

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство. Відновлення та
технічний сервіс автомобілів»
Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: «**Вибір мастильних матеріалів для застосування у
конструкції автомобіля**»

Шифр КвРМТВА 022136.01.03.00

Виконав студент 4-го курсу
група МТВА 22-1
Шифр



Підпис

Назар ГЛАДКИЙ
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 10.06.2026

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.

15 04 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гладкого Назара В'ячеславовича

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: «Вибір мастильних матеріалів для застосування у конструкції автомобіля»

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 2026р. № 23 Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проекту: Матеріали практики; робочі креслення ущільнюючих елементів; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці та безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт.

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

1. Аналіз твердих мастильних матеріалів та їх вибір для застосування в конструкції автомобіля. 2. Аналіз властивостей та вибір пластичних мастил для вузлів тертя автомобільної техніки. 3. Властивості наномастил та їх переваги для застосування в конструкціях автомобілів. 4. Застосування наномастил в автомобільній техніці та інших галузях промисловості.

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.

6. Консультанти розділів роботи

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

6. Дата видачі завдання: 07.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строки виконання	Примітка
1	Аналіз твердих мастильних матеріалів та їх вибір для застосування в конструкції автомобіля.	1.05.2026	
2	Аналіз властивостей та вибір пластичних мастил для вузлів тертя автомобільної техніки.	15.05.2026	
3	Властивості наномастил та їх переваги для застосування в конструкціях автомобілів.	25.05.2026	
4	Застосування наномастил в автомобільній техніці та інших галузях промисловості.	1.06.2026	
5	Оформлення пояснювальної записки	2.06.2026	
7	Оформлення презентації бакалаврської роботи	5.06.2026	
8	Нормоконтроль бакалаврської роботи	9.06.2026	
9	Підписання розділів. Затвердження дати захисту	10.06.2026	

Студент



Назар ГЛАДКИЙ

Керівник роботи



Владислав СВИДЕРСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота студента групи МТВА-22-1 Гладкого Назара В'ячеславовича на тему: «Вибір мастильних матеріалів для застосування у конструкції автомобіля».

Обсяг роботи: 58 с., 9 табл., 10 рис., 15 джерел зі списку літератури, 1 додаток.

Актуальність. Ефективна робота механізмів у граничному та змішаному режимах змащування, особливо за умов ударних навантажень, переривчастих переміщень чи пресової посадки, неможлива без використання твердих і пластичних мастильних матеріалів.

Серед їхніх переваг вважають здатність ефективно працювати за кімнатних температур і хімічна інертність щодо пластиків, які застосовують у конструкціях сучасних машин та деталей. У якості компонентів твердих мастил використовують оксиди, фосфати, фториди металів, дисульфід молібдену та сульфіді інших металів, окрім того застосовують самі метали, графіт, нітрид бору та їх суміші. Основні експлуатаційні вимоги до пластичних мастил (ПМ) наступні: однорідність і стабільність, забезпечення заданих механічних характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які контактують з мастилом, забезпечення необхідних мастильних протизадирних та протизносних властивостей. При правильному виборі та застосуванні пластичні мастила забезпечують досить ефективний антикорозійний захист багатьох конструкційних матеріалів. Революційним напрямом у розвитку мастильних матеріалів вважають нанотехнології, що змінюють звичайні підходи до трибології та інженерних рішень. Застосування наночастинок розміром від 1 до 100 нанометрів у складі мастил відкриває величезні можливості для суттєвого зменшення тертя, підвищення зносостійкості та відповідно збільшення терміну роботи високонавантажених вузлів автомобілів.

Об'єкт дослідження – тверді, пластичні та наномастила в конструкціях автомобільної техніки.





Мета роботи – Обґрунтувати вибір мастильних матеріалів для застосування у конструкції автомобіля.

Графічна частина представлена у вигляді презентації.

Ключові слова: МЕХАНІЗМ, ТВЕРДЕ МАСТИЛО, ПЛАСТИЧНЕ МАСТИЛО, ВЛАСТИВОСТІ, ПЕРЕВАГИ, НАНОМАСТИЛО, КОНСТРУКЦІЯ АВТОМОБІЛЯ.

Зміст

Вступ.....	7
1 Тверді мастильні матеріали та їх вибір для застосування в конструкції автомобіля.....	9
1.1 Тверді шаруваті мастила.....	9
1.2 Властивості твердих шаруватих мастил	10
2 Властивості та вибір пластичних мастил для вузлів тертя автомобільної техніки.....	20
2.1 Структура та вимоги до пластичних мастил.....	20
2.1.1 Структура пластичних мастил.....	20
2.1.2 Вимоги до пластичних мастил.....	23
2.2 Ассортимент пластичних мастил.....	24
2.2.1 Мильні пластичні мастила.....	24
2.2.2 Вуглеводневі пластичні мастила.....	28
2.2.3 Органічні пластичні мастила	28
2.2.4 Полімерні пластичні мастила.....	29
2.2.5 Неорганічні пластичні мастила	29
2.2.6 Мікрокапсульні пластичні мастила	30
2.3 Властивості пластичних мастил.....	30
2.4 Вибір пластичних мастил.....	38
3 Властивості наномастил, їх переваги та вибір для застосування в конструкціях автомобіля	40
3.1 Нанотехнології в різних галузях промисловості.....	40
3.2 Механізми дії наночастинок у мастильних матеріалах.....	41
3.3 Переваги наномастил у порівнянні з традиційними мастилами.....	45

КвРМТВА 022136.01.03. 00									
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата	Вибір мастильних матеріалів для застосування у конструкції автомобіля	Літера	Аркуш	Аркушів	
Виконав		Гладкий Н. В.		10.06.20		Н		5	59
Перевір.		Свідерський В.П.		10.06.20					
Н.контр.		Бабак О.П.		10.06.20		ХНУ, група МТВА-22-1			
Затвер.		Диха О.В.		10.06.20					

3.4 Застосування наномасил в різних галузях промисловості.....	47
3.5 Екологічні аспекти застосування наномасил.....	49
3.6 Текстурування та структурування поверхонь із застосуванням нанотехнологій	50
3.7 Майбутнє нанотехнологій у сфері мастильних матеріалів.....	52
Висновки	55
Список використаних джерел	56
Додатки.....	58

					КВРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Досягнення ефективного граничного та змішаного змащувального режиму механізмів при важливих умовах експлуатації таких, як переривчасті рухи, ударні навантаження, а також пресова посадка неможливе без використання змащувальних твердих матеріалів. Тверді змащувальні матеріали можуть працювати у більш широкому діапазоні температур, а ніж мастила у вигляді рідини.

Із переваг цих мастил можна відмітити працездатність при кімнатних температурах та інертність до пластиків, що застосовуються у конструкціях деталей сучасних транспортних засобів таких, як політетрафторетилен (ПТФЕ), поліетилен та поліамід. У якості інградієнтів твердих мастил широке застосування отримали: дисульфід молібдену та сульфіді інших металів, оксиди, фосфати, фториди металів, а також безпосередньо метали, графіт, нітрид бору і їх суміші. Тверді змащувачі можуть застосовуватися у формі порошків, паст, добавок до консистентних мастил, масляних суспензій або пігментів у складі протизношувальних покриттів. Пластичні мастила (ПМ) мають відповідати наступним експлуатаційним вимогам, основними з яких вважають однорідність та стабільність, збереження заданих механічних характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які перебувають в контакті з мастилом, а також забезпечення необхідних мастильних протизадирних та протизносних властивостей.

У порівнянні з моторними оливами одними з нових вимог до пластичних мастил вважається забезпечення однорідності та збереження заданих механічних характеристик. До більшості видів пластичних мастил висувають вищі вимоги до здатності матеріалу протистояти корозії. На ці параметри впливають здатність мастила протистояти дії вологи, його вологонепроникність і вміст нейтралізувальних речовин та антикорозійних інгібіторів. Правильно підібрані та належно використані ПМ гарантують високий рівень антикорозійного захисту для більшості матеріалів конструкційного призначення.

Револьюційним напрямом в мастильних матеріалах, що трансформує звичайні

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підходи до трибології і інженерних рішень, вважають нанотехнології. Застосування наночастинок від 1 до 100 нанометрів як компонент мастил веде до безперечних можливостей зниження тертя до мінімальних значень, підвищення зносостійкості і продовження терміну застосування високонавантажених вузлів тертя. Сьогодні ця технологія вже вийшла за межі експериментальних напрацювань і впевнено зайняла своє місце в промислових застосуваннях, забезпечуючи ефекти, недосяжні для традиційних способів змащування.

Нанотехнології передбачають керування властивостями речовини на рівні атомів і молекул, коли принаймні один із розмірів матеріалу лежить у діапазоні 1–100 нм. З ціллю розуміння цього розміру – товщина волосся людини біля 80,0 нанометрів. Маніпулювання матерією на таких масштабах дозволяє створювати структури з принципово новими фізико-хімічними характеристиками. У сфері автомобільної техніки використання нанотехнологій змінює звичні виробничі підходи та матеріали, забезпечуючи суттєве покращення експлуатаційних параметрів. Це особливо проявляється в мастильних матеріалах, де наночастинки виконують роль активних функціональних присадок.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ТВЕРДІ МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ВИБІР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В КОНСТРУКЦІЇ АВТОМОБІЛЯ

1.1 Тверді шаруваті мастила

Основна особливість мастильних твердих матеріалів у тому, що дані матеріали перебувають в агрегатному стані, що виключає у випадку дотримання заданих умов експлуатації витікання їх із вузла тертя. Це надає можливість змащувати негерметизовані вузли тертя. При цьому відсутня потреба у безперервній подачі мастильного матеріалу, а отже, і в наявності необхідних для цього систем [1]. Це забезпечує одержання наступних порівняно з традиційними мастилами переваг:

- зниження витрат мастильних матеріалів;
- спрощення конструкції, а відповідно, підвищення надійності і зменшення металомісткості механізму;
- зниження експлуатаційних витрат.

До основних недоліків у порівнянні з традиційними мастилами відносять наступні проблематичні аспекти:

- відсутність відведення теплоти із зони тертя;
- недостатня фізична та хімічна стабільність;
- велика різниця величин коефіцієнтів тертя руху та спокою.

Тверді шаруваті мастила (ТШМ) – це кристалічні речовини, які володіють мастильними властивостями: графіт, дисульфід молібдену та вольфраму, броміди олова та кадмію, нітрид бору, сульфат срібла, йодиди нікелю, кадмію і вісмуту, вольфраму, титану та ін.

Тверді шаруваті мастила мають шарувату будову. Для шаруватої будови характерно: атоми в межах однієї площини, тобто одного шару, розташовані значно ближче один до одного, ніж атоми сусідніх шарів. Так, у кристалічній ґратці графіту міжатомна відстань у межах шару вуглецю становить $1,42 \cdot 10^{-10}$ м, тоді як відстань між шарами дорівнює $3,44 \cdot 10^{-10}$ м. Саме це сприяє різній міцності

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зв'язків у різних напрямках, між атомами. В результаті під дією зовнішніх сил спостерігається ковзання, зсуву сприяє накопичення адсорбованих продуктів на поверхнях кристалів.

1.2 Властивості твердих шаруватих мастил

Одним з найпоширеніших ТШМ вважається графіт. Графіт характеризується вираженими антифрикційними властивостями у парах тертя зі сталлю, чавуном та хромом, тоді як у поєднанні з міддю та алюмінієм ці властивості проявляються дещо слабше. За наявності повітря та вологи ефективність графітного мастила додатково зростає.

Окрім того, графіту присутня здатність адсорбуватися на поверхнях тертя з наступним утворенням міцної плівки, що буде орієнтована у напрямку ковзання. Утворення оксидної плівки на поверхні металу сприяє адсорбції графіту, у зв'язку з чим його застосування є найбільш ефективним для матеріалів, здатних формувати стійкі оксидні шари (хром, титан, у меншій мірі – сталь). Гранична робоча температура графітного мастила становить близько 600 °С. Висока електро- й теплопровідність цього матеріалу, зумовлена наявністю вільних електронів, забезпечує ефективне відведення електростатичних зарядів і сприяє збереженню міцності мастильного шару. Коефіцієнт тертя графіту по сталі перебуває в межах 0,04–0,08, при цьому зі зростанням навантаження та температури він має тенденцію до збільшення.

У якості ТШМ не погано себе зарекомендував дисульфід молібдену (MoS_2). Це синювато-сірий порошок з металевим блиском, який має прийнятні адсорбційні здібності у порівнянні з більшістю чорних та кольорових металів. Мастильні властивості MoS_2 зумовлені чітко вираженою шаруватою кристалічною структурою, при якій відстань між атомами сірки, розташованими в різних шарах, майже у чотири рази перевищує міжатомні відстані в межах одного шару, а також значною поляризацією атомів сірки під час тертя. При підвищенні навантаження та температури на відміну від графіту коефіцієнт тертя дисульфід молібдену

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знижується і середня величина перебуває в межах 0,05 – 0,095.

Несуча здатність мастильної граничної плівки дисульфиду молібдену перевищує аналогічний показник у всіх інших мастильних матеріалів. Дисульфід молібдену відповідає висока радіаційну стійкість, він окислюється з виділенням SO_2 за температури вище 500 °С. Серед недоліків MoS_2 слід назвати те, що йому відповідає висока хімічна активність, тому досить легко вступає у реакцію з водою та киснем. Внаслідок цього, під час контакту дисульфиду молібдену з повітрям максимально допустима температура його застосування обмежується 450 °С. Водень відновлює MoS_2 до молібдену.

Порівнюючи з дисульфідом молібдену, дисульфід вольфраму (WS_2) зазвичай більш термостійкий – 580 °С, а також стійкий до окислення та у три 3 рази має більшу несучу здатність. Варто відмітити інертність до хімічних сполук, крім фтору і його сполук. Окрім того, нетоксичний та корозійно неагресивний. Проте використання WS_2 обмежене високою вартістю. Застосування WS_2 у якості добавки до оливи ускладнене високою щільністю ($\rho - 4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), що унеможлиблює одержання однорідної суміші з оливою. Рекомендується використовувати WS_2 при температурі вище 450 °С.

Відносно нітриду кремнію характеристики наступні. Йому відповідає низький коефіцієнт тертя у парах з деталями із сталі та металокерамічними деякими матеріалами. Нітрид кремнію володіє належними механічними показниками та високою термоокислювальною і термічною стійкістю – до 1200 °С. Поєднання наведених характеристик зумовлює перспективність застосування нітриду кремнію у деталях циліндро-поршневої групи двигунів, що працюють в умовах підвищених теплових навантажень.

Нітрид бору характеризується високою термічною та термоокислювальною стійкістю, зберігаючи стабільність до температур, що перевищують 1000 °С. Водночас у літературі наведені дані щодо перспективності застосування як твердих шаруватих мастил інших сполук, зокрема селенідів і телуридів вольфраму та ніобію [2].

До класу твердих шаруватих мастильних матеріалів також належать

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фталоціаніни [2]. Фталоціаніни (міди $C_{32}H_{16}N_6C_{11}$, заліза $C_{32}H_{16}N_8Fe$ та ін.) – це поліциклічні органічні металовмісні сполуки, які мають плоскі великого розміру молекули але із слабкими міжмолекулярними зв'язками. Відмінною рисою цих сполук є здатність поряд із фізичною адсорбцією формувати на металевих поверхнях хемосорбовані плівки. Фталоціаніни характеризуються високою термічною стійкістю (до 650 °С) та радіаційною витривалістю, а також зберігають стабільність при контакті з повітрям та водою. За температур до 300 °С їхній коефіцієнт тертя перевищує аналогічні показники графіту та дисульфиду молібдену, однак зі зростанням температури до 500 °С він зменшується до рівня 0,03–0,05.

Застосування фталоціанінових покриттів на поверхні поршнів перспективних двигунів забезпечує зростання механічного коефіцієнта корисної дії та підвищує опір заклинюванню.

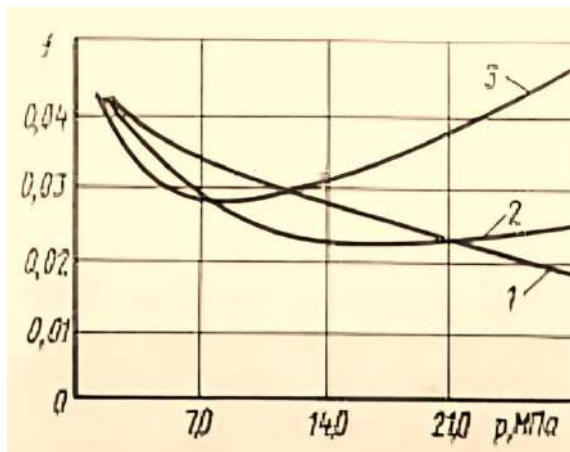
Середні величини коефіцієнтів тертя основних ТШМ приведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Середні величини коефіцієнтів тертя твердих шаруватих мастил

№	Найменування твердого шаруватого мастила	Коефіцієнт тертя
1	Дисульфід молібдену	0,05
2	Йодистий кадмій	0,06
3	Хлористий кадмій	0,07
4	Сірчаноокислий вольфрам	0,08
5	Сірчаноокисле срібло	0,14
6	Йодистий свинець	0,28
7	Графіт (середовище – вологе повітря)	0,10
8	Хлористий кобальт	0,10
9	Йодиста ртуть	0,18
10	Бромиста ртуть	0,06
11	Йодисте срібло	0,25

Залежність коефіцієнта тертя (f) твердих мастил від питомого навантаження (p) наведена на рисунку 1.1.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 – дисульфід молібдену; 2 – дисульфід вольфраму; 3 – графіт

Рисунок 1.1 – Залежність коефіцієнта тертя (f) твердих мастил від питомого навантаження (p)

Згідно з аналізом експериментальних даних, дисульфід вольфраму має найстабільніший коефіцієнт тертя залежно від величини навантаження, водночас дисульфід молібдену демонструє низькі значення коефіцієнта тертя при значних навантаженнях [3]. Під зносостійкістю розуміють час функціонування вузла тертя в установлених умовах до стирання покриття, сформованого з твердого мастила. Водночас, тверді мастила можуть використовуватися як для режимів сухого тертя, так і у складі присадок, що значно підвищують ефективність мастильних олив. Переважна більшість твердих мастил є нерозчинними у вуглеводнях, тому додають їх в моторне мастило у вигляді дисперсій колоїдних. Як наслідок, зростає довговічність вузлів тертя та знижується імовірність задирів в умовах недостатнього змащування.

Вдосконалення діючих і винайдення нових видів твердих мастил – це новий етап розробки керамічного адіабатного двигуна. Ріст теплонапруженості, тобто рівня форсування нових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) підвищує кількісні та якісні вимоги, які висувають до граничної плівки. Забезпечення цих вимог виключно за рахунок зміни властивостей моторної оливи не завжди є доцільним чи можливим з технічних і економічних причин, тому в окремих випадках під час виготовлення двигуна, поряд із застосуванням моторних олив або навіть без них, використовують покриття поверхонь тертя твердими мастильними матеріалами.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Покриття на основі двосірчастого молібдену мають достатньо хороші мастильні властивості. Дані покриття характеризуються високою хімічною та термічною стабільністю, добре поєднуються з різними видами мастил, не є токсичні та видержують навантаження до 30 МПа. В сучасному двигунобудуванні широко застосовують нанесення покриттів на основі MoS_2 на найбільш навантажені вузли тертя, зокрема елементи механізму газорозподілу, вкладиші колінчастого вала, втулки клапанів, поверхні поршнів тощо, що забезпечує підвищення ресурсу роботи деталей більш ніж на 30 %. Рекомендується з ціллю підтримки збереження покриття у процесі експлуатації додавати до мастила присадки на основі MoS_2 .

Як приклад такого покриття є паста: дисперсія дисульфід молібдену в органічній смолі з розчинником. У випадку нанесення пасту на металеві поверхні утворюється міцно скріплена з основою суха плівка, яка має довгий термін експлуатації у діапазоні температур 20 – 80 °С при достатньо високих механічних навантаженнях. Плівка має бути товщиною 5 – 15 мкм, а товстіший шар схильний до сколювання та розтріскування. М'які метали, такі як олово, індій, кадмій, мідь, свинець, золото, срібло мають низьку міцність на зріз. Завдячуючи цьому, вони можуть використовуватись у якості мастил, які тонким шаром наносять на більш міцні основи. Поведінка плівок цих металів у багатьох аспектах нагадує дію мастильних матеріалів. Окрім того, їм притаманна здатність полегшувати та прискорювати процес приробітку.

Основною вимогою, яка обумовлює можливість використання для мастил м'яких металів, є достатня адгезія до матеріалу основи і, відповідно низька адгезія до матеріалу контртіла. Наприклад, срібна плівка завтовшки 100–200 мкм, нанесена на основу гальванічним способом, характеризується високими антифрикційними властивостями та забезпечує ефективне відведення теплоти від поверхні тертя.

Змащувальні властивості притаманні окремим полімерним матеріалам, зокрема фторопласту-4 (ПТФЕ), поліетилену, політетрафторетилену, капрону, нейлону, поліаміду тощо [4]. Наносять їх на поверхню тертя у вигляді шару різної

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщини чи застосовують як пресовані вкладиші. Застосування твердих мастил на основі полімерів обмежене їх низькою термічною стійкістю, а також характерними для них малими коефіцієнтами теплопровідності й високим коефіцієнтом теплового розширення, який на порядок перевищує відповідний показник сталі.

Тверді мастильні полімерні матеріали характеризуються недостатніми механічними характеристиками, тому для досягнення потрібної міцності при середніх та високих навантаженнях їх піддають армуванню. Процес армування передбачає введення у структуру полімеру арматурних решіток, чи просочування полімером пористого матеріалу. Застосовується для армування матеріал м'якший, чим сам матеріал поверхні тертя. До речі, є практичне підтвердження успішного використання у важконавантажених підшипниках ковзання політетрафторетилену армованого.

Перспективним у застосуванні твердих полімерних мастил вважають композиційні мастильні матеріали (КММ), які представляють собою комбінацію окремих типів твердих полімерних мастил, що здатні забезпечувати в поєднанні необхідні оптимальні властивості, такі як механічна міцність та оброблюваність. Головною перевагою КММ вважають забезпечення потрібних достатніх антифрикційних і протизносних властивостей на протязі тривалого часу.

Композиційний мастильний матеріал – це механічна суміш декількох різних за характеристиками твердих речовин. При цьому, одна з них є основою і утворює структурний каркас – матрицю, що підтверджує потрібні механічні властивості. Виготовляється матриця як із полімерних, так і з металевих чи керамічних матеріалів.

У каркасі матриці закріплені матеріали, що виконують функцію наповнювача КММ, який забезпечує їх мастильні властивості. До основних переваг КММ з полімерною матрицею належать високі мастильні характеристики, хімічна інертність, вища порівняно з металами втомна міцність, мала маса, а також низька чутливість до локальних дефектів структури, таких як тріщини й надрізи.

Серед полімерних композиційних мастильних матеріалів найбільш термостійкими вважають матеріали на основі ароматичних поліамідів, які можуть

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

довгий час експлуатуватися при температурі до 450 °С.

Підтверджені основні недоліки – це низька теплопровідність, термічна стійкість, досить великий коефіцієнт термічного розширення. У КММ частіше всього застосовують поліаміди із наповнювачами, такими як графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору. Досить добрі результати показує застосування як наповнювачі порошків м'яких металів, а саме: міді, алюмінію, нікелю, молібдену тощо. КММ на металевій основі виготовляють методом пресування та спікання порошків металів (заліза, міді тощо) з подальшим просоченням сформованої пористої матриці твердими шаруватими мастилами, м'якими металами або полімерами. Для створення КММ, призначених для роботи в особливо жорстких температурних умовах, як матричний матеріал застосовують нікель, кобальт та їх сплави, а як наповнювачі – матеріали на основі молібдену чи вольфраму.

Дуже добрі властивості мають КММ на основі пористих матеріалів, які виготовлені методом спікання спресованих металевих сіток. З ціллю підвищення антифрикційних властивостей сітки виготовляють з м'яких металів. Характеристики механічні таких композицій у широких межах регулюються вибором матеріалу сітки та величиною тиску пресування. Значного поширення, зокрема для напрямних втулок клапанів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), набули КММ на металевій основі, простір пор яких заповнений фторопластом-4 з добавками сульфідів, селенідів і телуридів молібдену, вольфраму, ніобію та інших металів. У подібних композиціях тверді мастила, окрім змащувальної функції, забезпечують підвищену несучу здатність і високу зносостійкість.

Вплив питомого навантаження (p) на коефіцієнт тертя (f) металополімерних композицій приведена на рисунку 1.2 [5].

Як видно з результатів досліджень, найбільш низький і стабільний коефіцієнт тертя для металополімерних композитів в залежності від навантаження у композиту – ПТФЕ+срібло+WSe₂.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



1 – ПТФЕ+мідь+MoS₂; 2 – ПТФЕ+мідь+MoSe₂; 3 – ПТФЕ+мідь+NbSe₂; 4 – ПТФЕ+срібло+NbSe₂; 5 – ПТФЕ+срібло+WSe₂

Рисунок 1.2 – Вплив питомого навантаження (p) на коефіцієнт тертя (f) металополімерних композитів, наповнених твердими мастилами.

Залежність інтенсивності зносу від питомого навантаження для металополімерних композиційних матеріалів, наповнених твердими мастилами наведена на рисунку 1.3 [5].

За результатами експериментальних досліджень можна зробити висновок, що найкращу зносостійкість має композиційний матеріал – ПТФЕ+мідь+NbSe₂.

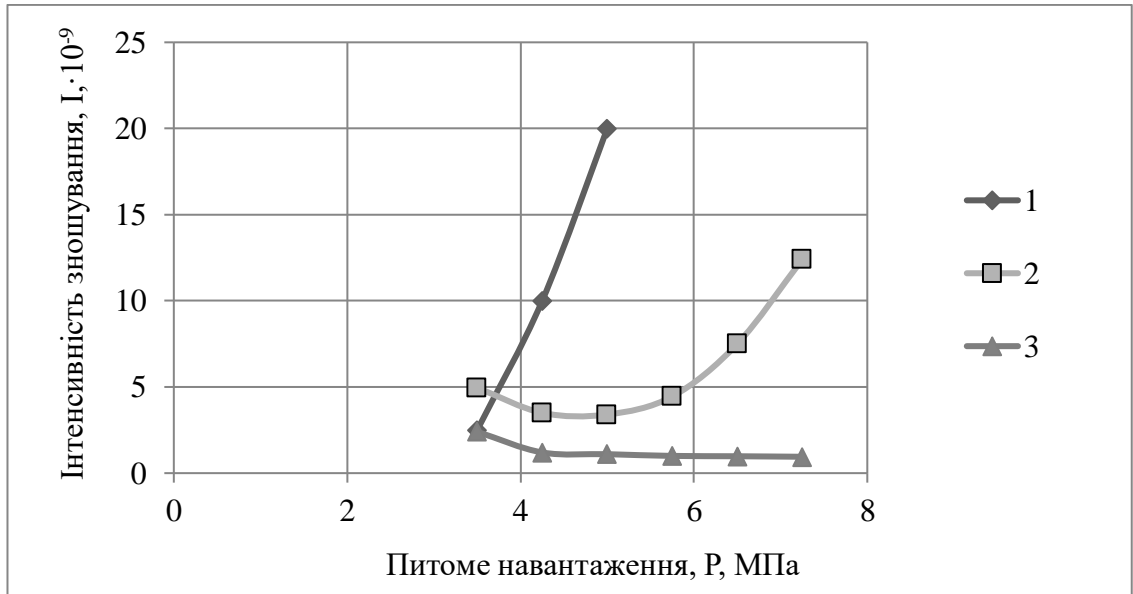
Отже, правильно підібрані компоненти, які входять до композиційного мастильного матеріалу, забезпечують достатньо високу несучу здатність при необхідних антифрикційних властивостях та мінімальному зношуванню вузла тертя (рисунки 1.2,1.3).

При цьому температура робочих мастил обмежується допустимою температурою експлуатації композиційного матеріалу з металевою основою.

Вплив складу графіту (C) на міцність при стиску композиційних полімерних матеріалів приведена на рисунку 1.4 [6].

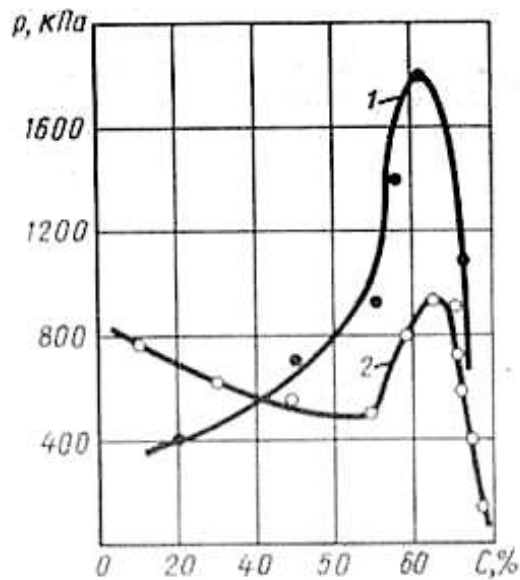
Аналіз одержаних результатів вказує на те, що максимальну міцність при

стиску досліджені полімерні матеріали мають при 61–63 % графіту.



1 – ПТФЕ+мідь+MoS₂; 2 – ПТФЕ+мідь+MoSe₂; 3 – ПТФЕ+мідь+NbSe₂

Рисунок. 1.3 – Залежність інтенсивності зносу від питомого навантаження для металополімерних композиційних матеріалів, наповнених твердими мастилами.



1 – основа полівінілхлорид; 2 – основа бакелітова смола

Рисунок 1.4 – Вплив складу графіту (C) на міцність при стиску (p) композиційних полімерних матеріалів.

З ціллю одержання керамічних матриць композиційного мастильного матеріалу застосовують оксиди берилію, цирконію та інших металів [6]. КММ з керамічною основою характеризуються високою хімічною і термічною стійкістю. Проте є і недоліки даних мастильних матеріалів – це низька міцність та крихкість при розтягу.

На базі КММ створюють вузли тертя – включно з корінними вкладишами та поршневыми кільцями – які протягом усього ресурсу двигуна не потребують заміни. За умови ефективного відведення тепла такі вузли здатні тривалий час функціонувати без додаткового змащування. Крім того, більшість КММ сумісна з рідкими та пластичними мастильними матеріалами, що дозволяє застосовувати їх у підшипниках ковзання двигунів внутрішнього згорання. Це надає можливість значно підвищити надійність двигуна, особливо у режимі мастильного голодування.

До прикладу, для вкладок корінних та шатунних підшипників рекомендовано застосовувати композиційний матеріал з мідно-молібденовою основою ($\text{CuO} + \text{MoS}_2$). А для підшипників розподільного валу використовують вкладиші з пористих металокерамічних композицій, в основі яких м'які метали, що насичені твердим фталоціаніновим мастилом. Виготовляють матеріал у вигляді сталевій стрічки, на поверхню якої методом спікання нанесено тонкий шар сферичних частинок пористої олов'янистої бронзи, що просочені сумішшю фторопласту та свинцю. При цьому сталева основа забезпечує необхідну міцність підшипника, бронзовий шар – ефективне відведення теплоти, а композиція тефлону зі свинцем – високі мастильні властивості.

Отже, встановлено, що перспективними є мастильні композиційні матеріали на основі пористих структур, отриманих шляхом спікання пакета спресованих металевих сіток. У таких композиціях тверде мастило, окрім змащувальної функції, забезпечує високу несучу здатність і підвищену зносостійкість. При застосуванні твердих мастильних матеріалів, поряд з їх експлуатаційними властивостями, потрібно також враховувати економічні чинники, зокрема вартість.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИБІР ПЛАСТИЧНИХ МАСТИЛ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

2.1 Структура та вимоги до пластичних мастил

2.1.1 Структура пластичних мастил

Пластичні мастила (ПМ) – це рідкі оливи, які спеціально загущені для надання необхідних експлуатаційних характеристик, що не можуть бути забезпечені рідкими та твердими мастилами. За своєю фізичною структурою пластичні мастильні матеріали є колоїдними мікронеоднорідними системами, що складаються з дисперсійного середовища та дисперсної фази. Роль дисперсійного середовища виконують рідкі компоненти з добрими мастильними й антикорозійними характеристиками, тоді як дисперсна фаза представлена твердими речовинами, призначеними для стабілізації системи та зменшення рухливості рідкої складової шляхом її загущення.

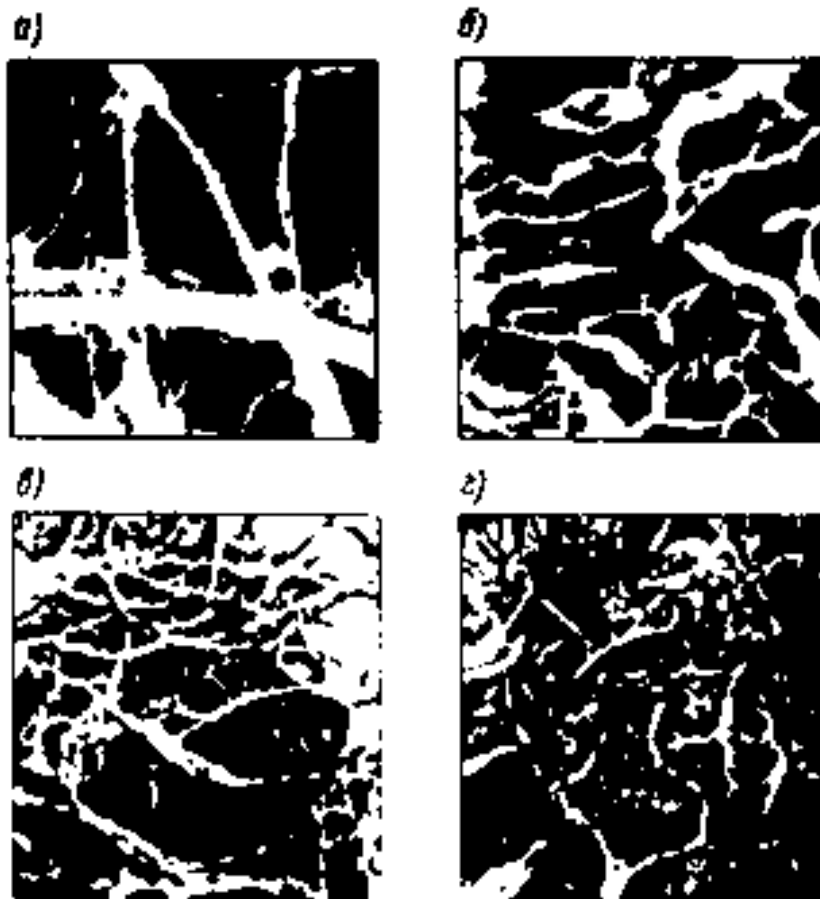
Речовину, яка формує дисперсну фазу, називають загусником. Його дія полягає в утворенні у об'ємі мастильного матеріалу просторового структурного каркаса, у внутрішніх комірках якого рідина утримується завдяки міжмолекулярній взаємодії між частинками дисперсної фази та дисперсійного середовища.

Структурований каркас пластичного мастильного матеріалу визначально впливає на його основні властивості. Характер цієї структури зумовлюється природою загусника. Частинки загусника, як правило, мають ниткоподібну або стрічкоподібну форму з великим співвідношенням довжини (яка може сягати десятків часток міліметра) до діаметра, що вимірюється десятими частками мікрометра (рисунок 2.1) [7]. Саме така геометрія частинок загусника зумовлює надзвичайно велику площу їх контакту з оливою (до тисяч квадратних метрів на грам речовини) і, як результат, значну частину адсорбційних сил, що зв'язують загусник з оливою. Саме ці сили забезпечують стійкість та нерозшаровуваність мастильного матеріалу, яку прийнято характеризувати як його колоїдну

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільність.

В залежності від призначення розрізняють наступні антифрикційні мастильні матеріали: призначені для зменшення тертя та зниження зношування у вузлах та механізмах; консерваційні, тобто захисні, запобіжні; призначені для захисту від корозійного впливу; ущільнювальні полімерні матеріали для герметизації зазорів у механізмах.



а – барієве мило; б – стронцієве мило; в – літієве мило; г – кальцієве мило

Рисунок 2.1 – Структура пластичних мастил ($\times 1 \cdot 10^4$) із загущувачем

Переважна більшість сучасних пластичних мастил, задовольняючи вимогам за своїм прямим призначенням, володіють також ще й певними характеристиками, що допускають їх застосування і за іншими призначеннями. В деяких випадках антифрикційні ПМ можна застосовувати і як консерваційні чи ущільнювальні.

Відомі також ПМ, для яких характерні спеціальні властивості. Слід назвати:

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

електропровідні властивості пластичних мастил, які мають призначення забезпечити ефективний електричний контакт між поверхнями; фрикційні матеріали – для збільшення тертя між поверхнями з ціллю запобігання прослизання між ними; припрацьовуючі матеріали – з ціллю поліпшення припрацьовання поверхонь та інші.

В залежності від характеру та міцності каркасу, що створена загусником, розрізняють консистентні, напіврідкі та рідкі пластичні мастила. Зрошені елементи загусника в консистентних мастил створюють безперервну структурну основу, комірки якої наповнені рідкою оливою. Структурна основа має свої конкретні механічні характеристики, а саме: вона може пружно деформуватися при дії незначних навантажень, а це надає мастилам пластичність. Напіврідкі мастила різняться від консистентних тим, що у них зв'язки між елементами основи, а значить і її міцність незначна, тому вони легко порушуються при дії незначних сил та знову відновлюються.

В рідких мастильних матеріалах частки загусника не зв'язані практично один з одним. Гальмуючи рух рідкої фази, вони рівно розподілені у мастилі і надають йому густу консистенцію. За обсягом виробництва найпоширенішими у техніці є пластичні мастила, тому подальше будемо аналізувати переважно даний тип мастила. Розглядати також як пластичні можна напіврідкі та рідкі мастила, але із зниженою міцністю структурної основи. Властивості дисперсної фази загусника зумовлюють ключові фізичні характеристики пластичних мастил, зокрема їх колоїдну стабільність, термо- та вологостійкість, опір механічним навантаженням тощо. Класифікацію пластичних мастил здійснюють за типом загусника. Найпоширенішими є солі високомолекулярних жирних кислот (літієві, алюмінієві, натрієві, кальцієві та ін.), відомі як мильні загусники, а також тверді вуглеводні такі, як парафін та церезин.

Останнім часом зростає застосування пластичних мастил, у яких функцію загусника виконують пігменти, кристалічні полімери та неорганічні гідрофобізовані матеріали – силікагель, бентонітові глини, технічний вуглець й інші порошкоподібні речовини.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мастило, а це дисперсійне середовище, яке формує антифрикційні, протизносні, протизадирні та низку інших експлуатаційних властивостей ПМ. Загущувач здатний доповнювати й підсилювати функціональні властивості оливи. Рідини, що використовуються як дисперсійне середовище для ПМ, мають характеризуватися пологою в'язкісно-температурною залежністю, низькою випаровуваністю, а також високою термічною й хімічною стабільністю. Останнім часом для даної мети застосовують нафтові оливи. Для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик ПМ доцільне використання синтетичних рідин, таких як фторвуглеців, полісилоксанів, полігліколів, діефірів. В пластичні мастила додають різні присадки, наповнювачі, які регулюють структуру. Крім того, вони покращують експлуатаційні характеристики ПМ, підвищують стабільність мастильних та захисних властивостей.

Особливу роль у підвищенні експлуатаційних властивостей ПМ за умов високих навантажень, температур і швидкостей відносного переміщення поверхонь тертя відіграють наповнювачі, насамперед найефективніші тверді шаруваті імастила – дисульфід молібдену та графіт. Також застосовують і деякі сульфіди, йодиди та оксиди металів. Введення до складу ПМ високодисперсних порошків м'яких металів зумовлює плакування сталевих поверхонь, що приводить до зменшення коефіцієнта тертя та підвищення допустимого навантаження. В окремих різновидах ПМ вміст наповнювачів перевищує 20 відсотків. За раціонального поєднання присадки й наповнювача можна добитись істотного поліпшення мастильних властивостей ПМ. Це обумовлено їхньою сумісною дією: хімічним модифікуванням поверхонь тертя присадкою та зміцненням граничного шару частинками наповнювача. Адсорбція присадки на частинках наповнювача додатково знижує опір зсуву, а отже і знижує втрати на тертя.

2.1.2 Вимоги до пластичних мастил

Пластичні мастила мають відповідати ряду експлуатаційних вимог, основні з яких: однорідність та стабільність, забезпечення необхідних механічних

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик, незначний вплив на конструкційні матеріали, які контактують із мастилом, а також збереження заданих мастильних протизадирних і протизносних характеристик [8]. В порівнянні з моторними олівами, до ПМ висуваються нові вимоги, зокрема щодо збереження однорідності та забезпечення заданих механічних характеристик. Для більшості видів ПМ встановлюють підвищені вимоги до антикорозійних властивостей. Ці характеристики визначаються вологостійкістю й вологонепроникністю мастила, наявністю у його складі нейтралізувальних компонентів, інгібіторів корозії. За правильного добору й застосування ПМ забезпечують надійний антикорозійний захист більшість конструкційних матеріалів.

2.2 Ассортимент пластичних мастил

2.2.1 Мильні пластичні мастила

Поділяють пластичні мастила в залежності від виду загусника на мильні, вуглеводневі, органічні та неорганічні [8]. Загусниками мильних ПМ є солі вищих жирних кислот – мила. Для виробництва таких ПМ застосовують природні жири рослинного й тваринного походження або синтетичні жирні кислоти. Відповідно мильні ПМ класифікують на жирові та синтетичні. Мила, одержані з твердих природних жирів, характеризуються вищими експлуатаційними показниками. Мильні загусники переважно використовують під час виготовлення антифрикційних ПМ. Залежно від типу загусника ПМ поділяють на кальцієві, натрієві, літієві, барієві та інші. Кальцієві ПМ характеризуються високою вологостійкістю, що зумовлює їх застосування в умовах підвищеної вологості та при контакті з водою, а також доброю колоїдною стабільністю. Разом із тим через відносно низькі показники низки експлуатаційних властивостей вони поступово замінюються більш якісними ПМ. До кальцієвих ПМ належать солідоли, які застосовують як мастила масового призначення. Використовують солідоли таких марок:

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- а) УС-1 – прес-солідол, жировий солідол; застосовується для вузлів тертя і мастило вводиться під тиском, температура краплепадіння не нижче 75 °С, діапазон роботи у межах температури від -40 до +50 °С;
- б) УС-2 – жировий солідол; використовують для підшипників ковзання та кочення, гвинтових та ланцюгових передач, шарнірів, температурний діапазон в межах -25 до +50 °С, температура краплепадіння не нижче 75 °С;
- в) С – синтетичний солідол; температурний діапазон експлуатації від -25 до +50 °С, температура краплепадіння не нижче 80 °С;
- г) прес-солідол С – синтетичний солідол; температура краплепадіння не нижче 80 °С, температурний діапазон роботи від -40 до +50 °С, застосовують для змащення вузлів тертя, в яких мастило вводиться під тиском;
- д) УСсА – синтетичний солідол, в склад якого входить графіт грубого подрібнювання.

Прес-солідоли УС-1 і С мають м'якшу структуру порівняно з солідолами УС-2 та прес-солідолом С, що спрощує їх подавання через прес-маслянки.

До кальцієвих мастил належить мастило марки ЦІАТІМ-208. Промисловістю випускають комплексні кальцієві мастила, які у порівнянні із солідолами характеризуються підвищеною термічною стабільністю – вище 200 °С. Це дає можливість застосовувати їх при температурах до 160 °С і з необхідними протизносними та протизадирними властивостями. Серед цих мастил найбільш поширені такі марки: "Уніол-1", "Уніол-2", ЦІАТІМ-221, "Уніол-3" та "Уніол-3М". "Уніол-3" та "Уніол-3М" отримані із суміші малов'язких мастил, завдяки цьому мають хороші низькотемпературні характеристики. У мастило "Уніол-М" введено дисульфід молібдену.

Натрієві пластичні мастила здатні працювати за вищих температур, ніж кальцієві. За обсягами виробництва вони посідають друге місце після кальцієвих ПМ. Основними недоліками натрієвих пластичних мастил є низька вологостійкість. Вона зумовлена їх значною розчинністю у воді. Також незадовільні низькотемпературні властивості, через що їх не рекомендують застосовувати за температур нижче -20 °С. До натрієвих пластичних мастил відносять широко

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

використовувані антифрикційні мастила – консталіни.

Консталіни жирові виготовляють марки УТ-1 та УТ-2, температура краплепадіння яких не нижче 150 °С. Вони представляють собою тугоплавкі антифрикційні мастила, а температурний діапазон роботи перебуває у межах від мінус 10 до плюс 115 °С.

До натрієвих та натрієво-кальцієвих пластичних мастил відносяться такі марки 1-13, АМ, ЯНЗ-2, КСБ. Останнім часом мастила 1-13 та АМ замінюють вдосконалішим пластичним мастилом типу "Літол-24". Мастило марки ЯНЗ-2 за своїми властивостями близьке до "Літол-24". Мастило марки КСБ, завдячуючи добавці дисперсної міді, характеризується значною електропровідністю. Натрієві та натрієво-кальцієві мастила не можуть бути використані як консерваційні із-за низької вологостійкості. Натрієво-кальцієві КМ за термостійкістю і вологостійкістю перебувають у проміжному положенні між кальцієвими та натрієвими пластичними мастилами.

Літієвим мастилам відповідають прийнятні низько- та високотемпературні властивості, діапазон роботи за температури від -50 до +130 °С. Крім того, хороші механічні характеристики, дане мастило у воді не розчиняється, а це дає можливість застосовувати їх у різних галузях техніки. Перспективними вважають літієві мастила на синтетичних оливах.

З літієвих ПМ найбільш поширені наступні.

"Літол-24" – антифрикційна водостійка, консерваційна мастильна композиція; температура краплепадіння не нижче 175 °С, діапазон роботи при температурі від -40 до +130 °С, рекомендована для підшипників кочення та ковзання, а також зубчастих передач.

ЦІАТІМ-201 – низькозамерзаюче антифрикційне мастило; температура краплепадіння не нижче 175 °С, застосовують для вузлів тертя, які працюють при малих навантаженнях.

"Фіол-1" – мастильна композиція, склад якої близький до "Літол-24"; проте у порівнянні з ним володіє кращими низькотемпературними характеристиками, нижчою в'язкістю і меншою межею міцності.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

"Фіол-3" – мастильна композиція, яка за своїми основними характеристиками практично ідентична "Літол-24".

"Фіол-2" мастило, властивості якого проміжні між "Фіол-1" та "Фіол-3".

"Фіол-2М" на відміну від "Фіол-2" характеризується вищими антифрикційними та адгезійними властивостями через наявність спеціальної антифрикційної присадки і добавки 2 % сульфиду молібдену.

ЛС-15 на відміну від "Літол-24" має збільшену кількість антиокислювальної присадки та хороші консерваційні характеристики.

ЛЗ-31 – високостабільна мастильна композиція, що отримана на складних ефірах та має низьку вологостійкість.

"Северол-1" – антифрикційна мастильна композиція, низькозамерзаюча з діапазоном роботи при температурі від -50 до +120 °С.

Н-158 – високостабільна мастильна композиція, діапазон працездатності у межах температури від -30 до +150 °С, призначається для підшипників автотракторного електроустаткування.

Для барієвих пластичних мастил характерна висока температура краплепадіння, а також вологостійкість та механічна стабільність. Незважаючи на відносно високу вартість, мають хороші перспективи у застосуванні. Одне з ефективних барієвих ПМ є мастило ШРБ-4. Це пластичне мастило здатне працювати у діапазоні температур від -40 до +150 °С, характеризується високими антифрикційними і консерваційними властивостями та майже не має впливу на резинотехнічні вироби.

Свинцеві пластичні мастила з добавками сірковмісних сполук характеризуються високою ефективністю щодо запобігання задирам. Водночас суттєвим обмеженням застосування всіх мильних пластичних мастил є їхня нездатність після розплавлення при наступному охолодженні знову формувати початкову структурну сітку. Це не дає можливості їх повторно використовувати після розплавлення. Тому мильні пластичні мастила не рекомендовано наносити на поверхні тертя та подавати до них в розплавленому вигляді. Саме цей недолік відсутній у вуглеводневих ПМ.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2.2.2 Вуглеводневі пластичні мастила

Вуглеводневі пластичні мастила розглядають як оливи, які у своєму складі містять певну кількість високоплавких вуглеводнів. Одержують їх методом загущення високов'язких рідких нафтових олив парафінами і церезинами. Вони відзначаються високою хімічною стійкістю та опором до дії вологи, що разом із можливістю нанесення у розплавленому вигляді, з наступним відновленням структури й експлуатаційних властивостей після охолодження, зумовлює їх переважне використання як консерваційних пластичних мастил. Найбільш поширеною вуглеводневим мастилом вважають консерваційне мастило ПВК. Температура працездатності його 50 °С. Змащення ним має призначення консервації виробів переважно чорних та кольорових металів для зберігання на складах чи відкритих майданчиках терміном до десяти років.

До вуглеводневих консерваційних мастил також належать ГОІ-54, гарматне мастило (УНЗ), технічний волокнистий вазелін ВТВ-1, що використовується для змащення затискачів акумуляторів, а також низка інших.

2.2.3 Органічні пластичні мастила

Головним недоліком мильних і вуглеводневих пластичних мастил є їх порівняно низька термічна та хімічна стійкість, що звужує можливості застосування таких мастил. Нині розроблено нові типи загусників на основі органічних сполук, які характеризуються високою термічною й хімічною стабільністю та не прискорюють процеси окиснення олив [9]. До органічних пластичних мастил відносять фталоціанінові, полімерні та фторвуглецеві. Фталоціанінові ПМ характеризуються тривалою працездатністю при температурах понад 180 °С, мають чудові антиокислювальні властивості у порівнянні із іншими ПМ, відрізняються достатньою колоїдною стабільністю та високою вологостійкістю. Це зумовлено тим, що фталоціанінові пігменти, які в таких мастилах виконують функцію загусника, належать до найстійкіших комплексних

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сполук і практично не зазнають окиснення на повітрі за температур нижчих за 330 °С. На основі даних мастил передбачається розроблення так званих «вічних» мастил, які закладаються у вузол тертя на весь термін його експлуатації.

2.2.4 Полімерні пластичні мастила

Полімерні пластичні мастила — це мастильні матеріали, у яких роль загусників виконують тверді високомолекулярні полімери, зокрема поліетилен, поліпропілен, політетрафторетилен, політрифторхлоретилен тощо. Фторовуглецеві пластичні мастила являють собою системи, одержані загущенням рідких фторовуглецевих полімерів тонкодисперсними твердими фторовуглецевими полімерами. Вони характеризуються найвищою хімічною стабільністю та здатні працювати в умовах безпосереднього контакту з рідким і газоподібним воднем, киснем, оксидами азоту, галогенами, галогеноводнями та іншими агресивними середовищами [10].

2.2.5 Неорганічні пластичні мастила

За умов підвищених температур і дії агресивних середовищ практично єдиним видом пластичних мастил, що зберігає працездатність, є мастила з неорганічними загусниками. Наразі відомий широкий спектр неорганічних загусників, значна частина яких одночасно належить до твердих мастил. До них, зокрема, відносять графіт, дисульфід молібдену, глини, технічний вуглець, слюду, силікагель, силікати, сульфати, сульфіди, оксиди та гідроксиди металів тощо. До такого типу мастил відносяться ВНІНП-262, -264, -279.

Для збереження працездатності неорганічних мастил за високих температур у них як дисперсійне середовище застосовують високоякісні синтетичні оливи. З метою надання рідкій фазі необхідних властивостей або підсилення наявних характеристик до її складу вводять потрібні присадки.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.6 Мікрокапсульні пластичні мастила

Розглядається даний вид мастил як різновид ПМ. Мікрокапсульні мастила (МПМ) в своєму складі мають окремі дрібні капсули, розмір цих частинок від кількох мікрометрів до 1–2 мм. Капсула являє собою мастильний матеріал (переважно високоякісне мастило), поміщений у достатньо міцну полімерну оболонку. За дії певних механічних або теплових навантажень оболонка руйнується, і вивільнене мастило надходить безпосередньо на поверхню тертя. Мікрокапсульні пластичні мастила органічно поєднують переваги пластичних мастил і рідких олив. Особливо суттєвим є те, що в таких мастилах мастильний матеріал ізольований від навколишнього середовища і, відповідно, не забруднюється та зберігає стабільні властивості до моменту його безпосередньої подачі в зону тертя.

2.3 Властивості пластичних мастил

До ключових експлуатаційних характеристик пластичних мастил належать стабільність, механічні властивості, в'язкісно-швидкісні та в'язкісно-температурні показники, а також мастильні, захисні й герметизувальні функції [10]. Вимоги до рівня цих властивостей визначаються призначенням мастила та конкретними умовами його використання. Стабільність пластичних мастил характеризує їхню здатність зберігати задані фізико-хімічні параметри протягом певного часу під дією зовнішніх чинників, таких як тривале зберігання, коливання температури, механічні навантаження, радіаційне опромінення тощо. Залежно від характеру впливів розрізняють фізичну, хімічну та радіаційну стабільність пластичних мастил.

Стабільність фізична характеризує здатність пластичних мастил підтримувати встановлену консистенцію. У разі порушення структури суміші зменшується пластичність, а також погіршуються антифрикційні й захисні консерваційні властивості ПМ. Втрата консистенції зумовлена скороченням частки

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рідкої фази – оливи у складі ПМ. Це проходить із-за випаровування низькокиплячих компонентів, які входять до складу ПМ, та за недостатньої стабільності дисперсної системи "загусник – олива". Підвищення випаровуваності пластичних мастил спричиняє зростання вмісту загусника, що в крайньому випадку приводить до втрати пластичності його та утворення кірки на зовнішній поверхні. Спроможність ПМ зберігати свої експлуатаційні властивості за умов випаровування складових компонентів характеризується її антивипарними властивостями.

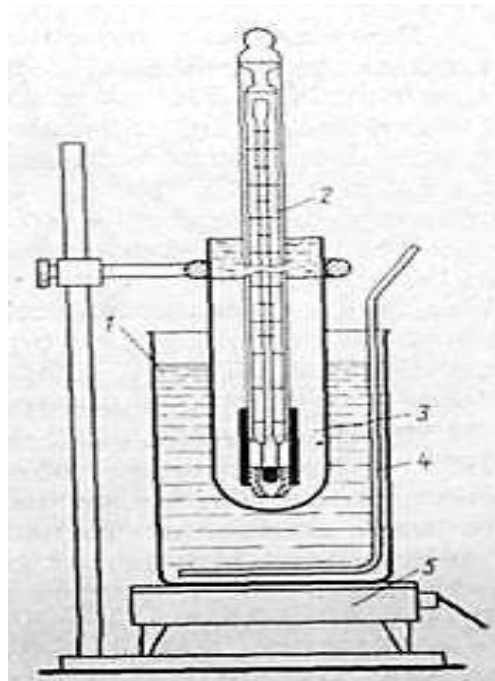
Здатність ПМ зберігати початкову дисперсійну систему характеризується колоїдною стабільністю. Вона визначається спроможністю ПМ підтримувати дисперсну структуру під дією механічних навантажень і істотно залежить від температурних умов. Порушення стабільності колоїдної характеризується величиною синерезису. Синерезис – це явище, що полягає у відокремленні рідини з колоїдної системи. Синерезис можна пояснити таким чином: сили взаємного притягання між волокнами загусника приводять до їх зближення, скорочують величину елементарного структурного осередку, яку займає олива, а отже, олива витісняється в довкілля. Коли ПМ не навантажена зовнішніми силами, вказаний ефект зумовлює "потіння" – мимовільне виділення оливи з ПМ. При навантаженні ПМ зовнішніми силами вони інтенсифікують стиск елементарних осередків – виділення оливи посилюється. У граничному випадку через порушення колоїдної стабільності ПМ можуть перетворитися на грудки загусника, що плавають в мастилi.

В результаті синерезису погіршуються характеристики і знижується експлуатаційний ресурс пластичних мастил. На ряду з цим деяка величина синерезису є корисною та потрібною, а саме: завдячуючи синерезису спостерігається підживлення постійне поверхонь тертя мастилом, що поступає із мастильного резервуара, яким є шар мастила, нанесений на поверхню. Колоїдну стабільність та випаровуваність пластичних мастил визначають у стандартних умовах та оцінюють за кількістю речовини, що випарувалася при визначенні випаровуваності, чи виділилася з мастила при оцінюванні колоїдної стабільності.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Із підвищенням температури механічні властивості мастил погіршуються. А при досягненні конкретної, характерної для кожного виду пластичних мастил температури, спостерігається порушення структури каркасу та зниження адгезійних сил, що зв'язують оливу з загусником. Даний процес веде до порушення колоїдної стабільності та виділенням рідкої фази, тобто плавленням пластичних мастил.

Можливість пластичного мастила зберігати свої властивості при підвищенні температури визначається його температурною стабільністю. Температурну стабільність пластичних мастил визначає температура початку плавлення, яка зовні визначається за появою першої краплі рідини або температури краплепадіння (рисунок 2.2).



1 – стакан з водою; 2 – спеціальний термометр; 3 – пробірка; 4 – мішалка; 5 – нагрівальний елемент

Рисунок 2.2 – Прилад для визначення температури краплепадіння пластичних мастил

Сповзання пластичних мастил з поверхонь, на які вона нанесена, може відбуватися під дією об'ємних інерційних та гравітаційних сил ще до досягнення температури краплепадіння. Таке явище називають пристінним синерезисом, воно

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

зумовлене підвищенням концентрації рідкої оливи у пристінному шарі.

У результаті пристінного синерезису температура експлуатації пластичних мастил, що довгий час витримують дію об'ємних сил, має бути нижчою, а ніж температура краплепадіння (десь на 20 °С). Таку температуру вважають температурою сповзання. Залежить дана температура безперечно від товщини шару ПМ, який нанесений на стінку. Вона знижується із збільшенням товщини нанесення, саме тому ПМ не бажано наносити дуже товстим шаром.

Хімічна стабільність ПМ характеризується здатністю зберігати свої характеристики під дією хімічно активних агентів, при цьому найпоширенішим чинником її порушення є процеси окислення мастильного матеріалу. При окисленні спостерігається зміна механічних властивостей, таких як: межі міцності, в'язкості пластичних мастил і накопичення у ньому агресивних корозійних речовин. Схильність ПМ до окислення посилюється зі зниженням товщини мастильного шару, підвищенням температури, а також при контакті з кольоровими металами (оловом, міддю, свинцем тощо). Найефективнішим шляхом підвищення хімічної стабільності ПМ є введення антиокислювальних присадок, зокрема аміно- та феноловмісних сполук, а також органічних продуктів, що містять фосфор і сірку.

Фізична структура та специфіка будови ПМ обумовлюють їх порівняно низьку радіаційну стійкість. Метали, присутні в ПМ, набувають наведеної радіоактивності та сприяють зростанню дози опромінення, яку отримує рідка фаза після припинення дії зовнішнього випромінювання.

Саме наявність агрегатного стану ПМ зумовлює у них специфічні механічні властивості, що різнять їх від властивостей твердих і рідких тіл. До характерних рис механічної поведінки ПМ належать значна залежність міцності від температури, здатність відновлювати міцність після руйнування, а також залежність міцності від тривалості інтервалу між послідовними навантаженнями — так званого «часу відпочинку».

Такі властивості можна пояснити в основному характером порушення зв'язків між часточками загусника та наступним відновленням структури.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Здатність ПМ, подібно до інших дисперсних систем, самочинно відновлювати зруйновану структуру називають тиксотропією. Властивості тиксотропні ПМ мають важливе експлуатаційне значення. Позитивний ефект тиксотропії полягає в тому, що частинки розрідженої ПМ, викинуті із зони тертя та осаджені на нерухомих поверхнях, підвищують в'язкість і тим самим автоматично герметизують вузол тертя, запобігаючи витіканню мастильного матеріалу. Механічні властивості ПМ визначаються межею міцності. Під дією навантажень відносно жорстка структурна основа ПМ здатна до певної межі оборотно деформуватися, подібно до твердого тіла. На початковому етапі такі деформації мають пружний характер і не супроводжуються руйнуванням основи. За подальшого зростання деформації відбувається її руйнація, внаслідок чого властивості ПМ дедалі більше наближаються до властивостей в'язкої рідини. (рисунок 2.3) [10].



а – до механічної дії; б – після інтенсивної механічної дії

Рисунок 2.3 – Мікроструктура мастила ЦІАТІМ-210 ($\times 1 \cdot 10^4$)

Мінімальну напругу, за якої розпочинається руйнування структурного каркасу, вважають межею міцності ПМ. Значення цієї межі визначає здатність ПМ втримуватись у заданому місці при дії зовнішніх сил, а також визначає величину початкового зусилля зсуву безпосередньо у вузлі тертя. Межа міцності істотно залежить від типу та концентрації загусника. За повторних навантажень зі скороченням інтервалу між ними послідовно вимірюване значення межі міцності

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшується. Підвищення температури також призводить до зниження межі міцності більшості ПМ. Температура, за якої межа міцності прямує до нуля, відповідає переходу ПМ із пластичного стану у рідкий і визначає верхню температурну межу її працездатності. Пружні властивості ПМ залежать не лише від величини прикладеного навантаження, а й від тривалості його дії. Інтервал часу, протягом якого ПМ під навантаженням зберігає пружну поведінку, вважають періодом релаксації.

Прилад під назвою пластовіскозиметр визначає вязкість та межу міцності ПМ. Цей спосіб полягає у визначенні опору між нерухомим корпусом приладу та обертовим сердечником, який спричиняє мастило.

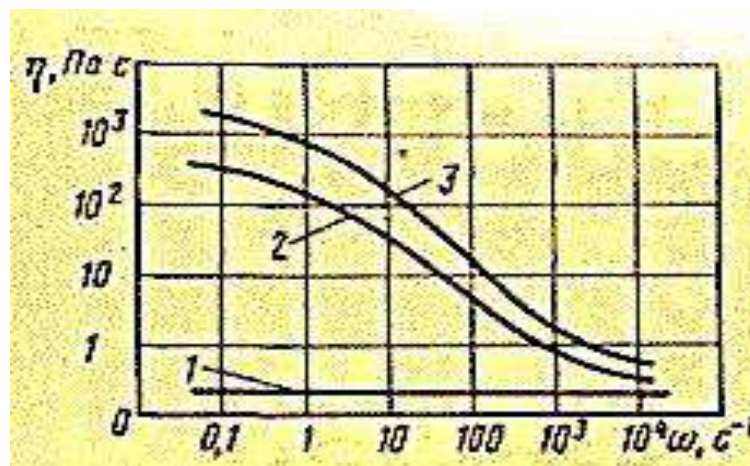
В'язкісні характеристики ПМ зумовлюють величину втрат на тертя в робочих режимах, умови запуску руху у вузлах тертя за низьких температур, а також зусилля й енергетичні витрати, необхідні для подачі мастила мастилопроводами до зон тертя. В реальних вузлах тертя навантаження, що діють на ПМ, зможуть перевищити її межу міцності, і при досягненні цієї межі мастило переходить у стан течії. В даному діапазоні властивості її можна охарактеризувати в'язкістю. Але поняття в'язкості в даному випадку має специфічний характер. В'язкість однорідних рідин визначається градієнтом швидкості зсуву та залежить виключно від їх фізико-хімічних властивостей. На відміну від таких систем, у внутрішньому об'ємі ПМ, окрім рідкої фази у вигляді оливи, присутні тверді часточки зруйнованого каркасу, між якими безперервно формуються й розриваються силові зв'язки. Стан динамічної рівноваги між процесами утворення та руйнування цих зв'язків обумовлюється швидкістю деформації: зі зростанням останньої процеси руйнування зв'язків починають переважати над їх утворенням.. Виникнення зв'язків відповідає збільшенню в'язкості, а руйнація – зниженню в'язкості.

Додатковим чинником зменшення в'язкості зі зростанням швидкості деформації є орієнтація фрагментів структурного каркаса загусника вздовж напрямку течії. За достатньо високих швидкостей руху зв'язки між частинками загусника майже повністю руйнуються, унаслідок чого подальше зниження

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкості зі збільшенням швидкості вже не відбувається. За цих умов в'язкість перестає залежати від швидкості деформації, і ПМ проявляє властивості ньютонівської рідини.

Оцінюється швидкість деформації градієнтом швидкості зсуву dv/dh , де v – швидкість переміщення відносного шарів мастила; h – відстань між ними. В'язкісно-швидкісною характеристикою вважають залежність зміни в'язкості від градієнта швидкості деформації (рисунки 2.4, 2.5) [10]. У випадку, коли більше відношення в'язкості при різних швидкостях зсуву (чим крутіша в'язкісно-швидкісна характеристика), тим вища буде якість ПМ. Пластичне мастило з 10 процентним відсотком загущувача має кращі властивості, а ніж мастило із 3 процентним загущувачем (рисунок 2.4) [10].

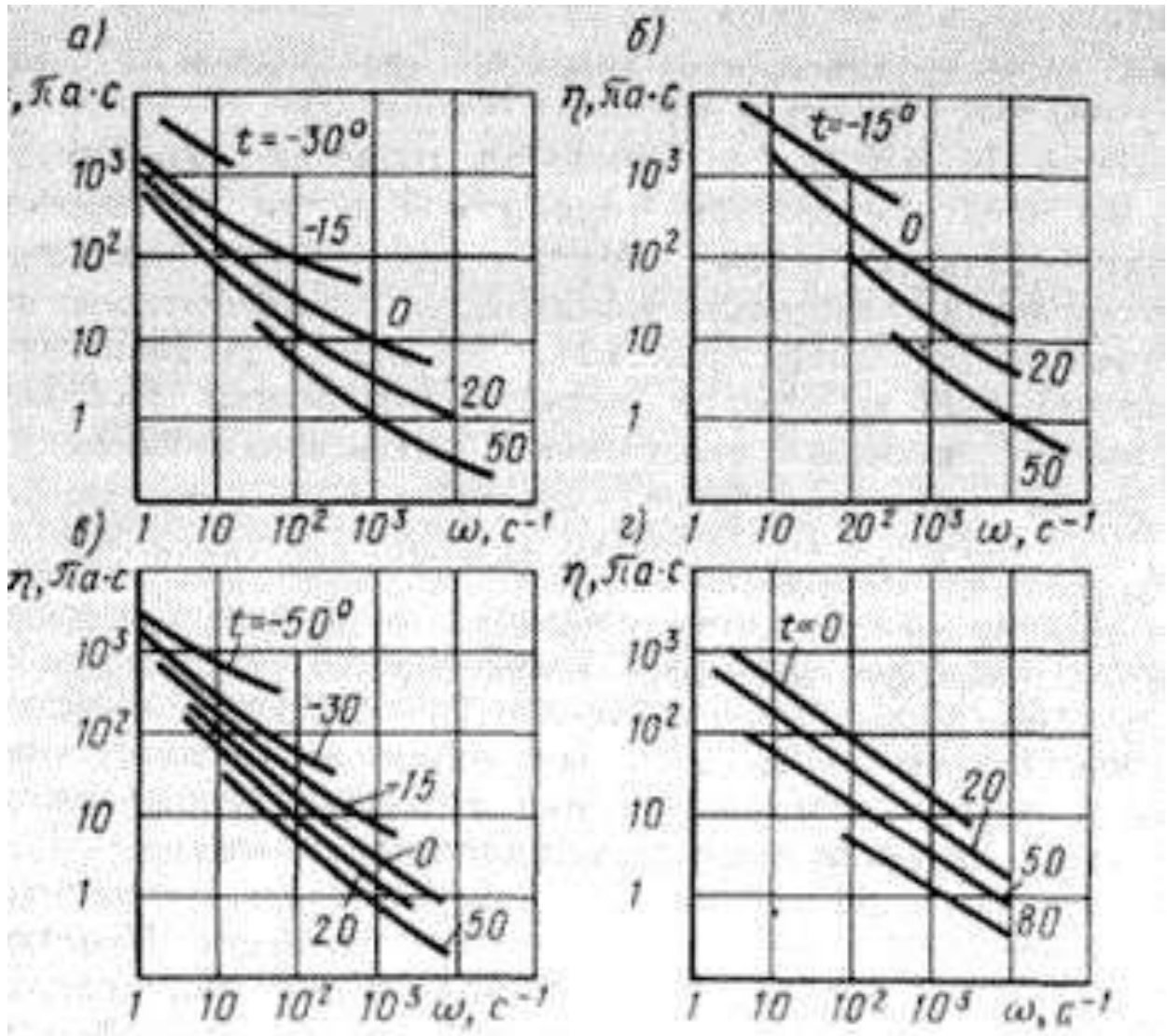


1 – мастило без загущувача; 2 – мастило +3 % загущувача; 3 – мастило +10 % загущувача; ω – частота обертання валу; η – в'язкість

Рисунок 2.4 – Порівняльні в'язкісно-швидкісні характеристики пластичних мастил

В'язкість ПМ визначається не лише градієнтом швидкості деформації, але й температурою: за однакової швидкості деформації вона зменшується зі зростанням температури. Цю залежність описує в'язкісно-температурна характеристика ПМ (рисунок 2.6) [10]. Таку характеристику отримують за певної постійної швидкості

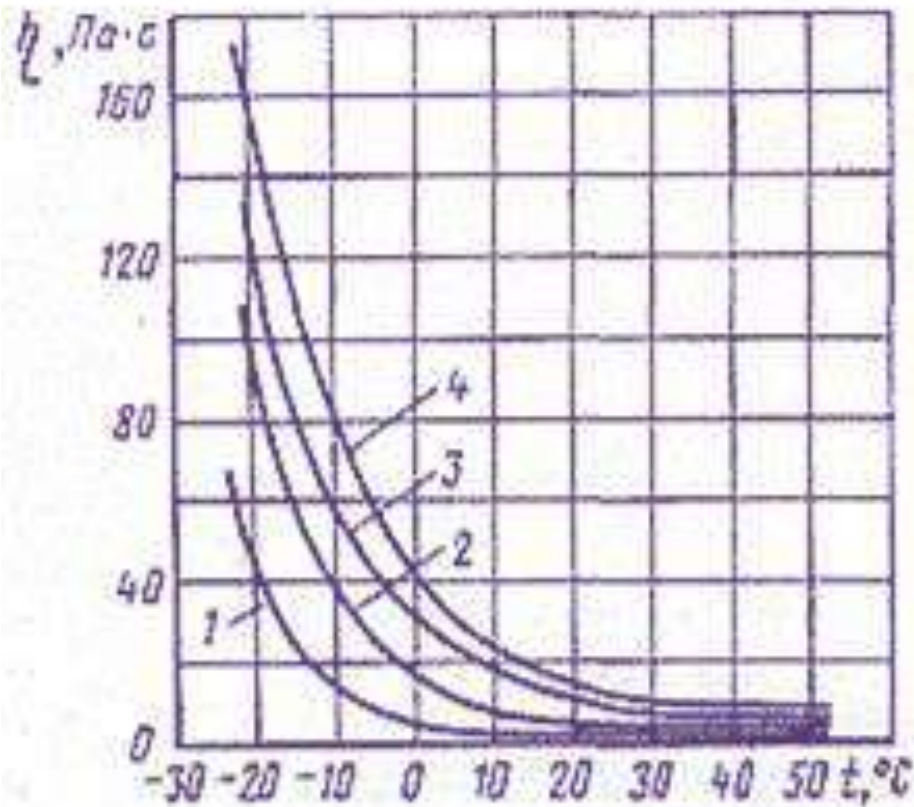
деформації. ПМ мають значно кращі, порівняно з базовими оливами, в'язкісно-температурні характеристики: зі зниженням температури їх в'язкість зростає у сотні разів менше, ніж в'язкість олив, що входять до складу ПМ. Спроможність мастила протидіяти видавлюванню з вузла тертя, а також легкість його подачі до контактуючих поверхонь тертя визначаються консистенцією ПМ.



а– жировий солідол; б – синтетичний солідол; в – ціатім-201; г – мастило 1-13

Рисунок 2.5 – Вязкісно-швидкісні характеристики пластичних мастил при різних температурах

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



1– УС-1; 2 – УС-2; 3,4 – синтетичні дослідні солідоли

Рисунок 2.6 – Вязкістно-температурні характеристики пластичних мастил при частоті обертання валу 400 c^{-1}

Виконаний аналіз в'язкісно-температурних характеристик ПМ свідчить про те, що синтетичні солідоли відзначаються вищими якісними показниками порівняно з мастилами УС-2 та УС-1 (рисунок 2.6).

2.4 Вибір пластичних мастил

Ні один із виду пластичних мастил не має комплексу оптимальних властивостей, що можуть забезпечити роботу більшість механізмів у будь-яких умовах. ПМ вибирають на основі конкретних умов роботи заданого механізму. Під час вибору пластичного мастила слід зважати на умови його експлуатації, спосіб подачі мастильного матеріалу до вузла тертя, а також імовірність контакту мастила з різними речовинами та механічними домішками. Важливу роль відіграє і матеріал

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхонь, з якими взаємодіє мастило. З урахуванням цих факторів і вимог нормативної документації визначають відповідний тип ПМ.

При застосуванні ПМ необхідно враховувати наступні рекомендації:

– пластичні мастила мають бути такими, щоб залишався деякий запас між максимальною експлуатаційною температурою та температурою краплепадіння. Для середньо- і тугоплавких пластичних мастил цей запас становить біля 10 °С, а для низькоплавких ПМ – 15 °С;

– при експлуатаційних температурах понад 100 °С та при довготривалій експлуатації ПМ мають містити антиокислювальну присадку;

– колоїдна стабільність і механічні характеристики ПМ мають відповідати навантаженням, що діють у механізмі;

– обов'язково необхідно враховувати низькотемпературні характеристики ПМ, основний вплив на які мають відповідні оливи, що входять до складу;

– в підшипниках кочення високошвидкісних використовують ПМ, які одержані на малов'язких оливах;

– при виборі загусника враховують те, що за однакових інших умов зі зростанням швидкості відносного переміщення поверхонь пластичне мастило повинно мати більшу «щільність». Саме це забезпечує рівномірну подачу оливи до контактних поверхонь тертя, знижується перемішування ПМ у вузлі тертя і зменшуються втрати на тертя. При застосуванні для подачі ПМ мастилопроводів необхідно використовувати не надто щільні ПМ, одержані на малов'язких оливах;

– пластичні мастила, котрі працюють в умовах забруднень зовнішнього середовища, повинні значніше герметизувати ділянку тертя і відповідно мати більшу щільність.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВЛАСТИВОСТІ НАНОМАСТИЛ, ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА ВИБІР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В КОНСТРУКЦІЯХ АВТОМОБІЛЯ

3.1 Нанотехнології в різних галузях промисловості

Нанотехнології у галузі мастильних матеріалів вважають революційним напрямом, що змінює привичні підходи до інженерних та трибологічних рішень. Застосування наночастинок мілких розмірів від 1 до 100 нанометрів у складі мастильних матеріалів приводить до безпрецедентних можливостей зменшення тертя контактуючих поверхонь, підвищення зносостійкості і збільшення терміну застосування високонавантажених вузлів тертя. До даного часу ця технологія перебувала на етапі експериментів та сміливо здобула нішу у промислових розробках, демонструючи результати, які неможливо здобути при застосуванні традиційних способів змащування [11].

Нанотехнології – це керування матерією на атомному та молекулярному рівнях, коли принаймні один із характерних розмірів перебуває в межах від 1 до 100 нанометрів. Для уявлення масштабу: товщина людської волосини становить приблизно 80 нанометрів. Маніпулювання речовиною на таких розмірах відкриває можливість створювати структури з якісно новими фізико-хімічними властивостями.

У промисловості використання нанотехнології достатньо глибоко змінюють традиційні виробничі процеси і матеріали, при цьому забезпечуючи революційний стрибок експлуатаційних характеристик. І це особливо спостерігається у нових мастильних матеріалах, де наночастинки ведуть себе як активні функціональні добавки. Галузі використання, переваги нанотехнологій і економічний ефект від застосування наведені в таблиці 3.1 [12].

В індустріальній практиці застосування наномастил дає змогу розв'язувати низку ключових інженерних проблем:

- зменшення енергетичних втрат безпосередньо у трибосполученнях;
- підвищення ресурсу експлуатації механізмів при високих навантаженнях;

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- досягнення стабільної роботи при екстремальних температурах;
- зниження екологічного навантаження із-за зменшення кількості мастильного матеріалу;
- підвищення ефективності функціонування складних технічних систем у режимах граничного тертя.

Таблиця 3.1 – Галузі застосування нанотехнологій, їх переваги та економічний ефект

Галузь промисловості	Переваги нанотехнологій	Економічний ефект
Важке машинобудування	Зменшення зносу вузлів тертя на 30–50 %	Підвищення проміжку міжремонтних інтервалів у 1,5–2 рази
Автомобілебудування	Зниження тертя на 40–60 %	Економія використаного палива до 5–7 %
Енергетика	Ріст коефіцієнта корисної дії трансмісій на 3–4 %	Зниження експлуатаційних витрат на 12–15 %
Авіація та космонавтика	Забезпечення працездатності в екстремальних умовах	Зниження маси вузлів тертя на 8–10 %

На сьогодні нанотехнології в мастильних матеріалах еволюціонували від екзотичних підходів до звичного інструменту інженера-триболога, забезпечуючи суттєвий прорив у експлуатаційних характеристиках механічних систем.

3.2 Механізми дії наночастинок у мастильних матеріалах

Ефективність наночастинок у складі мастильних матеріалів зумовлюється сукупністю фізико-хімічних механізмів, що проявляються на молекулярному та субмолекулярному рівнях. Усвідомлення природи цих процесів є визначальним

чинником для раціонального використання нанотехнологій у триботехнічних системах. До основних механізмів впливу наночастинок у мастилах належать [13]:

- утворення захисної трибоплівки, заповнюючи мікронерівності поверхонь тертя наночастинками, утворюючи самовідновлючий шар товщиною до 50–80 нанометрів;

- ефект кулькопідшипника — сферичні наночастинки виконують роль мікроскопічних елементів кочення між контактуючими поверхнями тертя;

- поліруючий ефект – поступове стирання мікронерівностей поверхонь із-за пом'якшеної абразивної дії наночастинок;

- репаративний ефект – селективне осадження наночастинок у зонах максимального зносу, що забезпечує градієнтне відновлення геометрії поверхні;

- каталітична дія – наночастинки ініціюють і прискорюють трибохімічні реакції з утворенням захисних сполук безпосередньо в зоні тертя.

Особливої уваги потребує механізм фрикційної активації наночастинок: під дією тиску та температури в зоні трибоконтaktu відбувається вивільнення енергії, накопиченої на поверхні наночастинок, що зумовлює запуск процесів самоорганізації захисних структур. Механізм дії наночастинок в мастильних матеріалах при різних видах тертя приведено у таблиці 3.2.

Квантовомеханічні експериментальні дослідження попередніх років підтвердили формування квазірідинних наноструктур в зоні контакту, які характеризуються унікальними трибологічними властивостями. Такі структури сприяють утворенню ефекту "супермастила", при цьому можливе десятикратне зниження коефіцієнта тертя порівняно із вихідними величинами [13,14].

Наночастинки, які використовують у сучасній триботехніці, дуже різноманітні по своїх характеристиках та продовжують досліджуватись галузю матеріалознавства. Застосування конкретного виду наночастинок визначається комплексом вимог, які висуваються до мастильного матеріалу та конкретних умов експлуатації механізму чи вузла.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Механізм дії наночастинок у мастильних матеріалах за різних типів тертя

Тип тертя	Домінуючий механізм дії наночастинок	Спостерігаючий ефект
Граничне	Утворення захисної трибоплівки	Зменшення коефіцієнта тертя на 30–45 %
Гідродинамічне	Модифікація реологічних характеристик мастила	Покращення прокочування на 15–20 %
Змішане	Ефект кулькопідшипника та трибоплівка	Ефект комбінований зниження тертя до 50–60 %
Екстремальне навантаження	Ефект репаративний	Зниження швидкості зносу в 2–3 рази

На практиці у виробництві найбільшого застосування набули такі види наночастинок:

- металеві наночастки (Ag, Cu, Fe, Au, Ni) – характерна висока електропровідність та теплопровідність мастильного шару;
- оксидні наноструктури (TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO, SiO_2) – покращують антифрикційні та протизносні характеристики;
- вуглецеві наночастинки (фулерени, нанотрубки, графен, наноалмази) – відповідає їм унікальна міцність та змащувальна здатність;
- халькогеніди металів (MoS_2 , WS_2) – при екстремальних тисках забезпечують стабільну експлуатацію;
- нітриди та бориди металів (BN, TiN) – наночастинки, що підвищують термостійкість мастильного матеріалу;
- композитні наночасточки (ядро-оболонка, гібридні структури) – переваги різних видів наноматеріалів поєднують.

Характеристики різних видів наночастинок приведені у таблиці 3.3 [14].

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Таблиця 3.3 – Характеристики різних видів наночастинок

Тип наночастинок	Типовий розмір (нм)	Оптимальна концентрація	Ключова перевага	Типові програми
Наноалмази	4-6	0,01–0,05 %	Максимальний ефект полірування, екстремальна твердість	Високоточні механізми, мастила для військової техніки
Графен	0,34 (товщина шару)	0,05–0,1 %	електропровідність, чудові трибологічні характеристики	Електронні пристрої, мікромеханіка
Нанотрубки	1–100 (довжина до 1000)	0,1–0,5 %	Достатня міцність, хороші вязкісно-температурні властивості	Аерокосмічна галузь, гідравліка
MoS ₂	40–60	0,5–1 %	Низький коефіцієнт тертя, робота при високих тисках	Підшипники ковзання, редуктори
Наночасточки міді	20–100	0,2–0,8 %	Хороша теплопровідність	Вузли теплонавантажени

Інноваційні розробки останніх років привели до винаходу таких наночастинок, що можуть самоадаптуватися, вони здатні свої властивості змінювати в залежності від умов експлуатації трибосполучень [13,14]. Ці наночасточки мають різні триботехнічні властивості при зміні тиску, температури і швидкості ковзання, що надає можливість оптимізувати експлуатацію системи в широкому діапазоні режимів.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3.3 Переваги наномасил у порівнянні з традиційними мастилами

В наш час наномодифіковані мастильні матеріали достеменно продемонстрували свою перевагу над традиційними аналогами. Технологічні досягнення науковців у цьому напрямку підтверджується не лише лабораторними дослідженнями, а й широкомасштабними промисловими впровадженнями з документально підтвердженими результатами.

Основні переваги наномасил це [15]:

- достатньо серйозне зниження коефіцієнта тертя – до 70 % у порівнянні із базовими оливами, що приводить до енергозбереження і зниження тепловіддачі;
- збільшення несучої здатності механізмів – підвищення гранично допустимого навантаження на вузли тертя у 1,5–2,5 рази;
- зниження зношення – у певних режимах експлуатації інтенсивність зносу знижується до дуже малих значень;
- широкий температурний діапазон – збереження основних характеристик при екстремально високих (до +350 °С) та низьких (до -70 °С) температурах;
- продовжений термін застосування мастильного матеріалу – підвищення у 1,8–3 рази за рахунок зменшення окисної деградації;
- властивості регенерації – в процесі експлуатації поступове відновлення контактуючих поверхонь;
- суттєво покращена адгезія до поверхонь тертя, проявляється у формуванні стійкого граничного мастильного шару;
- достатня стабільність у екстремальних умовах – стійкість до хімічно агресивних речовин, опір вимиванню водою. Основні переваги наномасил в порівнянні з традиційними мастилами наведено у таблиці 3.4.

Практичні застосування наномасил в умовах реальних виробничих процесів засвідчили економічний ефект, який суттєво перевищує розрахункові показники.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 – Переваги наномасил в порівнянні з традиційними мастилами

Найменування параметра	Традиційні мастила	Наномодифіковані мастила	Покращення (%)
Коефіцієнт тертя	0,1–0,2	0,03–0,06	70–85 %
Зносостійкість (відносна)	1	3–5	200–400 %
Граничне навантаження до задиру (МПа)	1500–2000	2500–4000	60–100 %
Ресурс мастильного матеріалу (мотогодини)	200–300	400–900	100–200 %
Температурний діапазон застосування (°C)	-40...+200	-70...+350	115 %
Аварійна експлуатація без мащення (км)	2–5	15–50	650–900 %

Впровадження наномасил у різні галузі промисловості суттєво підвищує загальну ефективність виробничих систем.

3.4 Застосування наномасил в різних галузях промисловості

Нанотехнології впроваджуються у різних галузях: автомобілебудуванні,

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

авіації та космосу, важкому машинобудуванні. Це відбувається частіше всього з різною інтенсивністю із-за економічних чинників та технічних вимог. Наразі сформувалися чітко окреслені галузеві тенденції застосування нанотехнологій у мастильних матеріалах [14].

1. Автомобілебудування. Автомобільна галузь стала одною із перших масового впровадження наномастил, що зумовлено жорсткими екологічними нормами та підвищеними вимогами до паливної економічності.

Ключові напрямки використання:

- моторні мастила з графеновими і наноалмазними присадками, що дають можливість збільшити інтервали між замінами до 30000 км;
- трансмісійні оливи з нанокерамічними добавками, що підвищують коефіцієнт корисної дії трансмісії на 4–6 %;
- мастила консистентні з наночастинками дисульфиду молібдену для ходової частини;
- гідравлічні змащувальні рідини з наночастинками SiO_2 для активної підвіски та систем кермового керування.

2. Авіакосмічна галузь. У авіації та космонавтиці використання наномастил дуже важливо через екстремальні умови експлуатації, а саме:

- високотемпературні турбінні оливи з наночастинками нітриду бору для двигунів реактивних;
- низькотемпературні гідравлічні рідини з добавками у вигляді вуглецевих нанотрубок для систем керування;
- тверді мастильні покриття на основі WS_2 , які працюють у вакуумі, для космічних механізмів;
- екрануючі мастила з металевими наночастинками, передбачені для захисту від космічної радіації.

3. Важке машинобудування та видобувна галузь. Екстремальні режими навантаження та агресивні умови експлуатації зумовлюють незамінність наномастил у гірничодобувному обладнанні та важкій техніці:

- змащення шарнірів та пальців гусеничного ходу з наночасточками міді;

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мастила редукторні з наноприсадками протизадирними для спеціальних механізмів обертів та підйому;
- бурові розчини з наночасточками для зменшення тертя бурильної колони;

Наномастила у різних галузях промисловості приведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Застосування наномастил у галузях промисловості

Найменування галузі	Приоритетні наноматеріали	Типові програми	Економічний ефект
Автомобілебудування	Наноалмази, графен, MoS ₂	Двигун, трансмісія	Економія палива 3–7 %
Авіація	BN, фулерени, нанокераміка	Керуючі системи, турбіни	Зниження маси на 5–8 %
Енергетика	наночасточки срібла, WS ₂	Трансформатори, турбогенератори	Ріст коефіцієнта корисної дії на 1,5–2,5 %
Мікроелектроніка	Нанотрубки, графен	Мікроприводи	Зменшення розмірів на 15–20 %
Медичне обладнання	Біосумісні наночасточки	Імплантанти, хірургічні інструменти	Підвищення терміну експлуатації у 2–3 рази

Глобальне поширення технологій наномастил веде до інноваційних проривів у суміжних галузях, утворюючи ефект технологічного мультиплікатора. Ринок наномастил за останні роки стрімко зростає і становить близько 19 %.

3.5 Екологічні аспекти застосування наномастил

Екологічний аспект використання наномодифікованих мастильних матеріалів

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

має багатофакторний характер і охоплює як прямий вплив на довкілля, так і опосередковані наслідки, пов'язані зі змінами технологічних процесів. Позитивні ефекти наномасил в екології [15]:

- скорочення обсягу мастильних матеріалів, які застосовуються, на 30–40 % завдяки підвищенню терміну експлуатації;
- зменшення викидів CO₂ на 4–7 % в транспортному секторі за рахунок підвищення паливної економічності;
- зниження токсичності відпрацьованих масил при використанні наночасточок, які можуть біорозкладатися;
- зменшення обсягів виробництва запасних частин із-за збільшеного терміну експлуатації механізмів;
- зменшення розливів та витоків за рахунок хороших герметизуючих характеристик наномасил.

Потенційні екологічні ризики:

- недостатня вивченість впливу наночастинок на екосистеми у разі їх потрапляння в навколишнє середовище;
- ускладнення процесів утилізації та переробки відпрацьованих наномасил із застосуванням традиційних технологій;
- потенційна здатність окремих видів наночастинок до біоаккумуляції в харчових ланцюгах;
- висока енергоємність процесів виробництва наноматеріалів підвищеної чистоти.

Екологічні аспекти використання наномасил приведені у таблиці 3.6.

Дослідження останніх років у галузі екотоксикології наноматеріалів привели науковців до введення методології оцінки життєвого циклу (LCA) для наносмасил, яка враховує прямі екологічні впливи, а також синергетичні явища в техніко-економічних системах. Відповідно до запропонованої методології, інтегральний екологічний ефект впровадження наномасил має позитивний характер, особливо за умов використання наночастинок біогенного походження та реалізації принципів циркулярної економіки.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.6 – Екологічні аспекти застосування наномастил

Найменування екологічного параметра	Традиційні мастила	Наномастила	Зміни
Вуглецевий слід виробництва (кг CO ₂ /л)	4,3–5,1	4,5–5,8	+5–14 %
Вуглецевий слід життєвого циклу (кг CO ₂ /л)	18,2–22,5	11,5–15,2	-33–37 %
Біорозкладальність (%)	15–30	25–65	+60–120 %
Водяна токсичність (*LC ₅₀ , мг/л)	100–250	150–320	+30–50 %
Обсяг утилізаційних відходів (від од.)	1	0,6–0,7	-30–40 %

*LC₅₀ (від англ. *Lethal Concentration 50%*) означає летальну концентрацію для 50 % тестових організмів. Більш детально, це така концентрація речовини у воді (в мг/л), при якій половина тестових організмів гине протягом певного часу експозиції (зазвичай 24, 48, 72 або 96 годин). Для LC₅₀ від 100 до 1000 токсичність для водних організмів низька.

Регуляторні механізми більшості розвинених країн на даний час сформували спеціалізовані стандарти оцінювання та контролю екологічної безпеки наномастил, що дозволяє узгодити темпи технологічного розвитку з дотриманням принципів сталого розвитку.

3.6 Текстурування та структурування поверхонь із застосуванням нанотехнологій

Застосування нанотехнологій у системах змащування виходить за межі модифікації власне мастильних матеріалів. Комплексний підхід передбачає також наноструктурування контактуючих поверхонь, що у поєднанні з наномасстилами формує синергетичний ефект і суттєво змінює трибологічні характеристики вузлів

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тертя.

Ключові способи наноструктурування поверхонь [14]:

- мікро- та нанотекстурування лазерне – це утворення впорядкованих ділянок мікропоглиблень із контрольованою геометрією резервуарів мастила;
- наноструктурування плазмове – формування градієнтних структур зі змінними механічними характеристиками;
- променево-іонна імплантація – це введення наночастинок у поверхневий шар з метою модифікації трибологічних характеристик;
- нанесення наноструктурованих покриттів, які представляють собою багат шарові композити із контрольованою наноархітектурою;
- наноструктурування хімічне – це травлення селективне, полягає у створенні поверхневих ієрархічних структур;
- біоміметичний поверхневий дизайн – полягає у відтворенні наноструктур природних об’єктів, що характеризуються унікальними трибологічними характеристиками.

Ключові способи наноструктурування поверхонь наведені у таблиці 3.7.

Сучасні технології дали змогу втілити концепцію «синергетичних трибопар», у межах якої наноструктуровані поверхні та наномодифіковані мастильні матеріали проєктуються як єдина система із взаємодоповнювальними характеристиками [15].

В таких системах спостерігається безпрецедентний рівень трибологічних властивостей, а саме:

- коефіцієнт тертя зменшується до значень 0,01-0,03;
- зносостійкість зростає у 5-10 разів;
- проходить формування “самоадаптованого” трибошару, який в залежності від умов експлуатації оптимізує свої властивості;
- відбувається самозаліковування мікрodefektів поверхні у процесі експлуатації.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.7 – Ключові методи наноструктурування поверхонь

Тип наноструктурування	Характерні розміри (нм)	Трибологічний ефект	Оптимальні наномастила
Мікропоглиблення лазерні	200–500	Ємності мастила, зниження μ на 40-60 %	Мастила з наночасточками MoS ₂
Нанорозмірна шорсткість	10–50	Підвищення кількості мастила у 2–3 рази	Графенові наномастила
Алмазоподібні DLC-покриття	Товщина шару 5–15	Зниження зносу у 5 разів	Мастила з наноалмазами
Іонно-імплантовані шари	Глибина 20–80	Підвищення твердості	Наноприсадки металоплакуючі
“Лотос-ефект” нанорельєф	100	Самоочищення поверхні	Гідрофобні наномастила

Перспективним напрямом подальшого розвитку є створення «програмованих поверхонь», в яких мікро- та нанотекстура разом із функціональними характеристиками можуть керовано й динамічно мінятися під впливом електричних, температурних або магнітних полів, забезпечуючи адаптивне регулювання трибологічних властивостей системи відповідно до актуальних умов експлуатації в режимі реального часу.

3.7 Майбутнє нанотехнологій у сфері мастильних матеріалів

Аналіз сучасних дослідницьких тенденцій і технологічних дорожніх карт дає змогу з високою ймовірністю окреслити провідні напрями розвитку наномастильних матеріалів у найближчі десять років. Прискорення технологічної

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

еволюції у цій сфері зумовлене конвергенцією нанотехнологій зі штучним інтелектом, квантовими розрахунками та сучасними підходами матеріалознавства.

Основні напрямки розвитку наномастил на наступне десятиліття [11–14]:

- наномастильні самоадаптивні системи – мастила, які здатні змінювати в динаміці свої характеристики відповідно на зміну умов експлуатації механізму;
- мастила інтелектуальні із функціями самодіагностики, з передачею даних до аналітичної системи, з попередження про зношення;
- біомедичні наномастила, які відтворюють принципи природних мастильних систем (суглобів, біологічних мембран), демонструючи безпрецедентно високий рівень ефективності;
- наномастила з урахуванням квантово-механічних ефектів, що застосовують принципи квантової механіки для забезпечення наднизьких рівнів тертя;
- гібридні системи для екстремальних умов експлуатації типу тверде мастило та нанорідина;
- покриття з депонованими наночастинками, які самовідновлюються і вивільняються при локальному пошкодженні поверхні;
- інтеграція наномастил у промислове виробництво, передбачає 3D-друк деталей із вбудованими самозмащувальними елементами.

Основні напрямки розвитку наномастил наведені у таблиці 3.8.

Проривні результати у сфері квантової фізики поверхонь і наномасштабної трибології формують підґрунтя для розроблення принципово нових мастильних матеріалів, робота яких базується на суперпозиції квантових станів. За певних умов такі матеріали потенційно здатні проявляти ефект негативного коефіцієнта тертя, що може спричинити революційні зміни в підходах до проектування механічних систем.

Ключовим завданням залишається створення довгострокових токсикологічних і екотоксикологічних досліджень наноматеріалів у складі мастильних систем. Наявні методики оцінювання безпеки не завжди достатньо адекватно відображають можливі віддалені наслідки накопичення наночастинок в екосистемах та їхній вплив на біологічні системи.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.8 – Основні тенденції розвитку наномастил

Назва технологічного напрямку	Поточна готовність TRL*	Очікуваний термін комерціалізації	Потенційний ефект
Наномастила самоадаптивні	4–5	2027–2029	Уніфікація мастильних матеріалів
Мастила інтелектуальні	5–6	2026–2027	Модернізація систем техобслуговування
Біомедичні наносистеми	3–4	2030–2032	Коефіцієнт корисної дії трибосистем > 98 %
Ефекти квантово-механічні	2–3	2032–2035	Тертя наднизьке, $\mu < 0,01$
Гібридні системи мащення	6–7	2025–2026	Експлуатація у вакуумі та при екстремальних температурах

* TRL (Technology Readiness Level) – рівень технологічної готовності за шкалою від 1 (базові принципи) до 9 (комерційне використання).

Міждисциплінарний підхід, який інтегрує матеріалознавство, квантову фізику, нанохімію, трибологію і обчислювальні науки, забезпечує синергетичний ефект, що суттєво прискорює створення наномастил іншого нового покоління із унікальними трибологічними властивостями та високою екологічною сумісністю. Така конвергенція наукових напрямів формує значно якіснішу нову парадигму розроблення мастильних матеріалів, засновану на глибокому розумінні й керованому контролі властивостей матерії на наномасштабному рівні.

					КВРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ВИСНОВКИ

– Встановлено, що перспективні композиційні мастильні матеріали на основі пористих матеріалів, виготовлених спіканням пакету спресованих металевих сіток. Композиційні мастильні матеріали на металевій основі, пори яких заповнені фторопластом-4 з добавками сульфідів, селенідів та телуридів молібдену, вольфраму, ніобію та інших металів набули поширення для вузлів тертя автомобільної техніки. У таких композиціях тверде мастило крім мастильної дії забезпечує високу несучу здатність та зносостійкість. Високу ефективність у вузлах тертя мають тверді мастила WS_2 та WSe_2 , але їх застосування обмежується великою вартістю.

– Пластичні мастила вибирають на підставі конкретних умов роботи заданого вузла тертя. При підборі ПМ необхідно задати умови його роботи: температурний діапазон експлуатації; відносну швидкість руху контактуючих поверхонь; питомого тиску у вузлі тертя; час безперервної роботи ПМ та метод підведення мастила до вузла тертя, а також можливість контакту ПМ з водою, киснем, хімічно активними речовинами, механічними забрудненнями. Велике значення має матеріал, що контактує з пластичним мастилом. За цими даними та за нормативами на товарні мастильні матеріали підбирають відповідний вид ПМ.

– Розроблені рекомендації по вибору пластичних мастил.

– Ефективність наночастинок у мастильних матеріалах обумовлена комплексом фізико-хімічних механізмів, що діють на молекулярному та субмолекулярному рівні. Розуміння цих процесів є, безумовно, ключем до вибору та оптимального застосування нанотехнологій у триботехнічних системах автомобілів. Комплексний підхід включає також наноструктурування контактуючих поверхонь, що створює синергетичний ефект з наномастилами і, радикально трансформує трибологічні характеристики вузлів тертя.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Експлуатаційні матеріали на автомобільному транспорті : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільний транспорт» галузі знань 27 Транспорт спец. 274 Автомобільний транспорт денної та заоч. форм навч. / уклад. Т.В. Фурс. – Луцьк : Луцький НТУ, 2021. – 148 с.

2. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посіб. / В. Я. Чабанний, М. І. Черновол, Є. К. Солових [та ін.] ; ред. В. Я. Чабанний. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. - 486 с.

3. Автомобільні експлуатаційні матеріали [Текст] : навч. посіб. для студ. ВНЗ. Ч. 1 : Паливно- мастильні матеріали та спеціальні рідини / М. К. Сукач [та ін.] ; Відкритий міжнар. ун-т розвитку людини "України" Автор(и): Сукач Михайло Кузьмич ; Сидоренко Василь Павлович ; Аржаєв Геннадій Олександрович ; Литвиненко Іван Миколайович Відкритий міжнар. ун-т розвитку людини "України" Вихідні дані: Київ : Університет "Україна", 2006 Опис: 255 с.

4. Технічна експлуатація та надійність автомобілів [Текст] : Навчальний посібник / Форнальчик Є.Ю., Оліскевич М.С., Мاستикаш О.Л., Пельо Р.А.; За загальною ред.Є.Ю. Форнальчика Вторинна відповідальність: Форнальчик Є. Ю. ; Оліскевич М. С. ; Мастикаш О. Л. ; Пельо Р. А. ; За загальною ред.Є.Ю.Форнальчика Вихідні дані: Львів : Афіша, 2004 Опис: 492 с.

5. Кравченко А. Р. Асортимент українських закладних мастил у світлі світових тенденцій змащування вузлів тертя автомобілів / А. Р.Кравченко, З. П. Мельник, А. І. Петліцький// Мастильні матеріали : Міжнародна науково-технічна конференція, 2-6 вересня : тези доповідей. - 1997. – С. 74-75.

6. 1. Окоча А.І., Антипенко А.М. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали. К.:Урожай,1996.- 336с.

7. Заславський Р.І., Миронюк О.С., Ковалишин С.Й. Практикум з паливно-мастильних та інших експлуатаційних матеріалів. Навчальний посібник. - Львів: Українські технології, 2005. - 243 с.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

8. Полянський С.К., Коваленко В.М. Експлуатаційні матеріали: Підручник. К.: Либідь, 2003. - 448 с.

9. Антипенко А.М., Войтов В.А., Клімов П.М. та ін. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали: Навчальний посібник для дистанційного навчання. – Харків: «Апостроф», 2011. - 234 с.

10. Фізико-хімія паливно-мастильних матеріалів: [монографічний підручник (спеціальний курс лекцій)] [за ред. Г. О. Сіренка] / Г. О. Сіренко, В. І. Кириченко, І. В. Сулима. – Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2017 – 508 с.

11. Ali M K A, Xianjun H, Mai L, Bicheng C, Turkson R F, Qingping C. Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives. Wear 364–365: 270–281 (2016)

12. Huang H D, Tu J P, Gan L P, Li C Z. An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive. Wear 261(2): 140–144 (2006)

13. Основи нанотехнологій мастильних матеріалів / Є.В. Кобилянський Ю.Л., Іщук М.А. Альтшулер // Каталіз і нафтохімія. — 2005. — № 13. — С. 1-8.

14. Григоров А. Б. Науково-практичні основи отримання пластичних мастил з вторинної сировини [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.17.07 / Андрій Борисович Григоров ; [наук. консультант Чешко Ф. Ф.] ; Нац. металург. акад. України. – Дніпро, 2020. – 40 с.

15. Панченко С.П. Функціональні наноматеріали. Конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 132 Матеріалознавство / С.П. Панченко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2022. – 47 с.

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА 022136.01.03.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58