуже добре з'єднуватись з другими полімерами, такими як фенолформальдегідними та доповнювати їх недостатні властивості своїми властивостями.

Фенолформальдегідні смоли. Фенол — це найпростіший представник ароматичних спиртів, який отримують сухою перегонкою вугілля, називають його ще карболовою кислотою. Фенол є кристалічною твердою речовиною, розчинний у воді та у багатьох органічних розчинниках. В результаті реакції формальдегіда з фенолом утворюється високомолекулярний полімер, це є реакція поліконденсації.

Склад елементів полімерного ланцюга відрізняється від складу мономерів

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початкової суміші, що є характерною особливістю полімерів, синтезованих методом поліконденсації. Реакція поліконденсації фенолу з формальдегідом відбувається в присутності каталізаторів, таких як кислоти або луги. В залежності від вмісту компонентів суміші та характеристики середовища отримують полімери, які досить відмінні за властивостями. Полімери, які одержали за допомогою кислот, є термопластичними, їх ще називають новолаком. Полімери, що одержані за наявності лугів, вважають термоактивними і їх назвали резолами.

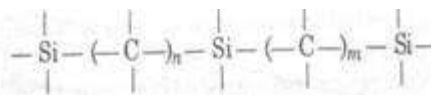
Фенолформальдегідні смоли проявляють досить високу механічну міцність, достатні електроізоляційні властивості, відзначаються антикорозійною стійкістю, мають коксове число 55 - 70 %.

Силіційорганічні смоли. Силіційорганічними полімерами вважають такі високомолекулярні сполуки, у елементарних ланках макромолекул яких розташовані атоми силіцію, які з'єднані з атомами кисню, деяких металів та вуглецю. Залежно від складу елементарних ланок макромолекул, силіційорганічні полімери поділяють на наступні групи.

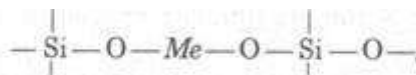
Полісиланові. Атоми кремнію утворюють основний ланцюг макромолекули.

Полісилоксанові. Основний ланцюг макромолекули утворений з атомів силіцію та кисню, які пропорційно чергуються з атомами силіцію.

Полікарбоксиланові. Основний ланцюг макромолекули утворюється із атомів силіцію та невеликих ланцюжків з вуглецевих атомів, які чергуються з ними.



Поліорганометалсилоксанові. Основний ланцюг макромолекули утворений із атомів силіцію, кисню та наступних металів: алюмінію, нікелю, титану, германію.



					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Велика різноманітність будови та складу елементарних ланок макромолекул силіційорганічних полімерів забезпечує досить широкий діапазон механічних, фізичних та хімічних властивостей даних сполук. Особливістю усіх силіційорганічних сполук вважають їх високу теплостійкість, морозостійкість, задовільні діелектричні властивості та адгезійну здатність.

1.2.2 Поліетилен, поліпропілен, полістирол, фторопласти, органічне скло

Поліетилен. Найпростішою органічною ненасиченою сполукою з одним подвійним зв'язком у молекулі є етилен ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$).

Інші органічні сполуки гомологічного ряду етилену та ненасичені сполуки з одним подвійним зв'язком в молекулі розглядають, як похідні етилену, так як сполуки, які отримані заміщенням від одного до чотирьох атомів водню у молекулі етилену на інші атоми або групи атомів, тобто радикали.

Поліетилен отримують полімеризацією етиленового газу двома методами: при високому тиску – до 300 МПа, за температури біля 470 К та присутності кисню, як ініціатора реакції; при низькому тиску – 0,15-0,20 МПа, за температури біля 430 К та при наявності каталізаторів.

Поліетилен, одержаний за високого тиску, є досить твердим матеріалом білого кольору. Отриманий тонкою плівкою – прозорий. При температурі 380 К поліетилен розм'якшується та стає еластичним; при температурі нижче 250 К стає ламкий. Він має хороші діелектричні властивості, стійкий до хімічних сполук та характеризується низьким коефіцієнтом тертя.

Поліетилен, отриманий за низького тиску, буде менш еластичним, інколи навіть жорсткий, характеризується більшою міцністю, щільність та розм'якшується при вищій температурі.

Поліпропілен отримують із пропілену — газу, який є наступним після етилену членом гомологічного ряду етиленових вуглеводнів.

Поліпропілен подібний до поліетилену за фізичними властивостями, але

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відрізняється більшою міцністю, кращою еластичністю, плавиться при температурі 430 К, є водонепроникним, а також має низьку паро- та газопроникність. Отримана плівка з поліпропілену зовсім прозора.

Полістирол. Вихідною речовиною для отримання полімеру є стирол. Це безбарвна рідина, температура кипіння якої 420 К, розчинна у спирті, естері та інших органічних розчинниках.

В залежності від умов полімеризації можливе отримання полістиролу різної молекулярної маси від 50 000 до 300 000 вуглецевих одиниць, а це суттєво впливає на властивості одержаного полімеру. Полістирол – прозорий, дуже добре фарбується, характеризується достатньою міцністю, високою хімічною стійкістю, має добрі діелектричні властивості і, саме головне, відмічається підвищена вологостійкість.

Поліметилметакрилат, або органічне скло. Вихідною речовиною для отримання даного полімеру є ненасичена метакрилова кислота. При взаємодії з метанолом дана кислота перетворюється на речовину, яка вважається складним метиловим естером метилакрилової кислоти та має назву метилметакрилату.

Одержаний полімер є з високою ступінню прозорості, він є термопластичним і тому досить легко формується. Листовий матеріал застосовують як скло, яке називають органічним. Органічне скло не затримує ультрафіолетові промені, має добру адгезію та високу ударну в'язкість.

Фторопласт. Досить унікальні властивості має полімер фторопласт, який утворений фторопохідним етилену $F_2C=CF_2$. Особливі властивості цього полімеру завдяки наявності у молекулах мономеру фтору – елементу, який є найактивнішим з металів. Полімеризацію виконують при температурі не вище 360 К і за наявності розчину пероксиду водню.

Фторопласт є хімічно пасивний, на нього не впливають міцні луги та кислоти, найсильніші окисники не чинять на полімер хімічного впливу. До інших особливостей цього полімеру можна віднести наступні: досить висока термостійкість, підвищені електроізоляційні властивості, які дають можливість

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовувати його в установках, які працюють за високої напруги та на великих частотах [3].

1.2.3 Поліаміди, полііміди, полівінілхлорид

Поліаміди. До цих груп належать синтетичні полімери, в основний ланцюг макромолекул яких, окрім атомів вуглецю, входить група ($-\text{NH}-\text{CO}-$), відома як амідна група.

Поліаміди отримують шляхом реакцій поліконденсації складних органічних сполук. Будова макромолекул різних поліамідів характеризується чергуванням амідних угруповань з метиленовими групами атомів у ланцюгу.

Залежно від відносного вмісту амідних і метиленових угруповань у макромолекулах полімеру утворюються речовини, які загалом подібні за фізико-механічними та хімічними властивостями, проте відрізняються за деякими показниками, що визначають характеристики полімеру.

Коли більше метиленових груп, буде нижча температура плавлення поліаміду. Окрім того, поліаміди з непарною кількістю CH_2 -груп у ланці мають нижчу температуру плавлення у порівнянні з поліамідами з парною кількістю таких груп. Це пояснюється зигзагоподібною структурою поліамідного ланцюга, через яку при непарному числі CH_2 -груп лише половина NH -груп може створювати водневі зв'язки з групами $\text{C}=\text{O}$ сусідніх ланцюгів, що й спричиняє підвищення температури плавлення полімеру. В залежності від симетрії ланок та регулярності їхнього розміщення поліаміди можуть мати як аморфну так і кристалічну структури, ступінь кристалічності деяких поліамідів може досягати 40 – 60 відсотків.

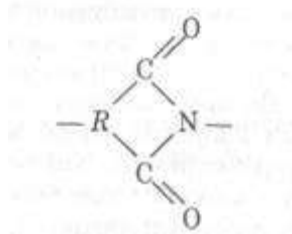
Особливими властивостями поліамідів є їх можливість, при продавлюванні у розплавленому стані крізь фільтри, діаметр яких від 0,06 до 0,1 мм, утворювати волокна, що мають досить високу міцність при розриві – до 6,3 ГПа та високу еластичність, великий коефіцієнт подовження та

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищену стійкість до зношування і стирання.

Поліаміди є твердими термопластичними полімерами жовтого-блідого кольору з досить високою температурою плавлення. Їх використовують як високоміцні матеріали у ракетній техніці.

Полііміди. Це термопластичні полімери, які в основному або бічному ланцюгу мають циклічну імідну групу:



Одержання поліімідних деталей відрізняється тим, що їх формують з поліамідокислоти, імідизація відбувається нагріванням або при дії дегідратуючих речовин у вже сформованому виробі. Пресувальні порошки формують способами прямого або автоклавного пресування, литтям під тиском, а також можливо гарячим пресуванням.

Механічні, фізичні характеристики імідних полімерів на протязі тривалого часу не міняються в широкому проміжку температур – від 70 до 570 К. Іміди володіють хорошими діелектричними властивостями, їм відповідає висока стабільністю розмірів, володіють низькою повзучістю та коефіцієнтом тертя, а також хімічно стійкі, мають високу термостійкість та стійкість до опромінення гамма-променями, швидкісними електронами і нейтронами.

Полівінілхлорид отримують полімеризацією хлористого вінілу, який перебуває у газоподібному стані і є монохлорозаміщеним етилену.

Виконують полімеризацію у водних емульсіях при температурі 310 К та тиску 0,5 МПа. Полівінілхлорид тяжко займається і має погану горючість, що вказує на наявність атомів хлору у макромолекулах полімеру. Проте полівінілхлорид є термопластичним, має високу межу міцності на розтяг, достатньо велику ударну в'язкість, а також підвищену хімічну стійкість.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліками вважають невисоку температуру розм'якшення -340 K та термічну нестійкість.

1.3 Основні наповнювачі ПКМ, їх природа, особливості одержання та застосування

Досить важливе місце у композиційних полімерних матеріалах займають наповнювачі, які поділяють на волокнисті та дисперсні.

Волокнисті наповнювачі — це армувальні хімічні волокна, які мають подовжену форму з поперечними розмірами від кількох до сотень мікрометрів. Промисловість виробляє як окремі волокна, так і волокна у вигляді філаментних або текстильних ниток з різноманітних матеріалів. До армувальних матеріалів пред'являють наступні вимоги: високий модуль пружності та висока міцність, підвищена тепло- та термостійкість, які мають забезпечуватись умовами отримання полімерного композиційного матеріалу, хороша адгезія та необхідна довговічність адгезійного контакту армувального волокна і зв'язника, а також достатня стійкість компонентів композиту до впливу експлуатаційних факторів.

Універсального одного наповнювача, який би міг повністю відповідати усім необхідним вимогам конструкторів, принципово неможливо одержати. Ось чому промисловістю випускається різноманітний асортимент армувальних волокон, характеристика деяких з них наведена в таблиці 1.1.

Зазвичай, в автомобілебудуванні застосовують анізотропні композиційні матеріали. Добре орієнтовані композити називають ортотропними.

Ортотропні – це полімерні матеріали, які відзначаються наявністю у елементарному об'ємі трьох взаємно перпендикулярних симетричних площин властивостей. Такими полімерами вважають композиційні матеріали, які армовані волокнами з поперечно-подовжнім укладанням.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Таблиця 1.1 – Фізико – хімічні властивості волокон

Тип волокна	Щільність, кг/м ³	Міцність на розтяг, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Поліефірне	1,39	0,9–1,3	4,3–16
Полівінілспитове	1,33	1,3–2,8	3,7–40
Карболоанцюгове	0,93–0,97	0,8–3,1	15–107
Арамідне	1,5–1,49	2,1–4,5	110–150
Поліамідне	1,4–1,6	0,9–2,0	40–50
Вуглецеве	1,8–2,8	2,0–3,6	250–610

Органічне волокно. Процес отримання волокон розділяють на дві стадії: перша стадія – синтезу поліамідів, друга – безпосередньо формування волокон. Суть синтезу поліамідів полягає у поліконденсації при низьких температурах хлорангідридів ароматичних дикарбонових кислот та ароматичних діамінів. Далі отриманий продукт пропускають через фільтри зі швидкістю 60 м/с, витягуючи потрібні поліамідні волокна. Відомі інші способи отримання органічних волокон, але вони менш поширені та використовуються дуже рідко. Наповнювач у вигляді волокна може бути самої різної текстильної переробки: у вигляді ниток, волокон, джгута.

В результаті низької щільності поліамідного волокна за питомою міцністю та модулем пружності при розтягу органічні поліамідні волокна перевершують всі, досліджені на сьогоднішній день армувальні волокна та сплави. Поступаються вони за показниками при розтягу лише вуглецевим та борним волокнам.

Ці властивості органічних волокон дають можливість вважати їх високо модульними та високоміцними. Міцність досягає 4,5 ГПа, а модуль пружності витримує до 160 ГПа. Високоміцні органічні волокна відрізняються виразною анізотропією своїх пружних і міцнісних властивостей. Це зумовлено їхньою будовою, яка представляє собою щільноупаковані надмолекулярні утворення,

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

втягнуті вздовж осі у формі фібрил, поперечні розміри яких варіують від $5 \cdot 10^{-9}$ до $4,5 \cdot 10^{-8}$ м.

Фібрили складаються з лінійних макромолекул, довжина статистичного сегмента Куна яких становить від $5,5 \cdot 10^{-8}$ до $4,5 \cdot 10^{-7}$ м. Ці макромолекули з'єднані між собою відносно слабкими водневими і ван-дер-ваальсовими силами. Взаємодія між самими фібрилами ще слабкіша, оскільки більшість водневих зв'язків утворюються всередині фібрил.

Ця особливість обумовлює загальний недолік високоорієнтованих волокон — низьку поперечну міцність. Тому пружні та міцнісні властивості полімерних композитних матеріалів (ПКМ), армованих волокнами в напрямку, що не збігається з віссю волокна, в основному залежать від властивостей зв'язуючої речовини та сили адгезійної взаємодії.

В даний час для деталей та вузлів ракетної техніки вважають найперспективнішим застосування органічних волокон типу Терлон, Кевлар, СВМ та Армос.

У таблиці 1.2 приведені фізико-механічні характеристики основних видів амідних волокон у порівнянні з характеристиками типових конструкційних сталей, а в таблиці 1.3 – вітчизняних арамідних армувальних волокон.

Хімічний склад терлону – поліфенілентерефталімід (ПФТА). Волокна ПФТА мають строго виражену фібрилярну структуру та високий понад 65 відсотків ступінь кристалічності.

Волокно СВМ за хімічним складом являються поліамідбензімідазолом (ПАБІ). Рентгенографічними дослідженнями вченими було встановлено далекий порядок вздовж осі волокна. Це свідчить про наявність кристалічної структури у цьому напрямку.

У радіальному ж напрямку волокон порядок не спостерігається. Слід відмітити, що у СВМ відсутні виражені ослаблені ділянки типу аморфних прошарків, цим і можна пояснити високу міцність даних волокон.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Фізико – механічні характеристики амідних волокон і сталі

Тип волокна	Щільність, $\rho \cdot 10^{-4}$ кг/м ³	Міцність на розтяг, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Армос 100А	1 (100)	3,36	123
СВМ	0,578	2,66	98
ВМН – 88	0,31	3,82	147
Армос Т – 58,8	0,578	3,57	123
ВМН – Н	0,589	4,03	133
Сталь	–	0,34	145

Таблиця 1.3 – Фізико – механічні характеристики вітчизняних арамідних армувальних волокон

Тип волокна	σ_{II} , ГПа	σ_I , ГПа	E_{II} , ГПа	E_I , ГПа	ϵ , %	T, К
Терлон	2,8–3,6	28–55	110–150	3,6–5,7	2,1–4,5	640–650
СВМ	3,9–4,32	37–58	135–145	4–6	2,7–4,2	520–540
Армос	4,7–5,3	–	147–165	–	2,6–3,7	–

Армос за хімічним складом вважають співполімером ПФТА та ПАБІ.

Скловолокно. Складні волокна широко використовуються при виготовленні полімерних композитних матеріалів, таких як склопластики.

Ці волокна при порівняно малій щільності мають достатньо високу міцність, низьку теплопровідність. Вони є теплостійкими, стійкими до хімічного та біологічного впливу.

Вихідними матеріалами для цих волокон слугують лужне алюмосилікатне або малолужне алюмоборосилікатне скло.

У таблицю 1.4 зведені фізико-механічні властивості армувальних скляних волокон, які використовують у автомобільній промисловості.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 1.4 – Фізико – механічні характеристики скляних волокон

Тип волокна	Щільність, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Міцність на розрив, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Е – скло	2,55	26	77
S – скло	2,48	4,57	86
ВМ – 1	2,57	4,3	94
Кислотостійке 7-А	2,55	3,7	73

До складу Е – скла входить 54,4% SiO₂, 14,4% Al₂O₃, 17,5 % Са, а решта все домішки. До складу S – скла входить 65% SiO₂, 25% Al₂O₃, 9% Mg та домішки, які підвищують міцність. До складу ВМ-1 скла для підвищення твердості вводять до 8% BeO.

Відомі три основних методи отримання скловолокон:

- витягування волокон із розплавленої маси крізь фільтри;
- витягування волокон зі скляних штабиків під час їх розігріву;
- отримання волокон розділом струменів скломаси під дією відцентрових сил потоку повітря, газу або пару.

За першими двома методами виготовляють безперервні волокна, за третім методом одержують волокна довжиною до 50 мм, які переробляють на тканину.

Найбільш поширена схема одержання безперервних скляних волокон діаметра 9-20 мкм методом витягування їх зі скляної маси. Висока міцність цих волокон залежить від технології їх отримання і пов'язана зі швидкістю механічного витягування розплаву скляної маси, що виходить з фільтр плавильної камери, та швидким охолодженням на повітрі струменів діаметром кілька мікрометрів. Теоретична міцність скловолоконна відповідає 10–12 ГПа, а практична міцність не перевищує навіть 5–6 ГПа. В пасмі волокна абразивно впливають одне на одного, частіше всього при збільшенні діаметра волокна, тому пасмо обов'язково замаслюють, щоб склеїти волокна та запобігти їхньому стиранню. Це також перешкоджає виникненню на

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

поверхні волокон дефектів та суттєво поліпшує технологічні властивості.

Також, використання активного замаслювача з плівкоутворювальних мастил та багатофункціональних силіційорганічних сполук, таких як апретів, підсилює адгезію між полімерною матрицею та склом у армованих пластиках. Це забезпечує підвищення міцності композиту.

Суцільне скловолокно іде на виготовлення армувальних матеріалів для склопластиків:

- нитки та волокна односпрямовані;
- нитки некручені та кручені комплексні;
- рівниці та джгути;
- сітки, тканини та стрічки;
- нетканні рулонні матеріали.

Скляні нитки являються комплексними нитками, діаметр у яких 9–11 мкм, вони складені з суцільних елементарних волокон та склеєні між собою замаслювачем.

Джгут, або ровінг являє собою нескручене пасмо, яке складене з рівномірно натягнутих ниток комплексних, зєднаних хрестовим намотуванням.

Скляні тканини та сітки виготовляють з комплексних кручених ниток, різняться вони за щільністю, видом переплетення ниток та самим складом тканини.

Тканини отримують з ровінга щільним переплетенням.

Вуглецеве волокно. Це волокно є жароміцним матеріалом. Тому саме вуглецеві волокна отримали найбільше практичне застосування у ракетній техніці. Крім того, вуглецеві волокна характеризуються високим модулем пружності, який більш чим у 5 разів перевищує модуль скловолокна, а також мають низький коефіцієнт теплового розширення, хорошу здатність працювати в умовах вібрації, високу міцність до втомлюваності та стійкість до впливу температури.

Отримують вуглецеві волокна з волокнистих полімерів при термічній

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

обробці в інертних середовищах [4].

Ділять вуглецеві волокна на: карбонізовані, вугляні та графітові, які містять відповідно 90 %, 91–98 % та понад 98 % вуглецю.

В залежності від вихідної сировини та самої технології обробки можливе отримання вуглецевих волокон з різними характеристиками.

У таблиці 1.5 приведені фізико-механічні властивості деяких типів вуглецевих волокон.

Таблиця 1.5 – Фізико – механічні характеристики вуглецевих волокон

Тип волокна	Щільність, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Міцність на розрив, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
ВМН-3	1,72	1,44	255
Кулон	1,91	2,10	410–600
ЛУ-2	1,71	2,00–2,40	220
ЛУ-3	1,73	2,10–3,10	240
Елур	1,65	2,10	155

Основними видами сировини для вуглецевих волокон є гідроцелулоїдне віскозне волокно і поліакрилонітрильне волокно.

Целюлоза є полімером природного походження, це деревина, бавовна, хімічна формула яких $C_6H_{10}O_5n$ і яку застосовують для отримання волокон самого різного призначення.

Поліакрилонітрильне волокно є полімером акрилонітрилу, застосовують його більше для отримання високомодульних міцних вуглецевих волокон.

Вчені вважають, що в якості сировини можна розглядати і дешеві матеріали: пеки, фенольні та фурфуролові смоли, з яких отримують спочатку органічні волокна, а далі уже вуглецеві. Структура вихідних волокон має лінійні кристалічні утворення, які розташовані вздовж осі волокна. Безпосередньо процес отримання всіх видів вуглецевих волокон заключається у двох стадіях високотемпературної обробки, а саме: карбонізації при температурі

1170-2270 К та графітизації при температурі біля 3270 К у середовищі водню, аргону чи азоту, у графітовій або вугільній засипці та у вакуумі.

Для утворення вуглецевих волокон середньої міцності проводять карбонізацію та графітизацію раніше виготовленої стрічки, або тканини чи джгута з органічних волокон. В такому вигляді вуглецеві матеріали можливо використовувати для виготовлення деталей.

На хімічних підприємствах при виготовленні високоміцних та високомодульних волокон спочатку отримують органічне волокно протягуванням з розчинів. Далі органічне волокно піддають карбонізації при температурі біля 1270 К з послідуєчим високотемпературним випалюванням при температурі порядку 2170–2270 К. У процесі одразу проходить намотування волокна на барабан. Волокно повинно бути достатньо натягнутим, щоб в ньому створилася нерівноважна витягнута нерівноважна структура.

Доречно відмітити, що міцність та жорсткість вуглецевих волокон залежить від особливої будови кристалів графіту. Базисні площини у його структурі, які створені атомами вуглецю, ритмічно розміщені одна над одною на відстані в 2,5 рази більшій, ніж між атомами площини.

В технологічному процесі, якщо максимальна кількість базисних шарів розміщується паралельно осі волокна, отримуємо тверде вуглецеве волокно. Для підвищення міцності вуглецевих волокон необхідно зменшити розмір кристалітів, які мають досконалішу будову. Відомі технологічні операції, які підвищують вуглецевим волокнам твердість та міцність. Для цього застосовують легування бором при допомозі дифузії з газової фази, а також опромінення волокон нейтронами, добавляючи перед піролізом бури. А для поліпшення сумісності волокон з матрицями, на вуглецеві волокна наноситься покриття з карбіду, нітриду, або бориду.

Дисперсні наповнювачі.

Виділяють два основні класи композиції з дисперсними наповнювачами: дисперсно-зміцнені та зміцнені часточками. Незалежно від класу композицію

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

утворює матриця та розподілені у ній наповнювачі, які вводять для зміни властивостей композиції. Класи відрізняються структурою.

Дисперсно-зміцнені композиції – це матриця з елементарної речовини, у якій розподілені дуже дрібні частинки розміром від 0,01 до 0,1мкм та об'ємною часткою 1-15 відсотки.

Композиції, зміцнені часточками, відрізняються тим, що розмір часточок наповнювача у них перевищує 1,0 мкм, а об'ємний вміст досягає 25 відсотків.

Частіше всього, як часточки використовують нітриди, карбіди, бориди, оксиди, які нерозчинні у матриці і не когерентні з нею. Основне навантаження, у дисперсно-зміцнених матеріалах несе матриця. Параметри, від яких залежить ефективність зміцнення: вільний шлях у матриці між часточками, проміжок між часточками. Параметри пов'язані з об'ємною концентрацією часточок та їх діаметром. Основна незаперечна перевага дисперсно-зміцнених матеріалів заключається у здатності зберігати властивості у широкому температурному інтервалі – до 80 % температури плавлення матриці.

За важливістю матриці у композиційних полімерних матеріалах, зміцнених часточками, характерна проміжна роль між іншими класами композицій. В дисперсно-зміцнених композиціях вона буде основним компонентом, так як несе навантаження. А у випадку зміцнення часточками, навантаження розподіляється між ними і матрицею. Дисперсні частинки виявляють зміцнювальну дію на композицію у тому випадку, коли обмежують деформацію матриці механічним стисненням, коли відстань між частинками із-за щільності така, що перешкоджає їх дальшому зближенню у цих об'ємах.

Запропонована теорія Орована дає пояснення механізму зміцнення дисперсними часточками. В такій моделі рух дислокацій розглядається в м'якій та в'язкій матрицях, які мають тверді рівноважні частинки зміцнювача. Якщо відстань між частинками другої фази достатньо велика, дислокація під впливом напруження вигинається між ними, її ділянки замикаються за кожною частинкою, і, залишаючи навколо частинок петлі, вона продовжує ковзати у

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початковому напрямку. Нова дислокація, проходячи між частинками, утворює кільця навколо кожної з них, що призводить до збільшення загальної довжини дислокацій. Дислокаційні кільця кругом дисперсних частинок, які відштовхуються один від одного, утворює поле пружних напруг, яке не дає можливості проштовхуванню нових дислокацій між часточками.

Ущільнювальні і антифрикційні вузли та деталі у автомобілебудуванні створюють способом механічної обробки пластин, стержнів та втулок.

Отже, композити на основі термостійких полімерів являються досить ефективними матеріалами в якості ущільнюючих та антифрикційних вузлів в системах пневматики, гідравліки та паливної автомобільної техніки [4,5].

1.4 Формулювання завдання на дослідження теплофізичних властивостей та зносостійкості композиційних полімерних матеріалів для вузлів тертя автомобілів

Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи є дослідження впливу графіту на теплофізичні властивості полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 в залежності від температури та встановлення залежності інтенсивності зносу від коефіцієнта теплопровідності.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати особливості застосування антифрикційних матеріалів на основі полімерів в автомобільній техніці.
2. Відпрацювати методику теплофізичних та антифрикційних досліджень композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.
3. Дослідити теплоємність, теплопровідність та зносостійкість композиційних матеріалів.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Встановити зв'язок між інтенсивністю зносу та коефіцієнтом теплопровідності композиційних матеріалів.

Об'єктом дослідження є композиційні полімерні матеріали на основі ароматичного полііміду марки ПМ-69 та графіту С-1 для вузлів тертя автомобільної техніки.

Предметом дослідження є теплофізичні та антифрикційні дослідження композиційних матеріалів на основі термостійкого полімера – ароматичного полііміду ПМ-69.

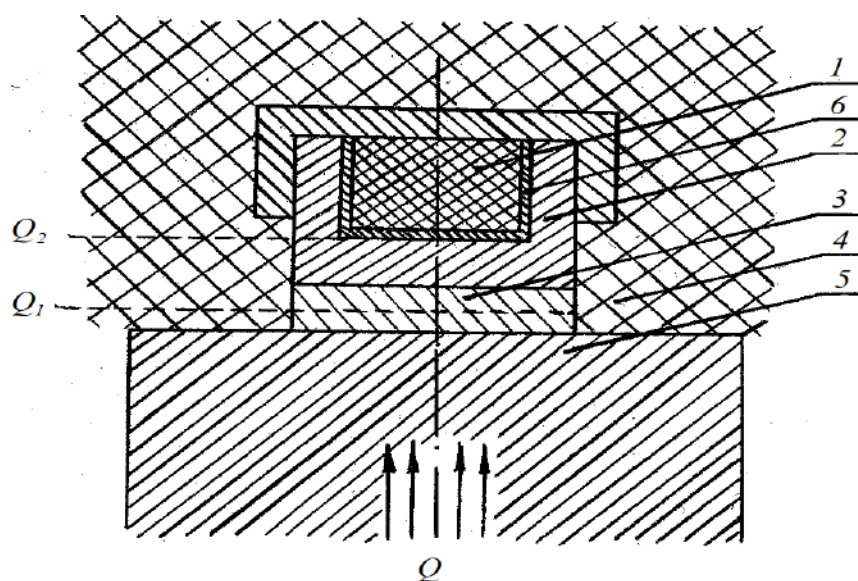
					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МЕТОДИКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ТА АНТИФРИКЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОСТІЙКИХ ПОЛІМЕРІВ

2.1 Теплова схема та принцип роботи приладу для вимірювання теплоємності ИТ-С-400

В основі роботи вимірювача використано порівняльний метод динамічного С-калориметра з використанням тепломіра та оболонки. Теплову схему вимірювача зображено на рисунку 2.1.

Зразок 1, який досліджується (рідину необхідно попередньо залити у тонкостінну ампулу б), розташовують всередині металічної ампули 2 та розігрівають разом з нею. Розігрів отримуємо за рахунок проходження до ампули теплового безперервного потоку Q через тепломір 3. Зв'язок теплової ампули 2 та зразка, що досліджується, з навколишнім середовищем можливий лише через тепломір 3, тому відкриті частини поверхні ампули розділені від середовища адіабатною оболонкою 4, вимірювального блоку 5.



1 – зразок; 2 – ампула; 3 – тепломір; 4 – адіабатна оболонка; 5 – вимірювальний блок; 6 – тонкостінна ампула.

Рис. 2.1 – Теплова схема вимірювача теплоємності ИТ-С-400

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Потік тепловий, що проходить середній переріз тепломіра, направлений на розігрів зразка 1, що досліджується, та ампули і підраховується за формулою:

$$Q_m = Q_0 + Q_a, \quad (2.1)$$

де Q_0 – тепловий потік, який іде на розігрів зразка, Вт; визначається за формулою $Q_0 = c \cdot m_0 \cdot b$; c – питома теплоємність зразка, кДж/кг · К; m_0 – маса зразка, кг; b – швидкість розігріву, К/с; Q_a – тепловий потік, який іде на розігрів ампули, Вт; визначається за формулою $Q_a = C_a \cdot b$; C_a – повна теплоємність ампули, Дж/К.

Тепловий потік Q_m , що проходить через тепломір, можна визначити за зміною температур на тепломірі θ_t та теплопровідністю тепломіра K_T , яка була встановлена за допомогою незалежних тарувальних експериментів:

$$Q_m = K_T \cdot \theta_t. \quad (2.2)$$

Параметр $K_T = f(t)$ є постійною приладу та залежить лише від температурного рівня. Питома теплоємність має вигляд:

$$c = \frac{1}{m_0} \left(\frac{K_T \theta_t}{b} - c_a \right), \quad (2.3)$$

де c – питома теплоємність зразка, кДж/кг · К.

За малих змін температури тепломіра доцільно перейти до виміру часу затримки температури, враховуючи, що:

$$\tau_T = \frac{\theta_t}{b},$$

де τ_T – час затримки температури на тепломірі, с.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді робоча формула буде мати вигляд:

$$c = \frac{K_T}{m_0} (\tau_T - \tau_T^0), \quad (2.4)$$

де τ_T^0 – час затримки температури тепломіра в експериментах з порожньою ампулою, с.

Параметр τ_T^0 є також постійною величиною вимірювача та визначається при його градуюванні. Зразок, що досліджується, розміщують в ампулі, яку закривають кришкою. Верхню половину корпусу вимірювального осердя опускають вниз..

При подачі напруги на нагрівач ядро вимірювального осердя починає плавно розігріватись до верхньої граничної температури. Нагрівач розміщений в захисному ковпаку, під час розігрівання підтримуються адіабатичні умови між ампулою та захисним ковпаком. В дослідженнях у процесі розігрівання на різних рівнях температур, а саме через кожні 25 °С при допомозі приладу Ф136 та секундоміра фіксуються часові запізнення температури ампули порівняно з температурою основи. Швидкість розігріву встановлюється початковою напругою нагрівача і швидкістю її зміни. Ці величини є строго фіксовані.

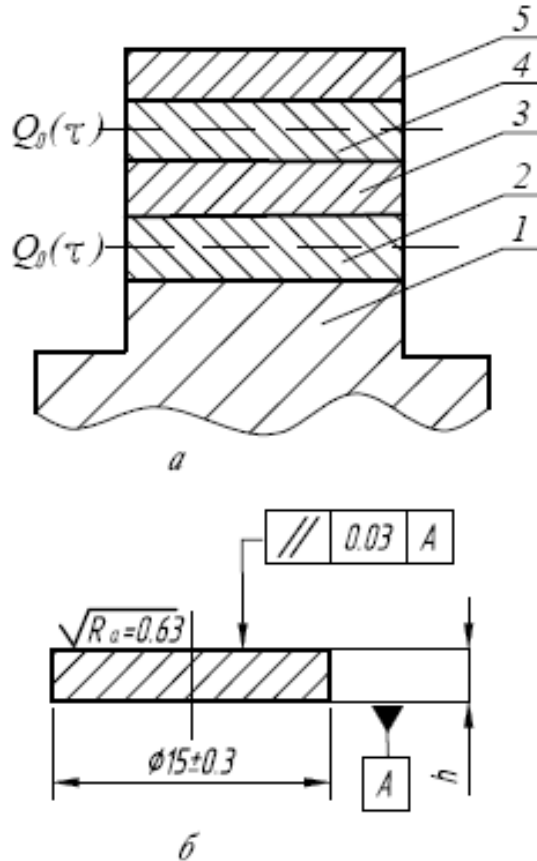
2.2 Теплова схема і принцип роботи вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400

У приладі для вимірювання теплопровідності застосований метод динамічного λ-калориметра.

Експериментальний зразок 4, контактна пластина 3 та стержень 5 розігріваються тепловим потоком, який надходить від основи 1 (рисунок 2.2). Бокові поверхні стержня 5, зразка 4, пластин 2, 3 ізольовані адіабатно. Стержень 5 та пластина контактуюча 3 одержані з міді високої теплопровідності і перепади температур на них незначні.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Тепловий потік $Q_T(\tau)$, який направлений через середній переріз пластини 2, в деякій мірі поглинається нею і проходить далі, розігріваючи пластину 3, зразок 4 і стержень 5. Розміри системи вибрані так, щоби потоки акумульовані зразком та пластинами, були десь у 8-10 разів менші од тих, які поглинає стержень. В даному випадку температурне поле зразка 4 та пластин 2, 3 є наближеним до стаціонарного лінійного поля.



1 – основа вимірювача; 2, 3 – пластини; 4 – зразок; 5 – стержень.

Рис. 2.2 – Теплова схема вимірювача (а), ескіз зразка (б)

Усі вузли системи розігріваються з однаковими швидкостями. Для теплових потоків $Q_0(\tau)$ та $Q_T(\tau)$ за будь-якої температури мають місце формули:

$$Q_0(\tau) = \frac{V_0 F}{R_T} \left(\frac{1}{2} C_0 + C_{\bar{n}} \right) \cdot b, \quad (2.5)$$

де $Q_0(\tau)$ – тепловий потік, що проходить через зразок та поглинається стержнем, Вт;

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

V_0 – перепад температури на зразку, К; F – площа поперечного перерізу зразка, m^2 ; R_T – тепловий опір між стержнем та контактною пластиною, $m^2 \cdot K/Вт$; C_0, C_c – повна теплоємність відповідно зразка та стержня, Дж/К; b – швидкість розігріву вимірювального осередку, К/с; а також:

$$Q_T(\tau) = K_T^* V_T = \left(\frac{1}{2} C_T + C_n + C_o + C_c \right) \cdot b, \quad (2.6)$$

де $Q_T(\tau)$ – тепловий потік, що проходить через середній переріз пластини 2, Вт; K_T^* – коефіцієнт пропорційності, що характеризує ефективну теплову провідність пластини 2, Вт/К; V_T – перепад температури на пластині 2, К; C_T, C_n – повна теплоємність відповідно пластини 2 і контактної пластини 3, Дж/К.

Тепловий опір між стержнем та контактною пластиною підраховуємо за формулою:

$$R_T = R_0 + R_K, \quad (2.7)$$

де R_0 – тепловий опір зразка, $m^2 \cdot K/Вт$:

$$R_0 = h/\lambda, \quad (2.8)$$

де h – висота зразка, м; λ – теплопровідність зразка, Вт/м·К; R_K – поправка, що враховує тепловий опір контакту, неідентичність та тепловий опір місця закладання термопар, $m^2 \cdot K/Вт$.

На основі виразів (2.5) – (2.8) отримані розрахункові формули для теплового опору зразка та визначення його теплопровідності:

$$R_0 = \frac{V_0 F (1 + \sigma_{\bar{n}})}{V_T K_T} - R_K, \quad (2.9)$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де σ_c – поправка, що враховує теплоємність зразка.

Підрахунок теплової провідності пластини:

$$K_T = K_T^* \frac{C_c}{\left(\frac{1}{2}C_T + C_n + C_c\right)}. \quad (2.10)$$

За тепловим опором зразка можна визначити його теплопровідність:

$$\lambda = h / R_0. \quad (2.11)$$

Для досліджень теплофізичних властивостей неметалевих матеріалів призначений вимірювач.

В його основу закладений режим монотонного нагріву, що дозволяє лише з одного експерименту отримати температурну залежність теплопровідності досліджуваного матеріалу.

Блок живлення і регулювання забезпечує нагрівання ядра вимірювальної комірки із середньою швидкістю 0,1 К/с та автоматичне підтримання температури.

Швидкість нагріву залежить від початкової напруги на нагрівачі та швидкості її зміни. Дві ці величини строго фіксовані. Джерелом регулювальної напруги є лабораторний автотрансформатор, підключений до електродвигуна з редуктором. Для визначення теплопровідності експериментального зразка під час безперервного нагріву потрібно на фіксованих рівнях температури виміряти перепади температур n_T та n_0 на тепломірі та зразку в мікрвольтах.

Методика розрахунку

1. Розрахувати поправку на теплоємність експериментального зразка:

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_c = \frac{C_0}{2(C_0 + C_c)}, \quad (2.12)$$

де C_0 – повна теплоємність зразка, Дж/К;

C_c – повна теплоємність стержня:

$$C_0 = c_0(t) \cdot m_0, \quad (2.13)$$

тут $c_0(t)$ – значення питомої теплоємності зразка, Дж/кг · К;

m_0 – маса зразка, кг.

Застосовуємо результати, одержані при визначенні теплоємності полімерних матеріалів.

Вплив поправки на теплоємність σ_c в основному не перевищує 5–10 відсотків та може бути оцінено за орієнтовними даними теплоємності.

Тепловий опір зразка знаходимо з формули:

$$R_0 = \frac{n_0 F (1 + \sigma_{\tilde{n}})}{n_T K_T} - R_K. \quad (2.14)$$

2. Визначити теплопровідність досліджуваного зразка:

$$\lambda = \frac{h}{R_0}. \quad (2.15)$$

3. Підраховане значення теплопровідності зразка необхідно віднести до середньої температури зразка:

$$\bar{t} = t_c + 0,5 A_t n_0, \quad (2.16)$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

де \bar{t} – середня температура зразка, °С; t_c – температура, при якій вимірювалась теплопровідність, °С; A_t – чутливість термопари хромельальюмель, К/мВ; n_0 – перепад температури на зразку, мВ.

4. Побудувати залежність теплопровідності досліджуваного матеріалу від температури у вигляді графіку.

2.3 Методика лабораторних випробувань зносостійкості пар тертя

Експериментальні дослідження зносостійкості композиційних матеріалів виконували на модифікованій машині тертя ХТІ-72 [3].

За допомогою змінювання розташування шківів пасової передачі у широкому діапазоні від 0,2 до 5 м/с проводили регулювання швидкості ковзання. Для навантаження на зразки застосовували спеціальну систему важелів.

За постійного навантаження виконується режим змінних граничних питомих навантажень. Досліджувані зразки брали висотою та діаметром $10 \pm 0,1$ мм з сферою радіусу 6,35 мм. Виконували контакт сферою по площині контртіла металевого висотою та діаметром $60 \pm 0,15$ мм. Саме контртіло виготовлене зі сталі 45 та оброблено до середнього арифметичного відхилення профілю поверхні $Ra = 0,2 \pm 0,03$ мкм.

Проведення експериментів.

Перед виконанням досліджень необхідне обов'язкове ознайомлення з правилами техніки безпеки. Слідуючий етап полягає у підготовці обладнання до роботи. Уважно перевіряємо усі з'єднання вузлів обладнання та стан пасових передач і при наявності тріщин або інших пошкоджень здійснюємо заміну їх.

Наступний етап полягає у підготовці контртіла. Підготовка контртіла – це необхідність охолодження водою (рисунок 2.3). Виконуємо шліфування горизонтальної поверхні робочої частини контртіла в одному напрямку для того, щоб одержати рівномірну дзеркальну поверхню. Далі контртіло розташовуємо на столі трибометра ХТІ-72 та закріплюємо.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

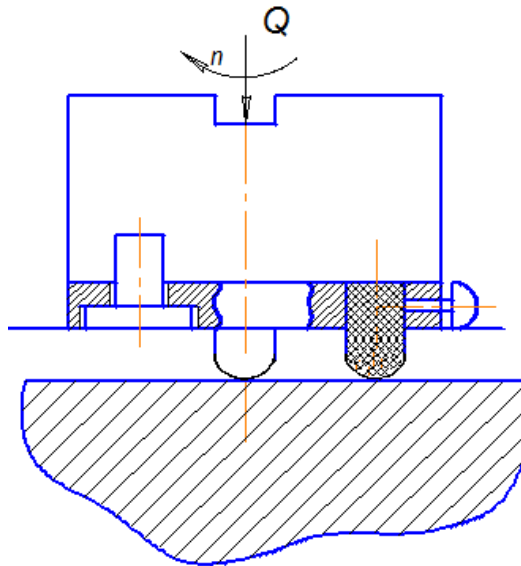


Рисунок 2.3 – Схема випробувань на трибометрі ХТІ-72

Закріплене контртіло потрібно обов'язково обезжирити розчинником. При готовності контртіла, у верхньому затискачі зі зразками розкручуємо гвинти, які їх кріплять. Після цього необхідно встановити затискач у штوک трибометра і опустити штوک до того, поки зразки не торкнуться своєю поверхнею контртіла. Далі потрібно завантажити важіль трибометра та закріпити зразки гвинтами. Обов'язково необхідно виконати позначки на затискачі зі зразками та на штоку трибометра для того, щоб мати можливість повернути затискач у початкове положення після кожного вимірювання.

Запускаємо установку після активації системи охолодження контртіла і перемиряєм шлях тертя S_1 . Як тільки на індикаторі буде показ рівний значенню шляху тертя S_1 , виключаємо установку. Далі потрібно зняти затискач із зразків, розмістити зразки на столі мікроскопу та визначити площу контакту. Знімаємо три виміри в різних точках на кожному зразку та фіксуємо зразки.

Одержані дані записуються в журналі для реєстрації. Затискач із зразками потрібно встановити в початкове положення та включити установку. Після вимірювання шляху S_2 , виключаємо установку та повторюємо усі вищеперераховані

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

кроки. Усі ці дії повторюються до того часу, поки виміри площі контакту не фіксують інший режим, що вказує на ступінь зносу.

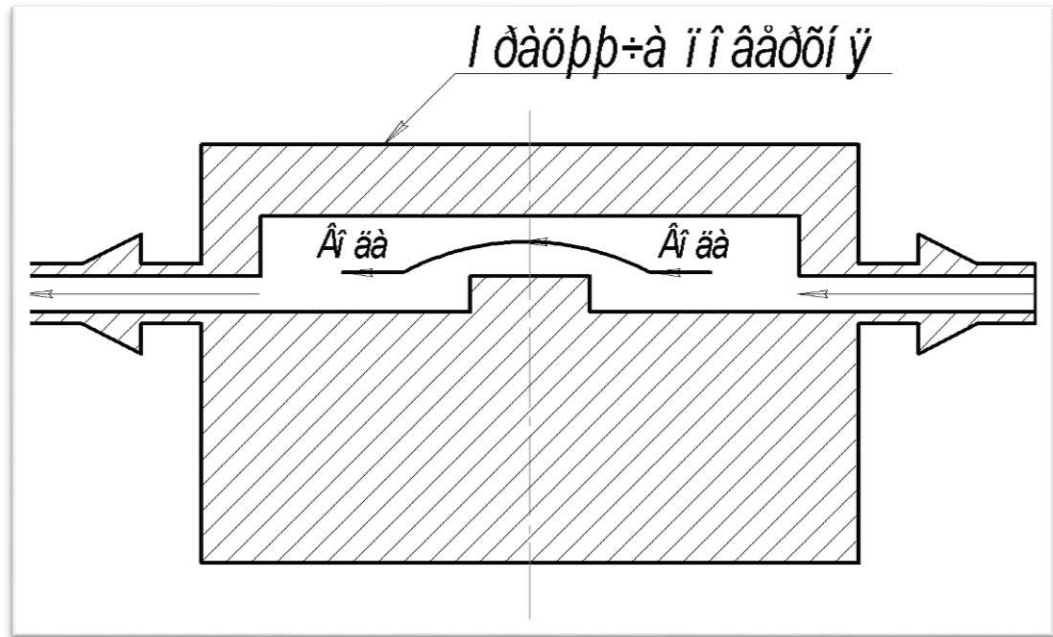


Рисунок 2.4 – Контртіло

Уточнюючи послідовність дій, потрібно на графіку відобразити залежність розміру площі контакту від шляху тертя.

Навантаження нормальне на один зразок було задане $N_i = 100$ Н, швидкість ковзання відповідала $V = 1,1$ м/с, при випробуванні без мащення, виміряна на відстані 0,5–1 мм від поверхні контртіла температура становила $T = (323 \pm 2)$ К.

Інтенсивність об'ємного зношення підраховували для шляху тертя ΔS_1 та ΔS_2 за формулами:

$$I_1 = \frac{\Delta V_{1i}}{N_i \cdot \Delta S_1}, \quad (2.22)$$

$$I_2 = \frac{\Delta V_{2i}}{N_i \cdot \Delta S_2}, \quad (2.23)$$

де ΔV_{1i} – зміна об'єму i -зразка на проміжку шляху тертя ΔS_1 (перший етап дослідження, який відповідає нелінійній залежності зношення від шляху тертя);

ΔV_{2i} – зміна об'єму i -зразка на проміжку шляху тертя ΔS_2 (другий етап дослідження, який відповідає лінійній залежності зношення від шляху тертя).

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА АНТИФРИКЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІМІДУ ПМ-69

3.1 Аналітичний огляд літературних джерел по теплофізичних властивостях полімерних матеріалів

Відомо, у твердих тілах енергія передається через електрони, фонони або фотони. В значній більшості полімерів основним механізмом теплопровідності є фононний механізм, так як вільний рух електронів у ньому неможливий. Враховуючи теоретичне передбачення, щоб розрахувати теплопровідність полімеру, користуються рівняння Дебая:

$$\lambda = (c_p \cdot v \cdot l) / 3 \quad (3.1)$$

l - довжина вільного пробігу фононів, v - середня швидкість фононів; c_p - питома теплоємність.

Для полімерних матеріалів довжина вільного пробігу фононів має усього кілька ангстрем, що зумовлено наявністю аморфних ділянок у полімері. Цілий ряд дефектів аморфного полімеру веде до розсіювання фононів і як результат – дуже низька теплопровідність полімеру [6].

На теплопровідність полімеру досить суттєво впливає кристалічність, значення від 0,2 Вт/(м·К) для аморфних полімерів, таких як поліметилметакрилат або полістирол до 0,5 Вт/(м·К) для полімерів з високою кристалічністю, як поліетилен високої щільності [7].

Проте, у технічних виданнях наблюдаємо великі відмінності між експериментальними даними відносно теплопровідності кристалічних полімерів. Навіть зустрічаються суперечливі результати. Також потрібно відмітити, що теплопровідність полімеру залежить від багатьох факторів, а саме: хімічна структура, тип структури, структурна нерівномірність, молекулярна маса бічних груп, міцність зчеплення, молекулярна щільність розподілу, а також умови обробки

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та температура. Тому, прогнозування теплопровідності та кристалічності вважається дуже складним через розсіювання фононів між аморфною фазою та кристалічною фазою, а також поєднання цих факторів у полімерній кристалічній фазі.

Температурна залежність теплопровідності частково кристалічних і аморфних полімерів також може значно відрізнятись. За низьких температур частково кристалічні полімери характеризуються температурною залежністю, яка подібна залежності для дефектних кристалів, а саме: з максимумом температур біля 100 К.

Проте, при збільшенні кристалічності максимум змінюється на більш низькі температури та вищу теплопровідність. Хоча аморфний полімер демонструє температурну залежність коефіцієнта теплопровідності, схожу на залежність у неорганічному склі, у діапазоні низьких температур спостерігається значна область плато. При збільшенні температури теплопровідність аморфних полімерів зростає до температури склування (T_c), а далі іде зменшення при температурах вище склуванню [8]. У діапазоні температур 273–373 К теплопровідність частково аморфних полімерів та деяких кристалічних полімерів (поліетилен, політетрафторетилен, полістирол, епоксидна смола) пов'язана з температурою, яка вказує на те, що аморфна полімеризація матеріалу росте при збільшенні температури та багато вище, а ніж у кристалічній області.

Полімерні матеріали мають низьку теплопровідність. З іншого сторони, у багатьох галузях промисловості є необхідність для збільшення теплопровідності полімерних матеріалів. Якщо потрібно застосовувати полімерні матеріали у якості антифрикційних у вузлах тертя, або як тепловідводи у електричних, електронних системах, необхідні композиційні матеріали з теплопровідністю від 1 до 30 Вт/(м·К). Ось чому, щоб подолати обмеження застосування традиційних полімерів, дуже важливо використовувати композиційні полімерні матеріали та вивчати їх теплофізичні властивості.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частіше всього теплопровідність полімерів поліпшується додаванням теплопровідних наповнювачів, таких як графіт, вуглецеве волокно, сажа, металеві або керамічні частинки) [9]. Слід відмітити, що існує велика кількість різних даних, які часто відрізняються про теплопровідність наповнювача.

Теплопровідність наповнювача залежить від наступних факторів: розміру часточок, чистоти наповнювача, кристалічності полімерної матриці, методу розрахунку та способу додавання наповнювача у полімерну матрицю. Необхідно відмітити, що деякі полімерні матеріали у формі волокон мають вищу анізотропію і, відповідно, у них більша теплопровідність вздовж основної осі, ніж у вертикальному напрямку.

Для отримання необхідної теплопровідності у теплопровідних композитах, безумовно, необхідний високий ступінь наповнення до 30 об. %, а це ускладнює створення композиційних матеріалів.

Досить часто вимоги до обробки, такі як лиття під тиском або можливість екструзії обмежують вміст наповнювачів у композиції, а це в свою чергу обмежує теплопровідність [10]. Також висока концентрація неорганічного наповнювача серйозно змінює механічні характеристики і щільність полімеру. Підсумовуючи причини, напрошується висновок, що одержати композиційні матеріали з теплопровідністю більше 4 Вт/(м·К) та меншим споживанням енергії є проблематичним.

Останні роки перспективними є наповнювачі на вуглецевій основі з високою теплопровідністю та низькою масою. Найбільш поширеними звичайними наповнювачами на основі вуглецю є графіт, сажа та вуглецеве волокно. Найкращим електропровідним наповнювачем вважається графіт, оскільки має високу теплопровідність, високу дисперсність у полімерній матриці та низьку собівартість [11]. Теплопровідність шару графена, що складає графіт, досягає близько 800 Вт/(м·К), теоретично оцінюється в 5300 Вт/(м·К), що визначає весь графіт [13]). Висока теплопровідність в основному перебуває у діапазоні від 100 до 400 Вт/(м·К). Термічнорозчеплений графіт – це очищена форма графіту, товщина

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якого від 20 нм до 100 нм. Він знайшов застосування у полімерних композиційних матеріалах, теплопровідність якого залежить від ступеня розшарування і дисперсності у матриці [12].

Іншим досить часто використовуваним вуглецевим наповнювачем є вуглецеве волокно (ВВ). У праці [13] досліджувались полімерні вибухонебезпечні композиційні матеріали. Так як вибухівка має структуру, у якій полімерний матеріал розміщений паралельною осі волокна, теплопровідність вздовж осі волокна суттєво відрізняється від поперечної теплопровідності. Теплопровідність у осьовому напрямку може досягати до 2000 Вт/(м·К), тоді як від 10 до 110 Вт/(м·К) у поперечному напрямку, а це безумовно впливає на теплопровідність композиційних орієнтованих матеріалів.

Часточки вуглецю являються невеличкими сферами, склад яких – деградовані графітові структури, що мають розміри частинок в межах 10–500 нм та площу поверхні 25–50 м²/г. Металеві частинки є досить важливими наповнювачами у полімерів, які ведуть до підвищення теплопровідності конкретного композиційного матеріалу. Проте, якщо полімерна матриця досить заповнена металевими частинками, вага композиційного матеріалу підвищується, обмежуючи застосування цього матеріалу, коли необхідна невелика вага. Частинки металу, що застосовуються для підвищення теплопровідності, це – порошки алюмінію, міді, срібла, нікелю та ін..

На основі полімерної матриці з поліетилену, поліаміду, поліпропілен, полівінілхлориду, епоксидної смоли, композити, які модифіковані з врахуванням часточок металу і їх характеристики приведені у праці [14]. Теплопровідність полімерного композиційного матеріалу на пряму залежить від теплопровідності металевого наповнювача і розміру часточок, а також об'ємної частки та просторового розташування самої матриці.

Деякі керамічні матеріали відомі тим, що також мають високу теплопровідність, це такі, як нітрид алюмінію, нітрид бору, карбід кремнію і оксид берилію [14]. Доведено, що на теплопровідність композитів з керамічними

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

наповнювачами вплив має щільність упакування наповнювача, розмір та розподіл частинок, а також обробка поверхні та спосіб перемішування.

3.2 Результати експериментальних досліджень теплофізичних та антифрикційних властивостей полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69

Процес змішування ароматичного порошка ПМ-69 та графіту С-1 виконували протягом 20 хвилин у млинку МРП-1, кількість обертів ножів становила 7000 за хв.

Зразки для досліджень одержували методом сушки при температурі 423 К на протязі 5 годин з наступним пресуванням брикету при 20 МПа та нагріванні без тиску до температури 613-618 К. Після цього брикет у пресформі перебував 5 хв. без тиску, а далі 5 хв. при тиску 20 МПа. Одержаний зразок разом з пресформою охолоджували до температури 363 ± 10 К. Далі були виконані дослідження впливу концентрації графіту С-1 на теплоємність і теплопровідність полімерних композиційних матеріалів, основою яких є ароматичний поліілід ПМ-69.

Виміри коефіцієнтів теплоємності та теплопровідності композитів здійснювали відповідно розробленої методики у інтервалі температур 323 - 473 К.

Аналіз результатів досліджень залежності теплоємності від температури полімерних композиційних матеріалів, в основі яких ароматичний поліілід ПМ-69 а також графіт С-1, представлені на рисунку 3.1.

Як видно з рисунку 3.1, теплоємність експериментальних зразків композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду та графіту С-1 зростає із збільшенням температури, що є особливістю лінійних полімерів та твердих колоїдних систем, створених на їх основі.

Загальна похибка коливалася у межах 2,42-4,69 % на протязі зміни температури від 298 до 473 К та концентрації графіту С-1 від 0 до 40 %.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

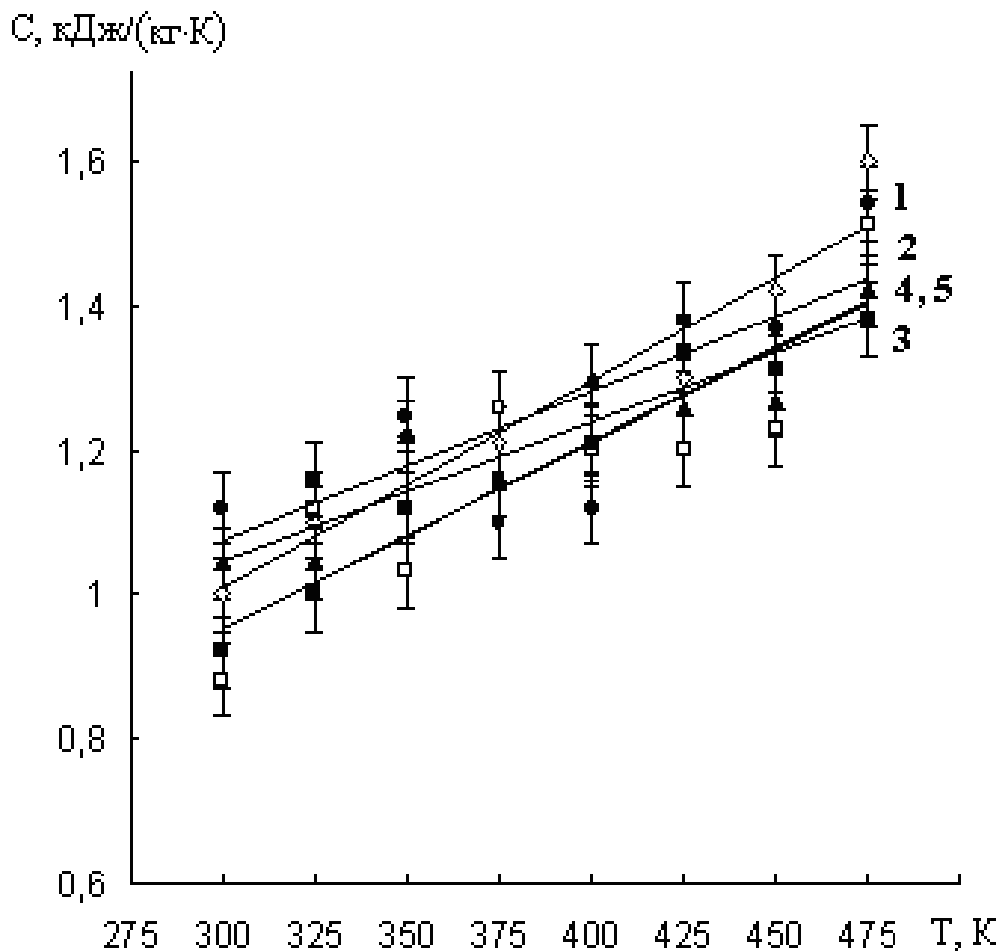
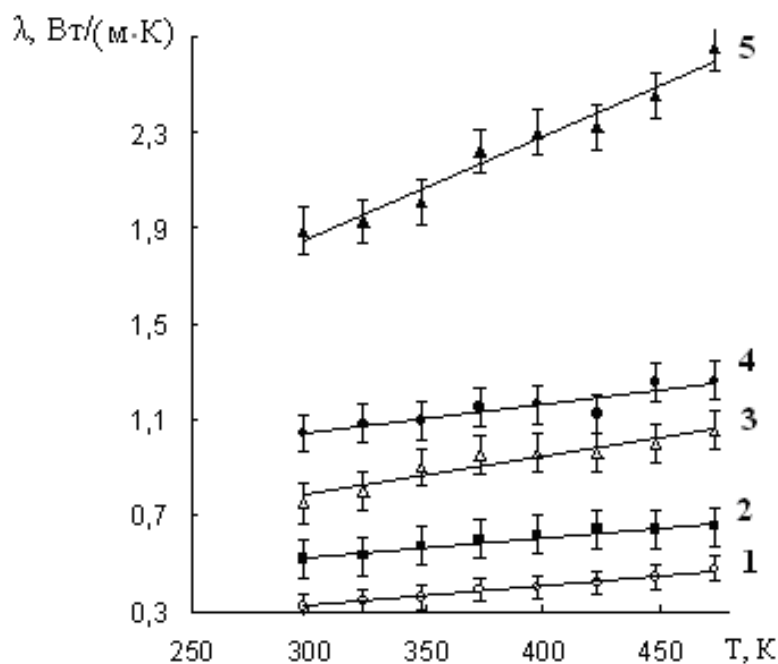


Рисунок 3.1 – Залежність теплоємності (С) та довірчі інтервали для композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і колоїдного графіту С-1 від температури (Т) за різних концентрацій наповнювача: 1 – 0 % (\diamond); 4 – 10 % (\square); 3 – 20 % (\blacktriangle); 2 – 30 % (\bullet); 5 – 40 % (\blacksquare).

Результати залежності коефіцієнта теплопровідності від температури полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 та графіту С-1 представлені на рисунку 3.2.

Досліджено, що під час додавання у склад колоїдної системи графіту С-1, коефіцієнт теплопровідності на початку лінійно зростає при збільшенні вмісту дисперсної фази до 30%, а далі при введенні графіту С-1 більше 30% даний показник різко зростає. Це можна пояснити створенням теплопровідних каналів при такому додаванні графіту.



1 – ароматичний поліімід ПМ-69; 2 – ароматичний поліімід ПМ-69 + 10 мас. % графіту С-1; 3 – ароматичний поліімід ПМ-69 + 20 мас. % графіту С-1; 4 – ароматичний поліімід ПМ-69 + 30 мас. % графіту С-1; 5 – ароматичний поліімід ПМ-69 + 40 мас. % графіту С-1

Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) та довірчі інтервали для твердих колоїдних систем на основі ароматичного поліімиду ПМ-69 та графіту С-1 від температури (Т) за різної концентрації наповнювача

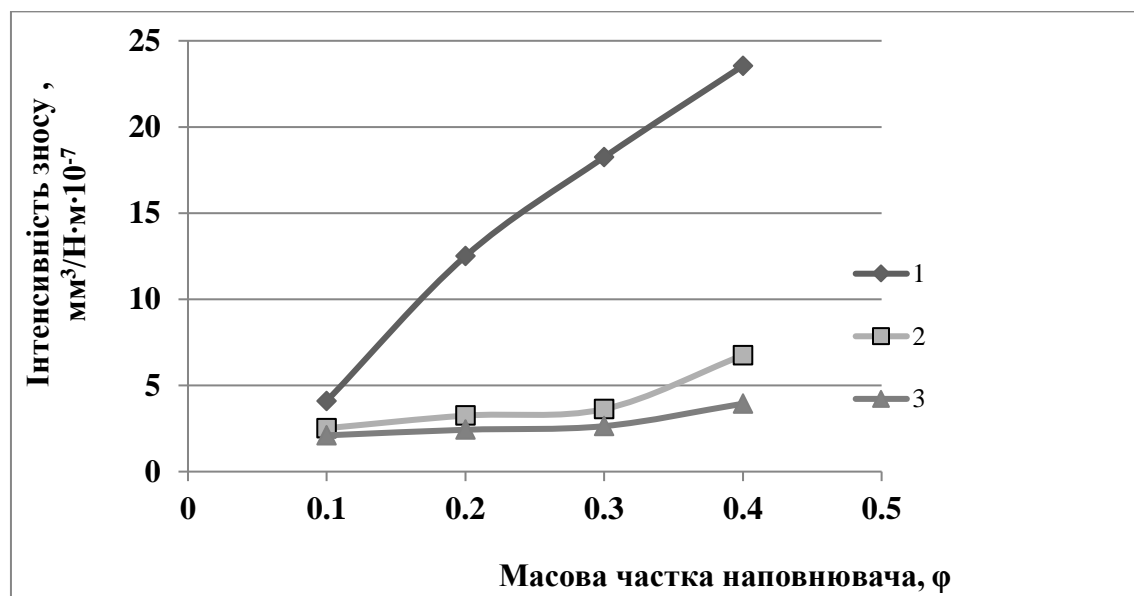
Доведено, що із підвищенням дисперсності графіту коефіцієнт теплопровідності композиту зростає [2]. Це пояснюється тим, що високодисперсні часточки графіту, які досить рівномірно розподілені в композиції, знижують термічний опір та підвищують теплопровідність композиційного матеріалу. З підвищенням зольності графіту коефіцієнт теплопровідності полімерного композиційного матеріалу на основі ароматичного поліімиду ПМ-69 знижується у результаті зниження теплопровідності графіту при підвищенні його зольності. Незначні показники коефіцієнту теплопровідності полімерного композиційного матеріалу на основі ароматичного поліімиду ПМ-69, який наповнений

високодисперсним графітом С-1, пояснюються відносно великою зольністю даного графіту–1,5 %.

Отже, при введенні в склад полімерного композиційного матеріалу на основі ароматичного полііміду ПМ-69 графітів з різною дисперсністю і зольністю можна створити антифрикційні полімерні матеріали із заданим коефіцієнтом теплопровідності.

На основі одержаних результатів експлуатаційних властивостей, з метою прогнозування застосування антифрикційних композиційних матеріалів виконаний експеримент встановлення кореляційного зв'язку між коефіцієнтом теплопровідності та інтенсивністю зносу композитів, в основі яких ароматичний поліілід ПМ-69 та графіт С-1.

Підсумки досліджень інтенсивності зносу композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і різних наповнювачів в залежності від концентрації наведені на рисунку 3.3.



1 – ароматичний поліілід ПМ-69 + графіт С-1; 2 – ароматичний поліілід ПМ-69 + вуглецеве волокно з тканини ТГН-2М; 3 – ароматичний поліілід ПМ-69 + вуглецеве волокно з тканини УТМ-8;

Рисунок 3.3 – Залежність інтенсивності зносу (I) для композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ–69 та різних наповнювачів при різних концентраціях дисперсної фази

Досліджено, що зміна концентрації волокна вуглецевого тканини ТГН-2М а також волокна вуглецевого тканини УТМ-8 мають незначний вплив на інтенсивність зносу композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.

3.3 Встановлення кореляційного зв'язку між інтенсивністю зносу зразків з композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і графіту С-1 та коефіцієнтом теплопровідності

Для невеликих вибірок розподіл коефіцієнта кореляції значно відрізняється від нормального. Для перевірки гіпотези про відсутність кореляції між інтенсивністю зносу та коефіцієнтом теплопровідності, а також для побудови довірчих інтервалів для коефіцієнтів кореляції (ρ), використовується перетворення Фішера [15]. Фішер показав, що розподіл випадкової величини z можна визначити за допомогою такої формули:

$$z = 0,55 \ln \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (3.2)$$

де ρ – вибірковий коефіцієнт кореляції, що добре апроксимується нормальним законом з математичним очікуванням a_z за середнього квадратичного відхилення σ_z .

Математичне очікування a_z знаходиться з формули:

$$a_z = 0,5 \ln \frac{1 + \rho}{1 - \rho} + \frac{\rho}{2(n - 1)} \quad (3.3)$$

Середнє квадратичне відхилення рівне виразу:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N - 3}} \quad (3.4)$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де N – кількість дослідів;

У формулі 3.3 друга складова зазвичай чисельно невелика порівнюючи з середнім квадратичним відхиленням σ_z . Тому нею частіше всього нехтують.

Перевірка гіпотези нульової про рівність нулю генерального коефіцієнта кореляції полягає в розрахунку за формулами (3.2) та (3.4) значень z та σ_z та порівняння вибіркового значення з теоретичним, винайденим з таблиці для довірчої імовірності $P = 1 - \alpha$ [20]. У випадку, коли виконується умова $z \leq z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_z$, то нульову гіпотезу $\rho = 0$ приймають. А якщо $z > z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_z$ нульову гіпотезу не приймають.

Визначаємо існування кореляції між результатами досліджень зносостійкості і теплопровідності зразків полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 та графіту С-1. Вміст графіту у композиції змінюється від 0 до 40 мас. %.

Вибірковий коефіцієнт кореляції визначимо за формулою:

$$\rho_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^N [(y_{1i} - \bar{y}_1)(y_{2i} - \bar{y}_2)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{1i} - \bar{y}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_{2i} - \bar{y}_2)^2}}, \quad (3.5)$$

Де N – кількість дослідів;

$i = 1, 2, \dots, N$, \bar{y}_1, \bar{y}_2 – оцінки математичних очікувань відповідно інтенсивності зносу та коефіцієнта теплопровідності;

$$\rho_{1,2} = 0,99.$$

Точний коефіцієнт кореляції в залежності від об'єму вибірки та вибіркового коефіцієнта кореляції знаходимо з таблиць Фішера ($\rho = 0,96$).

Далі підраховуємо чисельні значення величин z та σ_z :

$$a_z = 0,5 \ln \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = 1,948$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} = 0,707$$

Теоретичне значення z для $\alpha = 0,05$; $P = 1 - 0,05/2 = 0,975$ тобто 1,96.

Визначаємо добуток $z_{0,975} \cdot \sigma_z = 1,96 \cdot 0,707 = 1,386$, що звичайно менше 1,948. А це означає, що між інтенсивністю зносу полімерного композиційного матеріалу на основі поліімиду та графіту С-1 (y_1) та коефіцієнтом теплопровідності (y_2) в даному інтервалі зміни параметрів існує кореляційний зв'язок.

При обмеженому об'ємі вибірки границі дев'яностоп'ятивідсоткового довірчого інтервалу для коефіцієнта кореляції знаходимо з формули:

$$z_1 < a_z < z_2, \text{ де}$$

$$z_1 = z - z_{1-0.5\alpha} \cdot \sigma_z, \quad (3.6)$$

$$z_2 = z + z_{1-0.5\alpha} \cdot \sigma_z \quad (3.7)$$

Так як $z_{0,975} = 1.96$, то одержимо:

$$1,14 < a_z < 2,74$$

Потім для значень z_1 та z_2 розраховуємо відповідні значення границь довірчих інтервалів для генерального коефіцієнта кореляції за формулою:

$$\rho = \frac{e^{2z-1}}{e^{2z+1}} \quad (3.8)$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$0,815 < \rho < 0,992$$

Визначимо рівняння регресії, яке встановлює залежність між інтенсивністю зносу полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 та графіту С-1 (y_2) і коефіцієнтом теплопровідності цих матеріалів (y_1).

Рівняння теоретичної лінії регресії записується у наступному вигляді:

$$M\left(\frac{y}{x}\right) = a_y = \alpha + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}), \quad (3.9)$$

де $M(y/x)$ – умовне математичне очікування величини при фіксованому значенні $X = x$.

Оцінкою теоретичної лінії вважають емпіричну лінію регресії, рівняння якої такого виду:

$$y = \bar{y} + \rho \frac{S_x}{S_y} (x - \bar{x}) \quad (3.10)$$

або $y = a + bx$, де

$$b = \rho \cdot \frac{S_x}{S_y},$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Отже, рівняння регресії, яке висвітлює залежність інтенсивності зносу зразків з полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 та графіту С-1 від коефіцієнта теплопровідності матеріалів має вид:

$$y_2 = a + by_1, \quad (3.11)$$

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$b = 14.744 \cdot 10^{-7}, a = 3.654 \cdot 10^{-7}$$

$$y_2 = 3,654 \cdot 10^{-7} + 14,744 \cdot 10^{-7} \cdot y_1 \quad (3.12)$$

Використовуючи дане рівняння, можливо для досліджених композиційних полімерних матеріалів підрахувати інтенсивність зносу, маючи значення коефіцієнта теплопровідності цих полімерів.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз особливостей застосування антифрикційних матеріалів на основі термостійких полімерів в автомобільній техніці.

2. Відпрацьована методика теплофізичних та антифрикційних досліджень композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.

3. Досліджено теплоємність, теплопровідність та зносостійкість композиційних полімерних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69. Встановлено, що теплоємність досліджуваних зразків полімерних композитів на основі ароматичного полііміду та графіту С-1 лінійно зростає із збільшенням температури, що є характерною особливістю лінійних полімерів і твердих колоїдних систем на їх основі. Результати досліджень показали, що під час введення в склад колоїдної системи графіту С-1, коефіцієнт теплопровідності спочатку лінійно зростає із збільшенням вмісту дисперсної фази до 30 % за масою, а потім за вмісту графіту С-1 більше 30 % за масою цей показник різко зростає, що можна пояснити утворенням теплопровідних каналів за даного вмісту графіту.

4. Отримано рівняння регресії, що відображає залежність інтенсивності зносу зразків з композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69 і графіту С-1 від коефіцієнта теплопровідності цих матеріалів. Застосовуючи дане рівняння, можна для досліджених композиційних полімерних матеріалів розрахувати інтенсивність зносу за відомого їх коефіцієнта теплопровідності. Встановлено, що зміна концентрації вуглецевого волокна з тканини ТГН-2М та вуглецевого волокна з тканини УТМ-8 мало впливають на інтенсивність зносу композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду ПМ-69.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kabat O. Determ. the influence of the filler on the propert. of struct. thermal-resist. polym. materials based on phen. C1 [Text]/O. Kab., D. Makar., O. Der., Y. Mur.//East-Europ Jour.– 2021.– № 6 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.2431002>.
2. Сіренко Г. О. Фізичні методи дослідження речовин: Ч. II. Теплофізичні методи та властивості полімерних композитів : моногр. підруч. [спец. курс лекцій. - 2-ге вид. випр., доп.] / Г. О. Сіренко, В. П. Свідерський, М. Б. Складанюк ; за ред. Г. О. Сіренка. - Івано-Франківськ : Вид. Супрун В.П., 2020. - 292 с.
3. Сіренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. доктора техн. наук. Ін-т матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ / Сіренко Геннадій Олександрович, К., – 1997. - 431 с.
4. Горбацевич Г. Н. Самозмашувальні матеріали в машинобудуванні, хімічній промисловості: минуле, сьогодення, майбутнє / Г. Н. Гобацевич // Нафтохімічний комплекс. – 2010. – № 5. – С. 1–5.
5. Сіренко Г.О. Теплофізичні властивості композиційних матеріалів на основі ароматичного полііміду, наповнених графітами / Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.В. Базюк // Полімерний журнал. – Т. 27. – № 4. – 2005. – С. 272-277.
6. Сіренко Г.О. Теплопровідність вуглетекстолітів / Г.О. Сіренко, О.С. Дробот, В.П. Свідерський // Композиційні полімерні матеріали. – 2000. – Т.22, №1. – С. 43-46.
7. Zhong C., Yang Q., Wang W. Correlation and prediction of the thermal conductivity of amorphous polymers. Fluid Phase Equilibria. 2001. Vol. 181. P. 195-202.
8. Сіренко Г.О. Вплив складу полімерної композиції на основі ароматичного поліаміду на зношування і коефіцієнт теплопровідності / Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, Л.Я. Мідак // Питання хімії і хімічної технології. – 2006. – №3. – С. 107-117.
9. Fischer J.E. Carbon nanotubes: structure and properties. Carbon Nanomaterials. 2006. P. 51-58.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Сіренко Г.О. Залежність теплофізичних властивостей полімерних матеріалів від типу і форми наповнювачів / Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.В. Караванович // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т.5. - № 3. – С. 557-563.

11. Волощук М.Ю. Теплофізичні властивості антифрикційних матеріалів на основі термостійких полімерів / М.Ю. Волощук, Л.В. Базюк // Тези допов. ІХ Всеукраїнської конференції «Сучасні проблеми хімії». – м. Київ, 14-16 травня 2008р. – Київ: Київський національний ун-т імені Т. Г. Шевченка, 2008. – С. 196.

12. Гетьманчук Ю.П., Братичак М.М. Хімія та технологія полімерів. Львів: Бескид Біт, 2006. – 496 с.

13. Зв'язок теплофізичних та антифрикційних властивостей композиційних матеріалів з концентрацією багатокомпонентних наповнювачів / Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, В.П. Свідерський, Л.Я. Мідак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – Т.7, № 2. – С. 357-366.

14. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. Eur Polym J. 2002. Vol. 38. P. 1887-1897.

15. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб./ О. І. Кушлик-Дивульська, Н. В. Поліщук, Б. П. Орел, П. І. Штабальок. – К: НТУУ «КПІ», 2014. – 212 с.

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ДОДАТКИ

					КРБМТВАТАМ 25.22156.000. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		