

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»


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

на тему: «Підвищення триботехнічних характеристик консистентного
мастильного матеріалу введенням дисперсних частинок»

Шифр: МРТАМ 23.22369.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -22-1  В.В. Стахурський

Керівник

 д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.

Ц _____ 12 _____ 2023_р.

Хмельницький, 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ
Диха О.В.
" 15 " жовтня 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Стахурський Віталій В'ячеславович

1. Тема проекту:
«Підвищення триботехнічних характеристик консистентного мастильного матеріалу введенням дисперсних частинок»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 15 серпня 2023р. № 28

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) *Технічні умови на виготовлення та склад консистентних мастильних матеріалів.*
- 2) *Річна програма ремонту деталей.*
- 3) *Матеріали переддипломної практики.*
- 4) *Результати літературного огляду і патентного пошуку.*

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

1. *Структура, склад і властивості консистентних мастильних матеріалів*
2. *Об'єкти дослідження. Методики та матеріали*
3. *Експериментальне дослідження ефективності застосування дисперсних добавок на основі гідросилікатів магнію*
4. *Експериментальні дослідження захисних плівок з гідросилікатами магнію*

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Структура, склад і властивості консистентних мастильних матеріалів	1.11.2023	
2	Об'єкти дослідження. Методики та матеріали	15.11.2023	
3	Експериментальне дослідження ефективності застосування дисперсних добавок на основі гідроксилатів магнію	1.12.2023	
4	Експериментальні дослідження захисних плівок з гідроксилатами магнію	5.12.2023	
5	Оформлення презентаційних матеріалів	15.12.2023	

Студент



Стахурський В.В.

Керівник роботи



Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 93 сторінок, кількість рисунків – 41, таблиць – 9, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 39.

Студент гр. МТВАм-22-1 Стахурський Віталій

Тема «Підвищення триботехнічних характеристик консистентного мастильного матеріалу введенням дисперсних частинок»

Дана магістерська дипломна робота спрямована на підвищення триботехнічних характеристик консистентного мастильного матеріалу, що працює в трибовузлах, за рахунок введення дисперсних частинок магнію гідросилікатів.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:





1. Проведений аналіз впливу дисперсних частинок різних матеріалів на протизносні властивості КШМ;
2. Зроблений підбір оптимального розміру та концентрації частинок гідросилікату магнію в КММ для робочих поверхонь вузлів тертя;
3. Розроблений оптимальний компонентний склад дисперсних фаз у КММ;
4. Досліджений вплив дисперсних частинок гідросилікатів магнію на реологічні, фізико-хімічні та трибологічні властивості КММ;
5. Розроблений пристрій для випробування КММ у підшипниках кочення;
6. Оцінений вплив структури мастильного матеріалу на його триботехнічні характеристики.

Перелік ключових слів: консистентне мастило, дисперсні частинки, наддуг, підшипники кочення, триботехнічні характеристики

ЗМІСТ

ВСТУП

1. СТРУКТУРА, СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ КОНСИСТЕНТНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	6
1.1. Умови функціонування та вимоги до консистентних мастильних матеріалів.....	6
1.2. Структура та в'язкість консистентних мастильних матеріалів.....	18
1.3. Дисперсні добавки як модифікатори тертя в консистентних мастильних матеріалах.....	22
1.4. Перспективи застосування гідросилікатів магнію як модифікаторів тертя.....	29
2 ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. МЕТОДИКИ ТА МАТЕРІАЛИ...	34
2.1. Властивості вибраних консистентних мастильних матеріалів.	34
2.2. Використані методи досліджень.....	35
2.3. Дисперсні добавки.....	36
2.3.1. Перемішування консистентних мастильних матеріалів.....	36
2.3.2. Визначення температури краплі падіння.....	37
2.3.3. Визначення корозійної стійкості	37
2.3.4. Профілометричні дослідження.....	38
2.3.5. Стандартний метод оцінки триботехнічних характеристик....	39
2.4. Дослідження реологічних властивостей.....	42
2.5. Хімічний аналіз дисперсних добавок.....	43
2.6. Пристрій для випробування мастильних матеріалів у підшипниках кочення.....	46

МРТАМ 23. 22369.000. ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
	Розроб.	Стахурської		
	Перевір.	Диха		
	Н.контр.	Бабак		
	Затвер	Диха		
Підвищення триботехнічних характеристик консистентного мастильного матеріалу введенням дисперсних частинок			Літ.	Аркуш
			4	92
ХНУ, гр. МТВАм-22-1				

3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ ДОБАВОК НА ОСНОВІ ГІДРОСИЛКАТІВ МАГНІЮ.....	47
3.1.	Оцінка триботехнічних властивостей консистентних мастил, модифікованих дисперсними добавками гідросилікатів магнію.....	47
3.1.1.	Вплив концентрації та розміру дисперсних частинок на триботехнічні характеристики.....	47
3.1.2.	Вплив складу модифікатора на протизносні властивості КММ.....	52
3.1.3.	Суміші для оцінки впливу складу гідросилікатів на протизносні властивості Літол-24.....	55
3.1.4.	Дослідження ефективності консистентного мастильного матеріалу підшипнику кочення.....	56
3.2.	Структура консистентного мастильного матеріалу.....	60
3.3.	Корозійна стійкість.....	62
4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ПЛІВОК З ГІДРОСИЛКАТАМИ МАГНІЮ.....	64
4.1.	Формування тонких плівок на поверхнях трибоспорядження...	64
4.2.	Вплив температури на формування та руйнування захисних плівок, утворених гідросилікатами магнію.....	62
4.3.	Практичне застосування гідросилікатів магнію у складі консистентних мастильних матеріалів.....	72
	ВИСНОВКИ.....	77
	Список літератури.....	78
	Додатки.....	82

ВСТУП

Ефективність мастильного матеріалу (ММ) залежить від безлічі факторів, які в сукупності визначають характер впливу ММ на знос і тертя поверхонь, що змащуються. Ці фактори залежать від властивостей, якостей ММ і поверхонь, що труться, у тому числі від їх змін у процесі експлуатації, а так само від характеру взаємодії між компонентами ММ, поверхнями, що труться, і покривають їх окисними (та іншими) плівками. Ще один важливий фактор, що впливає на мастильну композицію – швидкості, навантаження, температури та інші параметри режиму тертя.

Основна проблема в даний час полягає в зменшенні довговічності вузлів тертя, що змащуються, в результаті зменшення несучої здатності мастильного шару в умовах збільшення навантажень і швидкостей в сучасних машинах. Розроблено багато полярно-активних і хімічно активних речовин для підвищення несучої здатності мастильного шару, проте вони найчастіше піддаються десорбції і призводять до корозійно-механічних руйнувань поверхонь тертя, тому ще одним рішенням цієї проблеми стало цілеспрямоване введення антифрикційних, протизносних та відновлювальних дисперсних.

Наразі склалася ситуація, що ремонтні підприємства, які обслуговують рухомий склад раніше використовували імпорتنі консистентні мастильні матеріали (КММ), з метою економії коштів переходять на мастильні матеріали вітчизняного виробництва. Внаслідок виникає необхідність у якісному КММ, який дозволить збільшувати інтервали технічного обслуговування та скоротити витрати на експлуатаційні.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Мета та завдання дослідження.

Мета роботи: підвищення триботехнічних характеристик консистентного мастильного матеріалу, що працює в трибовузлах, за рахунок введення дисперсних частинок магнею гідросилікатів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Провести аналіз впливу дисперсних частинок різних матеріалів на протизносні властивості КШМ;
2. Зробити підбір оптимального розміру та концентрації частинок гідросилікату магнею в КММ для робочих поверхонь вузлів тертя;
3. Розробити оптимальний компонентний склад дисперсних фаз у КММ;
4. Дослідити вплив дисперсних частинок гідросилікатів магнею на реологічні, фізико-хімічні та трибологічні властивості КММ;
5. Розробити пристрій для випробування КММ у підшипниках кочення;
6. Оцінити вплив структури мастильного матеріалу на його триботехнічні характеристики.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 СТРУКТУРА, СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ КОНСИСТЕНТНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Консистентні мастильні матеріали (КММ) – особливий вид мастильних матеріалів, що є колоїдною системою, що складається з дисперсного середовища (базова олія), дисперсної фази (загусника) і наповнювача (присадки та дисперсні добавки). Основне призначення КММ – зниження тертя в трибосполученні, а також забезпечення відведення тепла в області контакту поверхонь, що труться.

До КММ пред'являється ряд важливих вимог, що полягає в здатності розділяти поверхні, що труться, забезпечувати корозійну стійкість, гарантовано утримуватися на поверхні під впливом агресивних середовищ, володіти високими антифрикційними властивостями і головне зберігати ці властивості тривалий час. Відповідність КММ цим вимогам забезпечуватиме суттєве збільшення терміну служби вузла тертя. Працездатність КММ визначається комплексом характеристик: в'язкістю, робочою температурою, природи дисперсного середовища та типом дисперсних фаз. Для роботи КММ у вузлах тертя має забезпечуватись оптимальне поєднання характеристик під певні умови експлуатації.

1.1 Умови функціонування та вимоги до консистентних мастильних матеріалів

Консистентні мастила набиваються в порожнини трибовузлів і заміна РМ проводиться тільки під час технічного обслуговування. Консистентні мастильні матеріали призначені для змащування підшипників кочення різних типів, шарнірів, важільних, кулачково-ексцентрикових систем та ін.

До ряду основних вимог до КММ належать:

- Забезпечувати оптимальні умови тертя і знижувати знос деталей, що труться;

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- Захищати деталі від корозії та агресивної дії зовнішнього середовища;
- Забезпечувати ущільнення у зазорах між сполученими деталями;
- Запобігати задиракам і заїданням поверхонь, що труться;
- виконувати роль електроізоляційного матеріалу;
- Знижувати шуми та вібрації в трибовузлі, т.ч. захистити поверхні від ударних навантажень;
- Працювати в широкому діапазоні температур, навантажень і швидкостей переміщення.

Мастильних матеріалів одночасно виконують усі перелічені функції практично немає. Підбір необхідного КММ здійснюють під певні умови застосування, тому для забезпечення надійної роботи вузла в пріоритеті лише дві або три функції з усього переліку.

Працездатність консистентного мастильного матеріалу визначається не тільки експлуатаційними умовами самого ММ (температури, навантаження, навколишнє середовище), а й характером руху трибовузла, що працює з КММ (постійне або змінне переміщення, зупинки).

Властивості КММ зазвичай оцінюють за допомогою чотирьох видів показників. Поведінка мастил в обсязі характеризують показниками об'ємно-механічних властивостей, у приповерхневому шарі – показниками граничних властивостей, а зміни у властивостях КММ, що протікають під впливом зовнішніх факторів – показниками стабільності. У відповідність до встановленого складу мастила та відсутність у них небажаних продуктів (домішок). Внесок того чи іншого показника у властивості мастил при експлуатації визначається складом зі своїм комплексом властивостей та умовами застосування мастильного матеріалу. [2]

КММ відносять до в'язкопластичних систем. Об'ємні та механічні властивості в'язкопластичних систем залежать від суми реологічних показників, що визначають пружні, міцнісні та в'язкісні властивості. Стан структури та величина взаємодії між її структурними елементами

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

визначають поведінку КММ в обсязі на різних етапах деформування та зв'язок між пружними, міцнісними та в'язкісними властивостями.[3]

Для всебічної оцінки якостей КММ необхідно брати до уваги досить велику кількість експлуатаційних характеристик. До основних характеристик визначальним експлуатаційні властивості КММ відносять: водостійкість, межу міцності, в'язкість, температуру краплепадіння, механічну стабільність, колоїдну стабільність та ін.

Межею міцності на зсув(ГОСТ 7143-73 [4]) мастильного матеріалу називають ту мінімальну питому напругу, при якому відбувається руйнування структурного каркаса мастила внаслідок зсуву одного її шару щодо іншого. Цей показник визначає здатність мастильного матеріалу утримуватися на поверхнях трибосполучення, чинити опір скидання з рухомих деталей під впливом сил інерції, не стікати і не сповзати. Оскільки межа міцності зі зростанням швидкості збільшується, його рекомендують визначати при швидкостях деформації нижче $6 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$, за яких від умов навантаження він практично не залежить. Відповідно до ГОСТ 7143-73 вимірюється кутова деформація, за якою визначається межа міцності (в Па):

$$\tau_n = k \cdot \gamma = \frac{C \cdot \gamma}{2 \cdot \pi \cdot R_v^2 \cdot (h + \frac{R_v}{3})} \quad (1.1)$$

де k -постійна приладу; γ – максимальний кут повороту (град); C – постійна пружини (Н·м/град); R_v – радіус внутрішнього циліндра (м); h – висота внутрішнього циліндра (м).

Існує велика кількість методів визначення межі міцності на зсув, що описуються у літературі [5-7], т.к. умови деформування в різних приладах не однаково, то межа міцності тих самих мастил, виміряних на різних приладах, як правило, не збігається за величиною і в більшості випадків неможливий перерахунок.

В'язкість(ГОСТ 26581-85 [8], ГОСТ 7163-84 [9]). Характеризує поведінку КММ у вузлах тертя, коли мастило набуває властивостей рідини.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Є сумою показників, яка характеризує опір КММ течії в потоці, тобто. енергію, що витрачається на подолання внутрішнього тертя. Т.к. внутрішнє тертя КММ не константно, воно виражається функціональною залежністю градієнта швидкості зсуву від зсуву напруги в заданому інтервалі вимірювання. У разі визначення в'язкості на ротаційному віскозиметрі (за ГОСТ 26581-85) розрахункова формула має вигляд:

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{5 \cdot K \cdot \alpha}{D \cdot \nu} \quad (1.2)$$

де μ - Ефективну в'язкість (Па·с); τ - напруга зсуву (Па); D – скоригований градієнт швидкості деформації (с-1); ν - частота струму мережі при визначенні (Гц); α - значення відносного кута обертання на блоці виміру, розподілу шкали; K - постійна вимірювального пристрою за паспортом; 5 - коефіцієнт перекладу константи вимірювального пристрою одиниці системи СІ.

При визначенні в капілярних віскозиметрах (ГОСТ 7163-84) ефективна в'язкість визначається за формулою:

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot Q \cdot l} \quad (1.3)$$

де R – радіус капіляра (ММ); Q – витрати мастила за одиницю часу; l - Довжина капіляра (ММ); Δp – тиск (Па).

Механічна стабільність(ГОСТ 19295-73 [10]) - інтегральна характеристика їхньої стійкості до механічного впливу в тих чи інших експлуатаційних або наближених до них умовах, коли ізотермічний режим не підтримується. Механічна стабільність є функцією тиксотропних властивостей КММ. Зазвичай її оцінюють зі зміни показників об'ємно-механічних властивостей мастил при їх руйнуванні та відновленні. Основний недолік методів оцінки механічної стабільності – фізична невизначеність умов руйнування КММ та відсутність фізичного сенсу у показника пенетрації [11]. Об'єктивним критерієм механічної стабільності КММ може бути лише межа міцності.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Згідно з ГОСТ 19295-73 механічна стабільність оцінюється на приладі, званий тиксометром, який здійснює руйнування КММ при температурі 20оС і градієнт швидкості 6000 с-1 протягом 100 с або іншого часу. Відновлення мастила визначають через задані інтервали часу, а критерієм служить індекс руйнування K_p та індекс відновлення K_v .

$$K_p = \frac{\sigma_u - \sigma_p}{\sigma_u} \cdot 100 \quad (1.4)$$

$$K_v = \frac{\sigma_v - \sigma_p}{\sigma_p} \cdot 100 \quad (1.5)$$

де σ_u - межа міцності на розрив вихідної, σ_p - зруйнованої, σ_v - відновленого мастила.

Температура краплі падіння(ГОСТ 6793-74 [12]). Характеристика, яка наближено дозволяє судити про верхню температурну межу працездатності РМ. Полягає у вимірі температури, коли мастило з консистентного стану переходить у рідке, і відокремлюється перша крапля з отвору приладу за стандартних умов випробування. Однак варто відзначити, що цей показник не повністю характеризує дійсну температуру, до якої мастило зберігає працездатність. Найчастіше ММ може працювати і за більшої температури, ніж температура краплі. Це відбувається, коли КММ при нагріванні виділяє рідку фазу, але сам при цьому залишається пластичним, або коли мастило може бути рідким при температурі нижчою, ніж встановлена температура краплепадіння [13].

Колоїдна стабільність(ГОСТ 7142-74 [14]) - здатність КММ утримувати рідку фазу і не розшаровуватися є показником агрегативної стійкості мастил як колоїдних систем. Колоїдна стабільність, як і межа міцності, характеризує загусну ефективність загусника в дисперсійному середовищі, його сумісність з нею та іншими компонентами мастил.

Вуглеводневі мастильні матеріали мають найбільшу колоїдну стабільність. За складом це однорідні щільні сплави мінеральних масел з

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

розподіленими твердими вуглеводнями у вигляді тонких мономолекулярних шарів. Менш стабільні мастильні матеріали, загущені милами, тому що їх структурний каркас має меншу щільність, а кристалічна решітка здатна вміщувати менші обсяги олії, ніж кристалічна решітка вуглеводнів.

Збільшити колоїдну стабільність мастильних матеріалів можна за рахунок введення додаткових загусників, що модифікують структуру мастил. Однак підвищення температури, яке завжди призводить до зниження

в'язкості дисперсійного середовища, не обов'язково інтенсифікує процес відділення олії з мильних мастил. Це пов'язано з тим, що мила при цьому можуть переходити в нові фазові стани з кращою здатністю, що загущає.

Хімічна стабільність(ГОСТ 5734-76 [15]). Порушення складу та властивостей мастила може відбуватися внаслідок окислення. Хімічно стабільними вважають мастила, у яких експлуатаційні властивості залишаються у межах норми протягом усього терміну служби. При окисненні зростає кислотність і, як наслідок, корозійність КММ, а також ущільнення.

Хімічна стабільність КММ визначається їх складом: рідка основа має бути хімічно стабільною. Згущувачі впливають на стабільність меншою мірою. Вона залежить від металів, що входять до з'єднання мильного загусника і збільшується по наступному ряду: $Li \rightarrow Na \rightarrow Ca \rightarrow Mg \rightarrow Ba \rightarrow K \rightarrow Al$.

Найбільша стабільність характерна мастильним матеріалам на основі синтетичних загусників. Вуглеводневі та мильні мастила за хімічною стабільністю приблизно рівноцінні. Наявність таких домішок у складі КММ, як органічних кислот, гліцерину, вологи, лугів зменшують хімічну стабільність та збільшують швидкість окислення мастильного матеріалу [16].

Водостійкість(ГОСТ ISO 11009-2013 [17]). Водостійкість залежить

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

від двох параметрів: перший - здатність ММ не розчинятися у воді, не змиватися водою з поверхонь, що змащуються, і не вимиватися з трибовузлів; другий - ступінь поглинання вологи (гігроскопічності) і зміни комплексу властивостей через дію вологи, що потрапила в мастильний матеріал.

Для всіх типів КММ розчинність у воді є неприпустимою і залежить від виду загусника, що застосовується. Практично всі види загусників у воді не розчиняються, за винятком деяких мил по ряду зменшення розчинності: $K \rightarrow Na \rightarrow Li \rightarrow Mg \rightarrow Ca \rightarrow Hg \rightarrow Pb \rightarrow Al$. Найбільше вплив на зменшення розчинності довжина ланцюжка карбонових кислот, що використовуються для отримання мила. Через дуже високу розчинність мастильних матеріалів на калієвих і натрієвих загусниках такі види мастильних матеріалів використовуються дуже обмежено. Змивання мастила з поверхні тертя залежить від адгезійних властивостей з металами [16].

Гігроскопічність, тобто поглинання води, може бути викликане не тільки контактом мастила з водою, але з вологістю з повітря. Однозначно говорити про шкідливість гігроскопічності не можна. Поглинання води мастильним матеріалом погіршує його експлуатаційні властивості, проте така дія підвищує консерваційну дію мастила, оскільки вода не досягає поверхонь металу. Високу гігроскопічність мають комплексні кальцієві мастила (кСа-мастила), при вологості більше 60%. У більшості випадків гігроскопічність мастила оборотний процес. До насичення вологою з повітря схильні і Na-мастила. Таке явище можливе при негерметичності вузлів тертя або тари для зберігання. Найбільшу гігроскопічність мають кальцієві мастильні матеріали, найменшою – літієві та вуглеводневі КММ [2].

Випаровуваність(ГОСТ 9566-74 [18]) КММ спостерігається при їх тривалому використанні, особливо при нанесенні тонким шаром, а також за

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

підвищеної температури. Випарюваність мастильного матеріалу підвищується у вакуумі. На випаровування впливає фракційний склад дисперсійного середовища (олії). При випаровуванні олії КММ розтріскується, на поверхні шару мастила з'являються скоринки. Сильне випаровування призводить до утворення сухих залишків мила на поверхні металу. В цілому випаровування веде до ущільнення мастил та погіршення їх в'язкісно-температурних характеристик, особливо при низьких температурах [19]. Випарюваність мастильних матеріалів практично не залежить від технології отримання та складу.

Термозміцнення(ГОСТ 7143-73 [20].) для КММ має негативний вплив, так як це викликає збільшення межі міцності і, як наслідок, погіршення доступу мастила до зони тертя. Термозміцнення визначається зміною сил взаємодії між частинками загусника, складом базової олії та наявності поверхнево-активних речовин. Зміна сил взаємодії між частинками загусника мильних мастил визначається полярністю і поляризацією молекул. Термозміцнення тим інтенсивніше, що нижча полярність і вища поляризованість молекул загусника. Найбільшу схильність до термозміцнення мають мастильні матеріали на Na-милах, а найменшою - Li-милах [21].

Мікробіологічна стійкість(ГОСТ 9.082-77 [22].). Деякі компоненти КММ можуть бути їжею для бактерій, розвиток яких призводить до часткового руйнування або змін колоїдної структури мастильного матеріалу. Для попередження шкідливої дії бактерій в деякі змащення як біоциди вводяться солі бензойної кислоти, саліцилового фенолу та їх похідні, а також металеві сполуки ртуті та олова. Бактерицидні властивості мають також деякі інгібітори окислення та корозії [23].

Радіаційна стійкість- Показник стабільності мастил при впливі випромінювань високих енергій. Високоенергетична дія випромінювання або бомбардування частинками високої енергії призводить до руйнування

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

зв'язків між агрегатами загусника, руйнування волокон, колоїдної структури та пов'язаних з цим негативним змін властивостей. В результаті радіолізу утворюються вільні радикали, що вириваються інгібіторами окислення, а це викликає інтенсивне зниження концентрації інгібітору.

Радіоактивність призводить до активізації процесів окиснення та полімеризації. В результаті полімеризації зростає в'язкість олії та зменшується penetрація мастила. У початковій фазі опромінення penetрація зростає в результаті негативного впливу на каркас загусника. Після тривалого впливу випромінювання penetрація зменшується через зміни мастила, що призводять до збільшення його в'язкості. При тривалому впливі та великих дозах випромінювання пластичне мастило твердне. Високу радіаційну стійкість мають КММ, у яких як дисперсійної фази використані ароматичні олії, що мають кільцеву структуру. Хорошу радіоактивну стійкість мають поліфенілові і силіконові масла [24].

Протизносні, протизадирні (триботехнічні) властивості проявляються у здатності КММ попереджати всі види зношування і запобігати заїдання деталей, що труться.

КММ забезпечують більш високі протизносні властивості, ніж рідкі олії, на основі яких вони виготовлені. Це пояснюється низкою причин. Насамперед, необхідно враховувати протизносну здатність загусників, що є здебільшого ефективними поверхнево-активними речовинами та наповнювачами.

Висока складність та комплексність фізичних, хімічних та механічних процесів, що відбуваються при терті, не дозволяє критеріально визначити ефективність мастильного матеріалу, як за антифрикційними, так і протизносними властивостями.

Основні параметри, за якими оцінюється мастильна здатність КММ: коефіцієнт тертя, знос, критичне нормальне навантаження, індекс задира і

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

температура руйнування мастильної плівки. Для оцінки цих параметрів використовують машини тертя з різними видами контактування трібосполучення. За типом вузла тертя розрізняють кулькові машини, з циліндрами, що схрещуються або труться про плоскі зразки, зі ковзанням повзуна по диску, зворотно-поступальні і т. п. Найбільшого поширення набули машини тертя з вузлом, який являє собою піраміду з чотирьох куль, є також дво- та п'ятикулькові машини [25].

Дослідження олій, які є компонентами консистентних мастил, показали [25], що при граничному терті зменшення тертя та зносу залежить не від в'язкості цих олій, а від їх мастильної здатності, яка залежить від адсорбції молекул різної полярності на поверхнях тертя та утворення граничних плівок, стійких до дії контактних навантажень.

Встановлено, що неполярні середовища, такі як мінеральні олії, адсорбують на поверхні металу первинну моно-плівку з органічних кислот та спиртів, при цьому полярні групи розташовуються до металу, а зовнішня поверхня плівки утворюється метильними групами вуглеводневих радикалів адсорбованих молекул [26]. Далі мономолекулярний шар добудовується нашаруванням бимолекулярними димерами поверхнево-активних речовин. В залежності від умов тертя товщина граничної мастильної плівки може складатися від декількох до 400...500 молекулярних шарів і досягати товщини близько 1 мкм. Такі плівки мають анізотропність механічних властивостей, яка викликана силами взаємодії активних груп молекул з поверхнею металу значно більше сил взаємодії в площинах, що утворюються метильними групами молекул сусідніх шарів. неполярні молекули вуглеводнів також орієнтуються та адсорбуються під дією силового поля металу, але утворюють неміцні моноплівки, які легко руйнуються через слабкий зв'язок сусідніх молекул. Молекули полярних і неполярних речовин можуть формувати плівки змішаної будови, що мають нестійкість [1].

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Жирні кислоти або їх ефіри, сполуки, що містять сірку, хлор або фосфор, можуть утворювати хімічні сорбційні плівки на поверхні металу. Мастильні матеріали, загущені милами, утворених жирними кислотами або їх ефірами, що мають низьку температуру плавлення, не можуть працювати у важко навантажених вузлах тертя, що виділяють велику кількість тепла. У важких умовах навантаження трибовузла найбільш ефективні мастильні матеріали, що утворюють плівки сульфідів, хлоридів, фосфатів та інших елементів, що мають протизадирні властивості [27].

В умовах граничного тертя деякі окисні плівки, що формуються на металі в результаті доступу кисню з атмосфери або мастильного матеріалу, підвищують протизносні властивості. Ці плівки мають меншу проти чистим металом механічну міцність і меншу температуру плавлення. Модифікація поверхонь тертя в

Процес роботи призводить до зниження їх шорсткості і супроводжується більш рівномірним розподілом навантаження в контакті, при цьому можливе також і утворення маслами суцільної плівки. Модифікування поверхні тертя завжди викликає зменшення сили тертя, але не завжди знижує знос. Так, хімічна взаємодія активних сполук з металом в умовах граничного тертя може призводити до дещо більшого зношування поверхонь, особливо в період опрацювання [1].

При виборі сполук, що визначають утворення захисних поверхневих плівок, необхідно шукати компроміс між їхньою протизносною та протизадирною ефективністю. При цьому створюється оптимальна мікрогеометрія поверхонь тертя, що знижує ймовірність підвищеного зносу, заїдання та зварювання поверхонь тертя.

1.2 Структура та в'язкість консистентних мастильних матеріалів

КММ являє собою колоїдну систему, що містить структуровану

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

дисперсну фазу (у вигляді загусника) та дисперсне середовище (масло). Можливі компоненти, що визначають властивості КММ, представлені на рис. 1.2.

Для формування структури КММ загусник не повинен утворювати ні розчину в олії, ні колоїдної дисперсії, а повинен утримуватися у вигляді дисперсної фази з спеціальним структурним каркасом. Найпоширенішими загусниками є мила на основі металів. Загущаюча дія та функціональні властивості таких мил залежать від аніонної та катіонної частини молекули, що визначає взаємодію в малополярному масляному середовищі. Малополярність середовища зумовлює високу чутливість структуроутворення до різних впливів. Мاستила, приготовані на полярних середовищах (на основі синтетичних масел) більш стійкі до зовнішніх впливів.

Зв'язки в КММ можуть проявлятися різними способами: 1 -силами молекулярного тяжіння між загусником і полярними компонентами, так само може бути екстрагована за рахунок розчинника; 2 – капілярними силами; 3 – механічною оклюзією. Чим тонша мікрокристалічна сітка, тобто. чим більше відношення поверхні до обсягу мильних кристалів, тим сильніше ефект, що загущає.

Залежно від структури КММ змінюється механізм змащування. У разі малого вмісту мил, що згущують, змащування визначається маслом, а мило сприяє підвищенню несучої здатності. Для досить твердих мастильних матеріалів, що містять велику кількість мильних загусників змащувальна здатність залежить від ступеня шару решітчастою структурою міцелій. У мастилах середньої консистенції, таких як для підшипників кочення, масло і мило знижують тертя і знос. Загущувач являє собою резервуар, що поступово виділяє олію. Якщо підшипник кочення не забезпечується маслом, що виділяється з КММ, настає «олійне голодування», що призводить до передчасного виходу підшипника з

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

ладу. Якщо ж руйнується кристалічна решітка загусника, це теж призводить до швидкого припинення подачі масла з резервуара мильного загусника. Мильні загусники визначають здатність мастильного матеріалу до адгезії та коефіцієнт тертя.[28]

КММ можуть мати довгі, середні або короткі волокнисті структури, які пов'язані з мікроструктурами загусників. Індивідуальні системи загусників відрізняються формою частинок. Натрієві мила охарактеризуються наявністю ґрат з довгих волокон з багатьма точками контакту і довжиною до 0,1 мм. Основні розміри мікроструктури загусників представлені у зведеній таблиці 1.2.

З експериментальних даних [29, 30] відомо, що поведінка КММ у вузлі тертя та її властивості тісно пов'язані зі структурою загусника. Поділ двох основних компонентів КММ може призвести до витікання з мастила масла, що в результаті перестане забезпечувати змащування, а загусник, що залишився, може склеїти вузол тертя даного пристрою.

На рис. 1.1 Подано типові схеми структур КММ з різними загусниками.

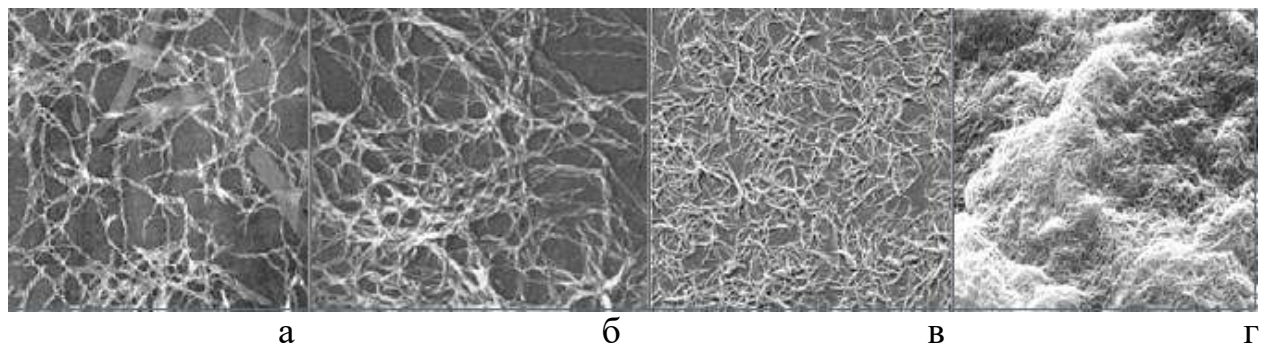


Рис. 1.1 Структура консистентних мастил із загусником. [31]
а – кальцієве мило; б – літієве мило; в – літієвий загусник; г – літієвий комплекс.

Збільшення температури вище температури плавлення компонентів КММ призводить до розплавлення мастила та його витікання з вузла тертя. Механічні дії викликають зрізання волокон загусника, їх фрагментацію,

поділ агрегатів, що утворюють просторову структуру, розкручування волокон і т.п. Як наслідок змінюється в'язкість, межа плинності, пенетрація та інші властивості, пов'язані зі структурою [31].

Відомі багато робіт [32-39], де досліджується зв'язок між структурою і в'язкістю дисперсних систем. В основі теорії реології в'язкопластичних речовин лежить думка Ф.М. Шведова, що структура існує там, де в'язкість змінюється зі зміною швидкості зсуву, а також уявлення П.А. Ребіндер про зниження в'язкості в результаті поступового руйнування структури системи [32].

Існує безліч реологічних моделей [33], що описують перебіг різних систем і консистентних у тому числі. До них відносяться рівняння Шульмана [34], Освальда [35], Кессона [36], Гершеля-Балклі [37], Рі-Ейрінга [38], Бінгама [39]. Необхідно правильно вибрати адекватне реологічне рівняння серед множини, яке має давати хорошу апроксимацію експерименту в широкому діапазоні швидкостей зсуву, включати мінімальну кількість незалежних постійних параметрів, що мають реальний фізичний зміст.

Одна з найпоширеніших реологічних моделей, що становлять поведінку консистентних матеріалів під впливом зовнішнього навантаження і використовується в рамках даної роботи, модель Ю.Бінгама (рис. 1.5 б) [39] у вигляді лінійного рівняння, що апроксимує окрему ділянку повної реологічної кривої за П.А. Ребіндер (рис.1.5а) [32]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

де μ - в'язкість матеріалу, $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву.

Ця ділянка відповідає початковому етапу течії консистентного матеріалу, в якому після досягнення певної граничної напруги τ_0 (званої в реології консистентних матеріалів межею плинності) починається перебіг.

Слід зазначити, що повна реологічна крива визначає постімний

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

перехід від твердого стану системи до плинного стану. На кожній ділянці цієї кривої передбачається свій механізм течії. Апроксимація цих ділянок прямими лініями є корисним наближенням, але потребує обґрунтування за допомогою реологічної моделі.

Обґрунтуванням реологічних рівнянь КММ є мікрореологічні моделі, які пов'язують реологічні властивості з характером руху дисперсних частинок загусника або добавок у в'язкій рідині, силами тяжіння та відштовхування, гідродинамічною взаємодією між частинками.

Не дивлячись на розмаїття реологічних рівнянь, серйозне теоретичне обґрунтування мають деякі моделі, а й можуть працювати обмеженому колі систем. До цього дня підбір найкращої апроксимуючої експериментальні дані та системи реологічної моделі, що описує мікрореологію, залишається важливою проблемою.

1.3 Дисперсні добавки як модифікатори тертя в консистентних мастильних матеріалах

Для поліпшення властивостей КММ у них вводять 0,001-5% (іноді вище) про присадок. Присадки можуть бути віднесені до групи молекулярно-міцелярних добавок, ефективність дії яких, крім природи, залежить від концентрації, умов виробництва та застосування КММ. Присадки суттєво покращують багато характеристик мастильних матеріалів, насамперед окислювальну стабільність, термостійкість, захисні, протизносні властивості тощо.

Більшість присадок – це поверхнево-активні речовини (ПАР). У мильних мастилах основним ПАР є саме мило, хімічна будова та полярність молекул якого визначають об'ємні та поверхневі властивості. Тому для ефективною дію поверхнева активність присадок на металі повинна бути вищою, ніж у загусника. Особливість дії присадок у мастильних матеріалах

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

полягає також у тому, що в обсязі мастила та на кордоні з твердим тілом можлива взаємодія різних ПАР (синергетична або антагоністична) [11].

Існує кілька типів присадок до КММ: антиокислювальні, антикорозійні, протизносні, протизадирні, деактиватори металів, антирадіаційні. Всі вони досить схожі на присадки до рідких олій. Більш специфічними є присадки, що підвищують водостійкість та усувають термозміцнення мастил. Можна назвати й інші присадки: що зменшують піноутворення, що підвищують адгезію до металів, що покращують колоїдну стабільність та ін.

Антиокислювальні присадки. Підвищення вимог, що висуваються до мастильних матеріалів, і насамперед підвищення робочих температур, нормальних навантажень та термінів експлуатації трибовузлів викликає необхідність збільшення стабільності мастильних матеріалів до окислення. Окислення мастил значно погіршує їх фізико-хімічні та експлуатаційні властивості. Мастильні матеріали на основі мил швидше окислюються ніж олії, на основі яких вони виготовлені. Це тим, що мила каталізують окислення, швидкість якого залежить від типу і валентності катіону мил. Мила одновалентних металів мають більшу каталітичну активність порівняно з милами полівалентних металів [40].

КММ представляють складну колоїдну систему, стабільність до окислення якої, крім зовнішніх умов, визначається типом і концентрацією загусника, складом дисперсійного середовища і поверхнево-активних речовин, що містяться в ній, а також технологією приготування. Стабільність КММ до окислення можна підвищити, підбираючи відповідний склад сировини та оптимальний режим технології приготування. Однак не завжди вдається отримати мастильні матеріали з досить високою стабільністю до окислення за жорстких режимів експлуатації. Найбільш ефективний спосіб запобігання окисленню КММ - введення в них антиокислювачів.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Консистентні мастила повинні забезпечувати працездатність різних вузлів тертя в широкому діапазоні температур та контактних навантажень, практично не змінюючи свої властивості протягом усього періоду експлуатації трибовузлів та при їх зберіганні. Через окислення КММ змінює свою міцність та в'язкість, знижуючи колоїдну та механічну стабільність. Високі температури при окисненні можуть супроводжуватися підвищеним випаром базової олії, що призводить до висихання КММ.

При тривалому зберіганні літєвої мастила за рахунок накопичення в ній продуктів окислення зменшується міцність мастильної плівки. Значно погіршуються протизносні властивості цих мастил зі збільшенням температури випробування, що визначає глибину їхнього окиснення. [41]

Протизадирні та протизносні присадки. Основне призначення КММ полягає у зменшенні тертя та зносу рухомих частин машин та механізмів, запобіганні задиранню контактних поверхонь.

Перше місце за обсягом виробництва та застосування серед консистентних мастил займають антифрикційні ММ.

Основний позитивний момент змащувальної дії присадок у ММ - утворення на поверхні металу граничного шару з особливими властивостями або зниження твердості поверхні за рахунок адсорбції. Хімічні перетворення відіграють істотну роль поверхнях тертя.

Як тертя, так і знос металевих поверхонь супроводжуються багатьма фізичними явищами і в металі, і в самому мастилі. Мастильна здатність КММ є складною функцією їх структури, складу та фізико-хімічних властивостей. Каркас мастила (просторова коагуляційна структура) зі своїми характерними об'ємно-механічними властивостями, а також присутність у них різноманітних ПАР дає підстави вважати, що їх мастильні властивості пов'язані з об'ємною, адсорбційною та хемосорбційною діями [42].

На практиці часто трапляється, що покращуючи одні характеристики

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

КММ шляхом застосування тих чи інших присадок можуть істотно погіршуватися інші властивості мастильного матеріалу. Наприклад, деякі протизадирні присадки розм'якшують мастильний матеріал, зменшуючи його межу міцності. З іншого боку, відомі присадки, які посилюють ефективність одна одної.

Сполуки, що містять хлор, сірку, фосфор використовують як протизносні та протизадирні присадки [43]. Однак вагому конкуренцію даним присадкам у промисловості склали тверді дисперсні добавки (наповнювачі), такі як графіт та дисульфід молібдену. Позитивна дія таких добавок полягає в тому, що вони мають не тільки високу мастильну здатність, але й не викликають побічних негативних ефектів, взаємодіючи з іншими компонентами мастильного матеріалу [44].

Так само покращує мастильну здатність КММ введення в них високодисперсних порошків кристалічних речовин з шаруватою структурою: графіту, серпентиніту, дисульфиду і диселеніду молібдену, диселенідів вольфраму і ніобію, нітриду бору і т. д. Більшість з цих речовин нерідко використовуються. Заповнюючи мікронерівності на поверхні твердих тіл, порошки з шаруватою структурою під впливом деформацій утворюють на них орієнтовані плівки, які витримують великі навантаження по нормалі.

кристалічним поверхням та легко деформуються у напрямку зсуву [1].

Наповнювачі є різновидом дисперсних добавок, практично нерозчинних у дисперсійному середовищі і утворюють в мастильних матеріалах окрему фазу з розміром частинок значно більшими, ніж частинки загусника. Наповнювачі відносять до колоїдно-суспензійних добавок, яким характерна незмінність розмірів частинок у всьому інтервалі температур отримання та експлуатації мастила. Їм властиво не тільки нерозчинність у мастильному матеріалі, але також і менший ступінь дисперсності. Основні властивості, що визначають їхню застосовність -

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

дисперсність і поверхневі властивості частинок. Головна властивість наповнювачів полягає в тому, що збільшення концентрації дисперсних частинок у мастильних матеріалах не супроводжується різкими змінами об'ємних властивостей. [41]

Ефект від використання дисперсних добавок визначається складом мастила, властивостями загусника та дисперсійним середовищем. Властивості наповнених мастил визначаються характером взаємодії наповнювача з іншими компонентами КММ. Тому крім складу мастильного матеріалу важливим є природа, концентрація, розмір частинок наповнювача та спосіб його введення. Зміна структури та властивостей ММ при спільному використанні наповнювачів та присадок визначається їх взаємодією із загусниками та дисперсійним середовищем та дією присадок ПАР на тверді дисперсні частинки. Можливості поліпшення властивостей мастил за допомогою наповнювачів різноманітні: варіювання складу, властивостей та концентрації добавок, комплексне використання наповнювачів у поєднанні один з одним та з присадками.

Основні вимоги якості твердих порошкоподібних наповнювачів, поряд з їхньою мастильною здатністю та корозійними властивостями, зводяться до ступеня:

- адгезії до металевої поверхні та гарне змочування дисперсійним середовищем;
- чистоти продукту (98,5-99,5%) та повна відсутність абразивних домішок;
- дисперсності частинок та вузький фракційний склад;
- хімічної, гідролітичної та термічної стабільності.

З відкриттям вітчизняними вченими Д.Н. Гаркуновим, В.І. Крагельським, В.Г. Шимановським та В.М. Лозовським ефекту вибіркового переносу при терті, що лягло основою безрозбірного відновлення зношуються поверхонь тертя у процесі роботи машини.[45] Сутність такого процесу полягає у наступному. Працюючи вузла тертя на трибопарах

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

виникає навантаження, але в окремих ділянках «понад навантаження», що викликає виділення надлишкової енергії веде до зношування. При введенні в зону підвищеного зношування спеціального дисперсного матеріалу енергія руйнування перетворюється на енергію відновлення слідів зношування по ходу роботи трибовузла [27, 46].

Такими спеціальними матеріалами, відомими в даний час є: металоплакуючі, металізанти та реметалізанти, кондиціонери та рекондиціонери, модифікатори та металокерамічні спеціальні склади (ремонтно-відновлювальні склади-РВС) [47-50].

Відкриття ефекту безносності викликало нове пояснення явищ, що відбуваються при терті та розвитку нових методів у вирішенні завдань триботехніки. Спочатку тертя розглядалося як процес руйнування, проте цей процес є не одностороннім і може характеризуватись як руйнівною, так і відновною дією. За певних умов, при виникненні сукупності фізичних або хімічних явищ для відкритих трибосистем, які обмінюються із зовнішнім середовищем енергією та речовиною, можуть виникати еволюційні стаціонарно нерівноважні системи з високим ступенем організації.

Відкриття виборчого перенесення стало передумовою до створення мастильних матеріалів із вмістом кольорових металів, які можуть викликати окислювально-відновлювальні реакції на початковому етапі роботи трибовузла і зменшити свою інтенсивність у встановленому режимі, а також бути джерелом виділення необхідних матеріалів для зміни поверхневого шару.

Металоплакувальні наповнювачі-це дисперсні добавки, що застосовуються в КММ для підвищення триботехнічних властивостей, яке представляє собою високодисперсні порошки плакуючих металів або сплавів та їх сумішей, здатні забезпечувати процеси автокомпенсації зношування в рухомих трибосполучення машин і механізмів.

Металоплакуючі ММ розрізняють за складом, враховуючи природу

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

плакуючого елемента, хімічної будови та призначення. Ще на початку ХХ століття використовували плакувальний компонент у вигляді амальгами міді та свинцю у складі КММ. З того часу до складу КММ вводилося безліч металоплауючих компонентів у вигляді різних металів, сплавів та хімічних сполук. В даний час встановлено, що плакуючі метали Cu, Sn, Pb, Al, Zn, Au, Ag, Cd та їх сплави, наприклад, латунь та бронза,

а також надпластичні сплави типу Розе, Вуда, полуди, бабіти і т.д. істотно підвищують триботехнічні характеристики КММ, збільшуючи межі навантаження, зменшуючи знос і коефіцієнт тертя в рази за рахунок реалізації ефекту беззносності, що залежить від зовнішніх умов (тиск, швидкість, температура). Принцип дії цього ефекту полягає в тому, що метал, що входить до складу КММ, за певних зовнішніх умов сформує захисну металеву плівку на поверхні трибоконтакту. [48]

Властивості таких захисних металевих плівок можна керувати за допомогою складу та властивостей вихідних дисперсних порошків таким чином, щоб вони поєднували одночасно комплекс необхідних властивостей, наприклад, надпластичність із зносостійкістю або інші контрольовані параметри. Таким чином, металоплакуючі добавки у складі КММ є одним із засобів покращення триботехнічних характеристик.

Полімерні та вуглецеві дисперсні добавки. В даний час як дисперсні наповнювачі в КММ використовують синтетичні порошкоподібні політетрафторетилени (PTFE), дитіофосфати і дитіокарбамати молібдену. Незважаючи на досить високу вартість, PTFE є найбільш поширеним полімерним наповнювачем мастильних матеріалів, який створює на поверхнях, що контактують, фторопластове або тефлонове покриття, що призводить до різкого зменшення коефіцієнта тертя, зносу і усуває дефекти поверхні. [51]

Ще одним конкурентоспроможним наповнювачем КММ можуть виступати високомолекулярні поліолефінові дисперсні частинки, наприклад

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

гідроксиди та дифосфати деяких лужноземельних металів, сульфід вітму, гексагональний нітрид бору та сульфід олова, що покращують протизадирні та протизносні властивості базового мастильного матеріалу.

Як модифікатор тертя так само використовуються наноматеріали органічних дендрімерів та їх металовмісні різновиди. Дуже перспективним є застосування фулеренів в мастильних матеріалах, принцип дії яких реалізується за рахунок рухливості шарів фулеренів між шарами графіту, що, у свою чергу, може сприяти створенню мастила з нульовим тертям. [52, 53] Допускається і використання графенів, що є одиночним шаром атомів вуглецю, з'єднаних sp^2 зв'язками. Іншими прикладами твердих речовин, перспективними для застосування як наноматеріалів у складі мастильних матеріалів, є полііміди, заповнені фулеренами, що мають високий протизносний потенціал; а також композити на основі нанотрубок та епоксиз'єднань для пасивного демпфування вібрацій.

1.4 Перспективи застосування гідросилікатів магнезю як модифікаторів тертя

При всій різноманітності дисперсних добавок, використовуваних підвищення триботехнічних характеристик КММ, отримані штучним шляхом, особливий інтерес становлять природні мінерали. При відносно низькій вартості, вони мають унікальні триботехнічні властивості. Прикладами таких мінералів можуть бути талькіт, серпентиніт, графіт і молібденіт. У трибопарах при граничному терті у присутності цих мінералів на поверхнях тертя утворюються захисні плівки з особливою структурою. Утворені плівки вирівнюють нерівності профілю поверхонь пар тертя і протидіють прямому контакту поверхонь, що труться. Подібні природні мінеральні дисперсні добавки, що використовуються в ММ, зазвичай називають "геомодифікаторами тертя". [54,55]

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Розглянемо відомі гіпотези механізму роботи природних мінералів на основі шаруватих гідросилікатів:

- Одна з перших теорій, що пояснює підвищення зносостійких властивостей ММ – напресовування або наклепування дисперсних частинок гідросилікатів на поверхнях тертя та головний фактор виникнення захисних плівок – механічний тиск;
- Друга теорія розглядає сукупну дію двох процесів: температури і тиску. Дані процеси описуються в мікрOMETалургії та іонній дифузії. У цій теорії вважається, що деформація виступів профілю поверхонь призводить до локальних підвищення температури (спалахів) і в присутності гідросилікатів відбуваються мікрOMETалургійні та дифузійні процеси трибосередовища в поверхнях трибопари. Також під час тертя утворюються нові сполуки, які наповнюють западини профілю поверхні, зменшуючи шорсткість і збільшуючи товщину поверхонь тертя;
- Теорія В.В. Зуєва [56] про двостадійний процес механіко-термічної та хімічної деструкції дисперсних частинок гідросилікатів магнію, яка враховує внесок водню у відновленні зруйнованих зв'язків октаедричних сполук кремнію з киснем, а також реакцій заміщення в гідросилікаті атомів магнію залізом і одночасно протікає з можливою дифузією магнію у них;
- Теорія виникнення скління поверхонь тертя, що відбувається за рахунок утворення залізо-магнієвих склоподібних тіл, спорідненого до заліза. Цим склоподібним тілам характерні високі фізико-механічні характеристики: підвищена твердість, обмежена провідність струму, теплостійкість та оптичні властивості. Однак у цій теорії не враховуються чинники, які б пояснити маслофільність утвореної поверхні;
- Теорія, яка передбачає подібність до процесу виборчого перенесення дії гідросилікатів магнію в зоні тертя. Ця теорія найбільше піддається критиці через несумісність фізико-хімічних механізмів діючих у зоні тертя у присутності гідросилікатів (за умов лужного середовища мастила) й у парі

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

сталь – мідь (за умов кислого середовища гліцерину), де найефективніше реалізується ефект вибіркового переносу;

- Теорія допоміжної дії лакоутворення в результаті високотемпературних процесів на межі мастила, що призводить до насичення залакованих поверхонь, що труться добавками, що знаходяться в ММ. В результаті термодеструкції на поверхнях трибовузла відкладаються важкі вуглеводневі фракції, що призводять до утворення плівок – лаків. Передбачається, що це супутній процес, який відбувається незалежно від добавок гідросилікатів;

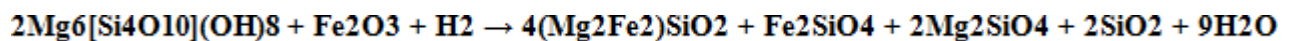
- Теорія ізоморфізму, що базується на припущенні, що у складах споріднені елементи заміняють один одного (прикладом може служити ізовалентний ізоморфізм іона Mg^{2+} до двовалентного іона Fe^{2+} , що мають близькі за розміром атоми). При цьому можливий перехід іонів магнію з зруйнованої структури гідросилікату в поверхню залізовмісної трибопари. Ізоморфізм важливий, але недостатній для утворення захисного покриття.

- Теорія Л.І. Погодаєва та Д.М. Телуха розглядає послідовність різних процесів. Насамперед приділяється увага хімічному складу гідросилікатів, їх стабільності та сталості властивостей. Згідно з дослідженнями в рамках даної теорії, найбільш кращий для підвищення триботехнічних характеристик поліморфний різновид серпентиніту - лізард. У лізардиті спостерігається деформація кристалічних ґрат, що призводить до анізотропії властивостей кристала. Цей мінерал мають структуру, де внутрішні шари мають слабкий зв'язок між атомами, а зовнішні атомні площини мають сильні ковалентні зв'язки, що створює зсув внутрішніх шарів щодо нерухомих зовнішніх, пов'язаних з металевими поверхнями трибоспряження. Відповідно до Д.М. Телух, магній і вода, що входять до складу гідросилікату, беруть участь в іонному обміні і на поверхнях тертя утворюються гідратовані шари з гідрофільним прошарком.

Наступний процес, який враховує дана теорія, пов'язаний з

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

механічною дією поверхонь тертя на гідросилікат (серпентиніт), що призводить до подрібнення дисперсних частинок до оптимального розміру та виділення вільної енергії, а також агломерування дрібніших частинок з поглинанням енергії. У процесі тертя частинки мінералів шаржують поверхні трибосполучень, звільняють від окисних плівок і модифікують профіль поверхні тертя. Модифікація поверхні йде по двох шляхах: механічна зміна профілю поверхні за рахунок заповнення нерівностей мінералом та хімічна дія в умовах виділення тепла та присутності каталізаторів, прискорюються іонно-обмінні реакції, атоми магнію в гідросилікаті заміщаються атомами заліза, а металева поверхня насичується атомами реакції:



Далі, за цією реакцією відбувається спікання дисперсних частинок під дією тиску та нагрівання від тертя з утворенням антифрикційного покриття.

- Теорія передбачає виникнення покриттів не металокерамічних, а вуглецево-кластерних алмазоподібних. Для таких покриттів необхідно виконання умови високоенергетичного на вихідний матеріал [59]. Утворення таких покриттів при граничному або змішаному вигляді тертя в мастилi може бути у високотемпературній трибоплазмі [60].

Поєднуючи всі представлені теорії можна сформулювати сукупність основних етапів роботи добавок гідросилікату в трибовузлі:

Перший етап - м'яка абразивна дія на поверхні тертя вихідними дисперсними частками гідросилікатів і, як наслідок, видалення окисних плівок та виникнення ювенільних поверхонь.

Другий етап – фізико-механічне та хімічне руйнування частинок гідросилікатів з утворенням плівок із силікатів та іонів магнію. Необхідною умовою на даному етапі є подрібнення дисперсних частинок гідросилікату до оптимального розміру всередині трисполучення з виділенням вільної енергії та води.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Третій етап - термохімічні реакції зумовлені взаємодією між ювенільними поверхнями металу і ММ, що з'явилися, містить дисперсні добавки гідросилікату.

Представлені вище теорії формування захисних покриттів на основі гідросилікатів магнію ММ послідовно доповнюють і по суті представлені у своїй історичній послідовності виникнення. На початку застосування складів на основі гідросилікатів враховувалися один або кілька суттєвих факторів на підставі особистих переваг авторів, а зі збільшенням кількості таких теорій з'явилися передумови для поєднання цих факторів, що поглибили розуміння дії дисперсних частинок гідросилікатів, як триботехнічних складів, внесених до зони контакту поверхонь у присутності третього тіла – РМ. Однак більшість цих теорій не враховують зміни сукупності властивостей (структура, в'язкість, межа зсуву тощо) самого РМ, як комплексного ефекту від застосування дисперсних добавок гідросилікатів у трибовузлі.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2 ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. МЕТОДИКИ ТА МАТЕРІАЛИ

2.1 Властивості вибраних консистентних мастильних матеріалів

В якості базового консистентного мастильного матеріалу (для дослідження триботехнічних властивостей добавок на основі гідросилікату магнію) обрано багатоцільове антифрикційне водостійке мастило Літол-24 (ГОСТ 21150-87), одержуване загущенням нафтових масел (в'язкістю 60-75 мм²/с) кислоти. Літол-24 являє собою в'язку світло-жовту однорідну мазь.

Підстави вибору:

1. Широке застосування в техніці;
2. Зберігає консистенцію та мастильну здатність при високих та низьких температурах;
3. Міцно утримується на поверхнях, що змащуються;
4. Виготовляється на основі високоякісної мінеральної олії (І-40) і загусників на основі літієвого мила;
5. Має високою колоїдний, хімічної і механічною стабільністю.
6. Відсутність протизадирних та протизносних присадок

Відповідно до наведеної таблиці фізико-хімічних характеристик базового КММ Літол-24 відбиралися зразки виробників з найбільшими та найменшими триботехнічними показниками: «Газпром» та "ARGO". Також проводилися випробування здатність відновлювати структурний каркас КММ після екстремального теплового впливу. Випробування полягало в нагріванні зразка ММ до температури краплепадіння (~200оС) з подальшим охолодженням і аналізом структури, що утворилася. За результатами цього випробування спостерігалася деградація структури в обох КММ із частковим відновленням структурних каркасів та консистентного стану у РМ «ARGO». Коли, як ММ, «Газпром» повністю втратив здатність до відновлення консистентного стану.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

На підставі проведеного аналізу виробників товарних мастил обрано найбільш задовольняє за співвідношенням ціна – комплекс технічних характеристик мастильний матеріал Літол-24 фірми «ARGO».

2.2 Дисперсні добавки

Вибір дисперсних добавок (модифікаторів тертя) для консистентного мастильного матеріалу ґрунтується на літературному огляді, представленому в першому розділі даної роботи. Як такий дисперсний модифікатор у цій роботі виберемо мінерали групи гідросилікатів маґнію.

Спосіб отримання необхідного помелу реалізується шляхом використання поетапного дроблення та подрібнення мінералу. Гірську породу через вібраційний живильник подають у щоківі дробарки для первинного дроблення, відразу після великого дроблення направляють в роторні дробарки або конусні дробарки для дрібного дроблення, а потім для ефективного надтонкого подрібнення матеріалів застосовують кульовий або вібраційний млин. Для видалення рудних мінералів та небажаних домішок маґнезитова порода піддається маґнітній сепарації. Подрібнений матеріал проходить обробку повітряним сепаратором, де поділяється на готовий продукт і грубу фракцію, що повертається на подрібнення.

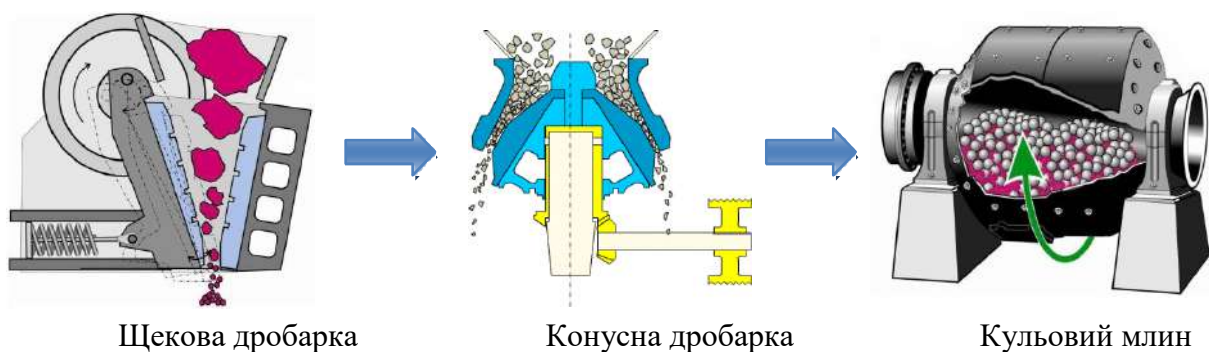


Рис. 2.1 Етапи подрібнення гірської породи

У таблиці 2.3 наведено порівняльні характеристики використаних у цій роботі двох типів гідросилікатів маґнію: серпентиніт та талькіт.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Концентрації частинок модифікаторів у вибраному базовому мастильному матеріалі Літол-24 становлять: 0,5%; 1%; 5%; 10% та 20% за масою. Розмір дисперсних частинок: 100-200нм; 1 – 5 мкм; 10 - 15 мкм; 30-35 мкм.

Для оцінки найбільшої ефективності застосування дисперсних частинок у консистентному мастильному матеріалі були проведені серії випробувань з дисперсними добавками різних видів та з різним відсотковим вмістом на машині тертя ЧШМ-3,2 за ГОСТ 9490-78.

На рис. 2.3 представлений графік залежності розміру плями зношування сталеві кулі ШХ15 від концентрації дисперсного наповнювача різного складу (мідь, дисульфід молібдену, діоксид цирконію, цинк, серпентиніт і талькіт) у базовому мастильному матеріалі Літол-24.

Отримані експериментальні дані підтверджують поліпшення протизносних властивостей мастильного матеріалу шляхом введення дисперсних частинок магнею гідросилікатів, які показують поліпшення триботехнічних характеристик навіть при малих концентраціях в базовому мастильному матеріалі. На підставі даних результатів, перевага в подальших дослідженнях була віддана цьому виду модифікаторів тертя.

2.3 Використані методи досліджень

2.3.1 Перемішування консистентних мастильних матеріалів

Для перемішування та механічного впливу на досліджувані мастильні матеріали з подальшим дослідженням реологічної поведінки структурних складових мастильного матеріалу використовувався воркер (перемішувач).

Воркер – прилад для інтенсивної багаторазової дії на мастильний матеріал з метою зміни стану консистентного мастильного матеріалу, які еквівалентні початковому періоду експлуатації мастильного матеріалу в умовах реальної роботи трибосполучення. Дослідження зразків мастильних матеріалів, що не піддавалися механічному впливу, як правило, не дає

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

інформації про реальну консистенцію мастила в умовах застосування. Дослідження зразків після перемішування воркером, як правило, краще і більш інформативно для перевірки властивостей КММ.

В рамках даної роботи використовувався ручний перемішувач (воркер) мастильного матеріалу (див. рис. 2.4). Прилад складається з однієї сталеві мішалки мастила ручним механізмом важеля, змонтованим на жорсткій сталевій базі.



Рис. 2.2 Ручний перемішувач консистентних мастил (Воркер).

2.3.2 Визначення температури краплі падіння

Відомо, що консистентні мастильні матеріали зі збільшенням температури починають розм'якшуватися з відповідним зменшенням пружних властивостей. Цей процес порівняно повільний, а різні консистентні мастильні матеріали не мають певної температури плавлення. Теплостійкість таких матеріалів визначається за температурою краплепадіння, тобто за такою мінімальною температурою при нагріванні, при якій утворюється перша крапля і під дією сили тяжіння впливає з тестової судини. Визначення температури краплини здійснювалося на апараті SYP4110-I, представленому на рис. 2.5, у діапазоні робочих температур, заявлених виробниками мастильних матеріалів.

2.3.3 Визначення корозійної стійкості

Дослідження корозійної стійкості консистентних мастильних

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

матеріалів проводились за ГОСТ 32335-2013 (ASTM D 4048-10) [70]. Сутність методу полягає в тому, що очищену мідну пластину занурюють у чашу з тестованим консистентним мастилом і нагрівають у термостаті (паровій бані) при заданій температурі $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$ протягом встановленого періоду часу (24 год \pm 5 хв). Корозійну дію зразка мастила, що тестується, визначають за відповідністю зовнішнього вигляду пластини з однією зі ММужок еталона корозії мідної пластинки. При неможливості точно встановити відповідність конкретної пластини еталону, зразок оцінюється еталонном з великим ступенем корозії поверхні.

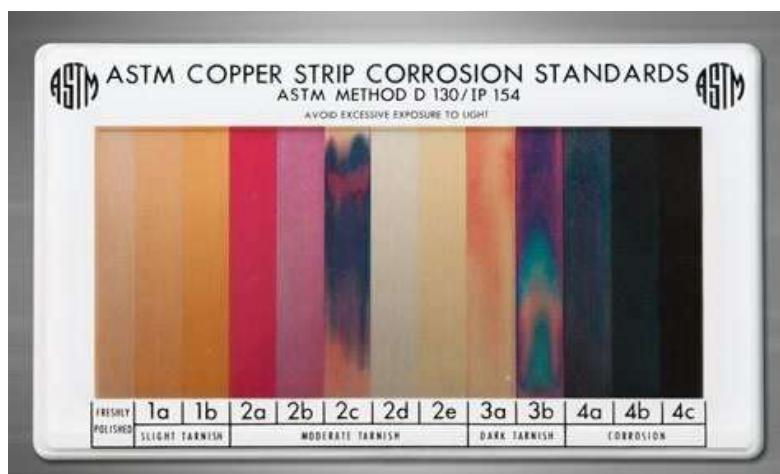


Рис. 2.3 Еталонні ММужки корозії мідної платівки.

Даний метод дозволяє визначити агресивність компонентів консистентного мастильного матеріалу до матеріалів трибопар, що працює в умовах мастила. Найбільш характерним прикладом такої трибопар є підшипник кочення, виникнення корозії в якому призведе до його передчасного виходу з ладу.

2.3.4 Профілометричні дослідження

Для кількісної оцінки рівня нерівності профілю поверхні тертя підшипника кочення, що працює з досліджуваним мастильним матеріалом, проведено профілактичні вимірювання за ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [71]. Характеристика мікрогеометрії поверхні тертя, що показує динаміку

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

зношування в залежності від параметрів (навантаження, швидкості ковзання, температури і т. д.) є шорсткість.

Для оцінки шорсткості поверхні використовувався портативний прилад Mahr MARSURF PS (див. рис. 2.7). Дія цього приладу засноване на методі обмацування нерівностей профілю досліджуваної поверхні твердосплавною голкою (щупом) та перетворення цих механічних переміщень щупа в електричний сигнал, пропорційний цим переміщенням, що обробляється в процесорі приладу. Дані

Оброблені процесором приладу передаються на персональний комп'ютер для подальшої обробки інформації про профіль.



Рис. 2.4 Прилад для вимірювання шорсткості Mahr MARSURF

PS1

2.3.5 Стандартний метод оцінки триботехнічних характеристик

Визначення основних триботехнічних характеристик базового мастильного матеріалу та модифікованого дисперсними добавками, що здійснювалися на чотирикульковій машині тертя ЧШМ – 3,2 (див. рис. 2.8) відповідно до ГОСТ 9490 – 75 в умовах тертя ковзання.

Схема випробувального вузла ЧШМ є пірамідою з чотирьох контактуючих один з одним сталевих куль, нижніх три з яких застопорені в чаші разом із зразком мастила, верхня куля закріплена в цанговому затиску, який одночасно притискається по нормалі і обертається. [72].

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

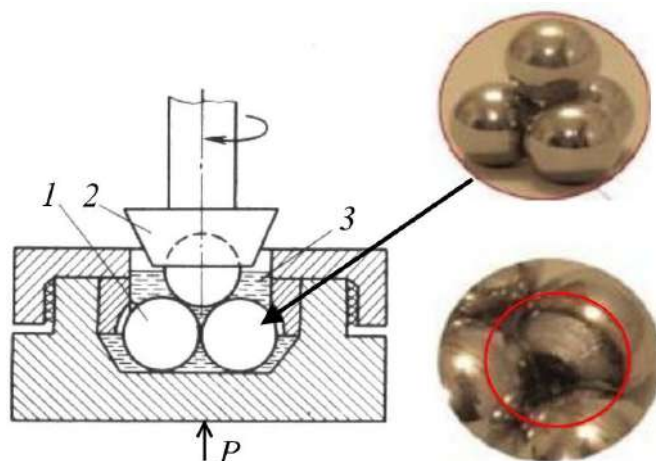


Рис. 2.5 Робочий вузол чотирикулькової машини тертя: 1- кулька; 2- шпindelь, що обертається; 3 - випробуваний мастильний матеріал.

Осьове навантаження може прикладатися в широкому діапазоні значень ($130 \text{ Н} \leq P \leq 10000 \text{ Н}$), а частота обертання шпинделя фіксована і становить 430хв-1. Пару тертя у цій схемі утворюють кульки від підшипників зі сталі ШХ15 діаметром 12,7 мм.

2.3.6 Мікроскопічні дослідження



Рис. 2.6 Автоматичний мікротвердомір Future Tech FM-300

Оптичні мікроскопічні дослідження та визначення мікротвердості проводились на автоматичному мікротвердомірі Future Tech FM-300 (див.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

рис. 2.7).

Прилад Future Tech FM-300 дозволяє проводити вимірювання мікротвердості за методом Віккерса або Кнупа (вдавлювання в матеріал, що випробовується, алмазного наконечника з квадратною основою або чотиригранної піраміди).

Для побудови панорамних зображень та виконання аналізу розподілу структурних складових каркасів досліджуваних консистентних мастильних матеріалів з добавками на основі гідросилікатів магнію та без використання програмного забезпечення Thixomet PRO.

Реєстрація та обробка мікрозображень поверхонь підшипників кочення, плям зношування сталевих куль після випробувань на машині тертя ЧШМ-3,2 проводилися за допомогою металографічного мікровізора μ Vizo-Met-221 (див. рис. 2.10)



Рис. 2.7 Мікровізор металографічний інвертований μ Vizo-Met-221 μ Vizo-

Met-221 дозволяє проводити на екрані дисплея спостереження збільшеного зображення об'єкта у світлому та темному полі, поляризованому світлі та методом диференціально-інтерференційного розмаїття. Технічні характеристики даного приладу представлені у таблиці 2.7.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

2.4. Дослідження реологічних властивостей

В рамках даного дослідження реологічні характеристики консистентних мастил, модифікованих дисперсними добавками на основі гідросилікатів магнію визначалися за ГОСТ 26581-85 [8] на ротаційному віскозиметрі Brookfield DV2T (див. рис. 2.11).



Рис. 2.8 Ротаційний віскозиметр Brookfield DV2T

Ротаційний віскозиметр призначений для вимірювання опору рідини до закінчення при заданій швидкості зсуву. Робота віскозиметра Brookfield DV2T заснована на обертанні шпинделя, зануреного в зразок мастильного матеріалу, закріпленого на пружному каліброваному елементі. Уповільнення шпинделя, викликане в'язкістю мастильного матеріалу, вимірюється по відхиленню пружного елемента. Відхилення пружного елемента перетворюється на електричний сигнал ротаційним перетворювачем. Діапазон вимірюваної в'язкості DV2T залежить від швидкості обертання шпинделя, від його розмірів та форми. Основні характеристики віскозиметра Brookfield DV2T визначаються точністю ± 1.0 % залежно від вибраного діапазону, відтворюваність при правильному виборі діапазонів вимірювань ± 0.2 %.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Для керування та збору даних на комп'ютер використовується програмне забезпечення – Rheocalc. Rheocalc дозволяє обробляти реологічні дані в автоматичному режимі, накладати кілька графіків один на одного, розраховувати математичні моделі. Підтримувані математичні моделі: Bingham, Casson, Casson NCA/CMA, Power Law, IPC Paste, Herschel-Bulkley, Thix Index.

У цьому дослідженні для збору даних та аналізу реології КММ використовувалася математична модель Bingham, сутність якої описана у літературному огляді першого розділу дисертаційної роботи.

2.5. Хімічний аналіз дисперсних добавок

Хімічний склад вихідних порошкових матеріалів магнію гідросилікатів визначався за допомогою рентгенівського дифрактометра Bruker D8 Advance (див. рис. 2.12). Метод рентгенівської дифракції дозволяє ідентифікувати фази кристалітів та проводити їх кількісний аналіз.

Принцип дії дифрактометра заснований на дифракції рентгенівських променів від атомних площин кристалічних ґрат досліджуваної речовини. Дифракція рентгенівських променів відповідає закону Бреггу-Брентано. (Див. рис. 2.13).



Рис. 2.9 Рентгенівський дифрактометр Bruker D8 Advance

Дифрактометр включає рентгенівську головку з анодами з міді, кобальту, хрому, молібдену, заліза, вольфраму, титану або срібла, гоніометра, блоків детектування та системи управління, збору та обробки

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

даних. Дифрактометр Bruker D8 Advance виконаний у вигляді єдиного модуля, який підключається до комп'ютера, що управляє.

Аналіз вихідних дисперсних частинок гідросилікатів магнію виконаний на дифрактометрі D8 Advance з вертикальним гоніометром Θ - Θ , фокусуванням по Бреггу-Брентано, на β -фільтрованому $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$, Ni-фільтр), з обертанням зразка (30 /хв) у площині тримача, реєстрацією дифракційної картини високошвидкісним детектором LynxEye (кут захоплення $3,2^\circ$) фірми Bruker, у діапазоні кутів $2\Theta=8-120^\circ$, з кроком сканування $0,02^\circ$ та часом накопичення 113 с/крок . Режим роботи трубки $U = 40 \text{ кВ}$, $I = 40 \text{ мА}$.

Для первинної обробки рентгенограми (видалення фону) та визначення фазового складу використовувалося програмне забезпечення DiffracPlus EVA (компанія Bruker AXS) та порошкова база даних JCPDS PDF-2.

Отримані за допомогою даного методу дослідження дифрактограми є розподілом піків певної форми та інтенсивності залежно від енергії характеристичного випромінювання конкретної фази.

2.6. Пристрій для випробування мастильних матеріалів у підшипниках кочення

Випробування на машинах тертя мають умовний характер, оскільки не моделюють жодного реального випадку роботи вузла. До того ж результати випробування одного і того ж мастильного матеріалу на різних машинах тертя не завжди можна порівняти. Не можна також вважати бездоганними і критерії, що використовуються в них. Так, P_c (навантаження зварювання) відноситься до області навантажень, при яких міцність приповерхневого шару металу на десятковий порядок нижче вихідної, і, отже, цей показник не має відношення до мастил і мастил, а I_3 (індекс задира) взагалі не має фізичного сенсу. Тільки P_k (критична навантаження)

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

характеризує міцність мастильної плівки, оскільки поділяє області помірного та підвищеного зносу. Тим не менш, такі випробування дозволяють порівняти мастильні властивості випробуваних та еталонних матеріалів у стандартних умовах випробування та оцінити вплив на них складу, а також деякою мірою прогнозувати поведінку мастильного матеріалу в умовах експлуатації.

Основний недолік досліджень на машині тертя ЧШМ (ГОСТ 9490-75) полягає в тому, що така схема надає можливість відчувати лише тертя ковзання, як у реальному вузлі тертя, у тому числі підшипник кочення, переважно виникає тертя кочення у поєднанні із тертям ковзання між сепаратором і тілами кочення.

Завданням пропонованого пристрою (див. рис. 2.14) є підвищення точності оцінки ефективності мастильного матеріалу в підшипниках кочення за рахунок наближення умов випробувань до експлуатаційних.

Для вирішення задачі запропоновано пристрій для випробування мастильних матеріалів підшипників кочення. Конструкція пристрою включає стандартну чашу машини тертя, в якій поміщений зразок - підшипник, утримуваний кільцем - оправкою. Нормальне навантаження на зразок - підшипник передається через натискну оправку, суміщену з цангою шпинделя за допомогою перехідної кулі з отвором і гвинтом з гайкою.

Конструкція оснастки включає стандартну чашу, в якій поміщений випробувальний зразок - підшипник, що утримується кільцем-оправкою. Натискна оправка поєднана з цангою за допомогою кулі з отвором та гвинтом із гайкою.

Як зразок для випробувань можна використовувати підшипники кулькові 8102 (51102), голчасті АХК 1528 і роликові 9102 (81102) через відповідність своїх габаритних характеристик під стандартну випробувальну чашу ЧШМ-3,2 і динамічної вантажопідйомності.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рис. 2.10 Фотографії зразків – підшипників для випробувань мастильних матеріалів

Збір даних у ході випробування виконується за наступним алгоритмом: на машині тертя виставляється необхідне нормальне навантаження, яке прикладено до зразка – підшипника з випробуваним мастильним матеріалом; важіль чаші 3 (рис. 2.16) з'єднується тягою 2 з тензометричним вимірювачем зусилля 1; інтерфейсні кабелі термодатчика 5 і тензометричного вимірювача 1 з'єднуються з блоком збору інформації (АЦП) 6, далі приводиться в дію механізм навантаження і включається електропривод обертання верхньої натискної оправки.

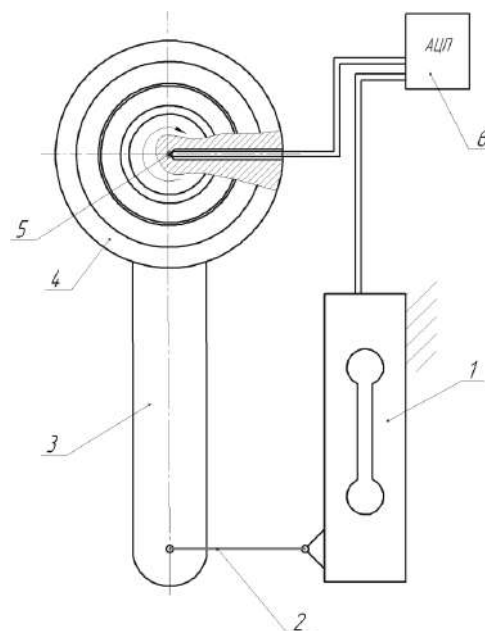


Рис. 2. 11 Компонувальна схема випробувального вузла (вид зверху)

1- тензометричний вимірник зусилля; 2 – тяга; 3 – важіль чаші; 4 – стандартна чаша машини тертя; 5 – термодатчик; 6 - блок збору інформації (аналогово-цифровий перетворювач (АЦП)).

З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ ДОБАВОК НА ОСНОВІ ГІДРОСИСЛІКАТІВ МАГНІЮ

3.1 Оцінка триботехнічних властивостей консистентних мастил, модифікованих дисперсними добавками гідросилікатів магнію.

3.1.1 Вплив концентрації та розміру дисперсних частинок на триботехнічні характеристики

Відомо безліч робіт, присвячених дослідженню впливу дисперсних частинок на триботехнічні характеристики РМ. Залежно від природи дисперсного наповнювача та його розміру частинок автори вказують на оптимальну концентрацію добавок у діапазоні від 1-30% за масою.

До триботехнічних характеристик мастильних матеріалів, згідно з ГОСТ 30858-2003 «Забезпечення зносостійкості виробів. Триботехнічні вимоги та показники» відносять:

- сумісність мастильних матеріалів - здатність двох або декількох мастильних матеріалів змішуватися між собою без погіршення їх експлуатаційних властивостей та стабільності при зберіганні;
- консистенцію мастильного матеріалу - здатність пластичних мастильних матеріалів чинити опір деформації при зовнішньому впливі;
- в'язкість, що визначає можливість рідкої, напіврідкої та напівтвердої речовин чинити опір при терті;
- здатність мастильного матеріалу знижувати знос і силу тертя незалежно від його в'язкості.

Найбільш важливим із перерахованих характеристик є здатність ММ знижувати знос (протизносні властивості). Одним з основних факторів, що впливають на протизносні властивості КММ, є дисперсність та концентрація гідросилікатів. Для обґрунтування вибору оптимального

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

розміру та концентрації дисперсного наповнювача на основі гідросилікату магнію у складі КММ у даній роботі були виконані випробування протизносних властивостей та протизадирних властивостей, несучої та граничної здатності навантаження.

Визначення протизносних і протизадирних властивостей, несучої та граничної здатності навантаження КММ здійснювалося на машині тертя ЧШМ-3,2 (за методикою, наведеною в розділі 2.3.5 даної роботи).

Розміри та концентрації частинок модифікаторів тертя на основі гідросилікатів магнію в досліджуваних КММ були обрані в наступному діапазоні значень:

- 1) ряд розмірів частинок: 0.1-0.2 мкм, 1мкм, 10мкм, 30мкм;
- 2) ряд концентрацій частинок: 0.5%, 1%, 5%, 10% мас.

За результатами триботехнічних випробувань на машині тертя ЧШМ-3,2 зразків ММ, модифікованих гідросилікат магнію різної концентрації та дисперсності, отримані залежності розміру плями зносу (рис. 3.1) від концентрації дисперсного гідросилікату магнію (рис.3.2).

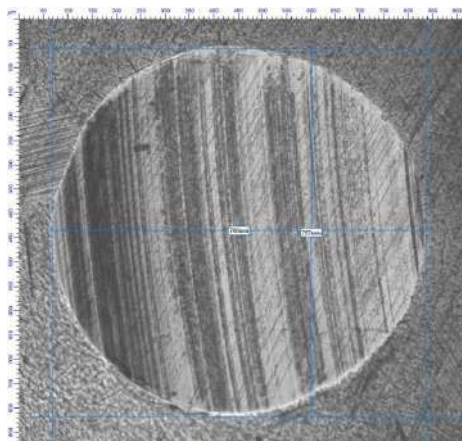


Рис. 3.1 Фотографія плями зношування зразка «куля»

Для підвищення достовірності отриманих результатів експерименту

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

кожної точки концентрації випробування проводилося щонайменше три рази. На основі отриманих залежностей зносу від концентрації проводився розрахунок коефіцієнта варіації та довірчого інтервалу отриманих значень за формулами, поданими нижче [78].

Середньоквадратичне відхилення:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (3.1)$$

де X – окремі значення, \bar{X} – середнє арифметичне за вибіркою, n – число вибірок.

Коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \quad (3.2)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta = s \cdot t \quad (3.3)$$

Таблиця 3.1 Імовірнісні показники експерименту по визначенню зносостійкості.

Параметр	0.1-0.2мкм	1мкм	10мкм	30мкм
<i>S, мкм</i>	35	79.8	22.9	34.3
<i>V, %</i>	4.4	37	8.9	8.7
<i>Δ, мкм</i>	74.6	170	48.8	73

Розміри та концентрації частинок гідросилікату істотно впливають на протизносні властивості КММ. Частинки розміром 1 і 10 мкм починають виявляти свої протизносні властивості вже при малих концентраціях у КММ, досягаючи оптимуму при концентрації $\approx 5\%$ за масою.

Частинки розміром 30 мкм мають характер залежності зносостійкості від концентрації дисперсних частинок подібно до частинок розміром 10 мкм, однак оптимальна концентрація у складі КММ досягається в районі 7% мас. Розмір зносостійкості при даному розмірі частинок нижче, ніж при 1 і 10 мкм.

Частинки ультродисперсного наповнювача (0.1-0.2 мкм) мають негативну динаміку за протизносними властивостями. Зі збільшенням концентрації збільшується зношування, досягаючи свого максимального значення при концентрації $\approx 4\%$ мас, з наступним незначним зменшенням.

Гідросилікат магнію дисперсністю 10мкм у широкому діапазоні концентрацій проявляється стабільність властивостей, а при дисперсності 1мкм протизносна ефективність визначається вузьким діапазоном концентрації, отже навіть невелике відхилення від процентного вмісту призводить до погіршення триботехнічних характеристик.

З таблиці 3.1 видно, що найбільший коефіцієнт варіації спостерігається в експериментальних даних для КММ, що містить дисперсні частинки магнію гідросилікату розміром 1 мкм. Як відомо, значення коефіцієнта варіації більше 33% характеризує неоднорідний процес [78]. Ймовірно, це пов'язано з тим, що відсотковий вміст дисперсного модифікатора в зоні тертя може змінюватися під час роботи трибовузла, що може бути причиною великого коефіцієнта варіації.

Наведені на рис. 3.2 залежності розміру плями зношування (d_{uz}) можна описати системою з двох рівнянь, виду:

$$d_{uz} = \begin{cases} k_1 \cdot C^{n_1}, & \text{при } C \geq C_{кр}; \\ k_2 \cdot C^{-n_2}, & \text{при } C \leq C_{кр}. \end{cases} \quad (3.4)$$

де k_1 , n_1 , k_2 , n_2 – коефіцієнти, що враховують кривизну залежності розміру дисперсних частинок від концентрації до критичного значення концентрації ($C_{кр}$) та після, відповідно.

Таким чином, отримані результати підтверджують гіпотезу [79], в якій припускають, що дрібні частинки геомодифікатора з оптимальним розміром 5-10 мкм в трибопар подрібнюються до 2 мкм, що відповідає оптимальній шорсткості поверхні і максимальної зносостійкості сполучення. Зі зменшенням розміру частинок наповнювача збільшується питома поверхня і

відповідно зростає роль поверхневих явищ. У зв'язку з цим частинки меншого розміру утворюються конгломерати великих розмірів і ушкоджують поєднані поверхні пари тертя.

Однією з найпоширеніших причин передчасного зносу є задираки. У підшипниках задираки можуть виникати на поверхнях бортів і торцях роликів, на доріжках кочення або посадкових поверхнях. Сильний задир може спричинити значні пошкодження та обернутися передчасною заміною підшипника.

Показником, що характеризує здатність мастила знижувати ймовірність утворення задир на металі в результаті робочого тертя, є індекс задира. Індекс задира обчислюється на чотирикульковій машині тертя в результаті оцінки ступеня зношування кульок від моменту початкового навантаження до навантаження зварювання, що характеризує верхню межу роботи мастила. Усі показники нормуються ДСТУ 9490-75.

Індекс задира (I_z), Н (кгс) розраховують за сумою умовних навантажень, згідно з формулою:

$$I_z = \frac{\sum Q_i}{n} \quad (3.5)$$

де $\sum Q_i$ - сума умовних навантажень по ряду 1 від початкового навантаження до найближчого навантаження, що передує навантаженню зварювання; n - число визначень ряду 1.

Умовне навантаження (Q_i), Н (кгс) для кожного осьового навантаження по ряду 1 обчислюють за формулою:

$$Q_i = P_i \cdot \frac{d_{Гi}}{d_{Иi}} \quad (3.6)$$

де P_i -осьове навантаження, Н (кгс), по ряду 1; $d_{Гi}$ – діаметр зони пружної деформації кульок за Герцем, мм, при навантаженні P_i , Н (кгс); $d_{Иi}$ – середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм, при навантаженні P_i , Н (кгс).

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Результати розрахунку індексу задира для гідросилікату магнію з різними концентраціями та розмірами дисперсних частинок у КММ представлені на рис. 3.3.

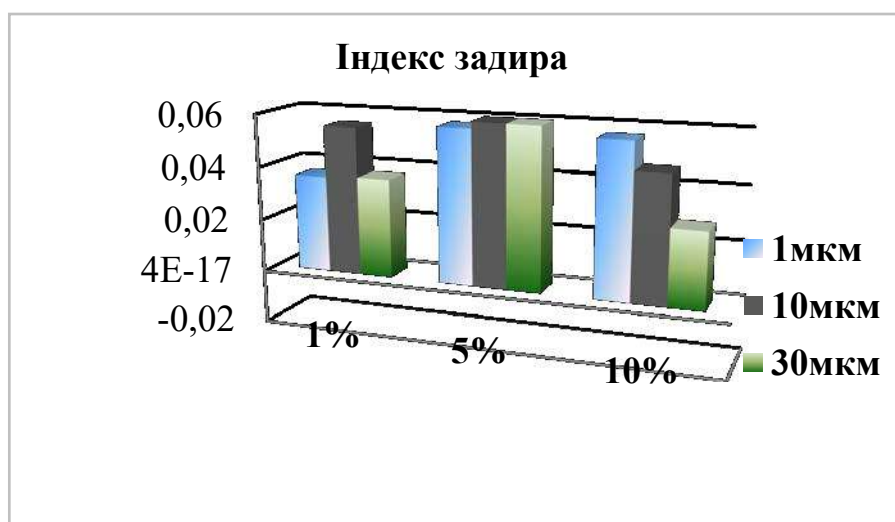


Рис.3.3 Індекс задира для КММ з гідросилікатом магнію різною дисперсності

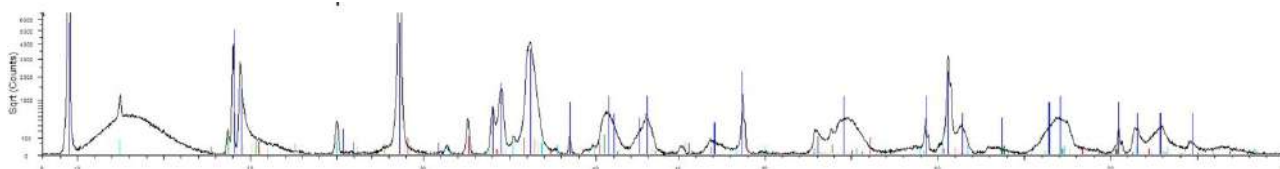
Навантаження зварювання, що характеризує граничну працездатність ММ, визначається як найменше навантаження, при якому відбулося автоматичне зупинення машини тертя при досягненні граничного моменту тертя (1180 ± 25) Н·ММ [$(120,0 \pm 2,5)$ кгс·ММ] або зварювання кульок. Для мастильних матеріалів, у яких зварювання немає і момент тертя нижче граничного, за навантаження зварювання приймають навантаження, коли він утворюється пляма зносу середнім діаметром 3 мм і более.[61]

Результати оцінки навантаження зварювання для КММ, що містять гідросилікати різної концентрації та дисперсності частинок, представлені на рис.3.4.

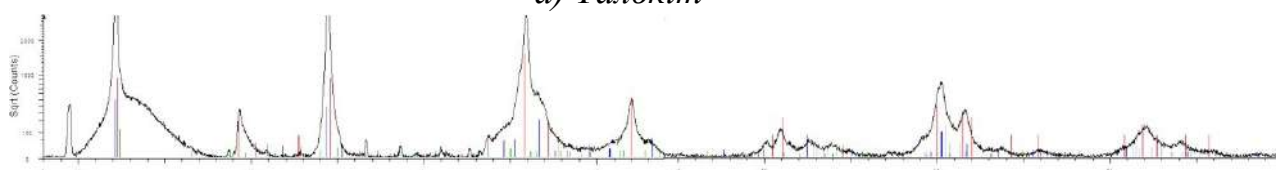
На підставі літературного огляду та отриманих результатів для подальших досліджень вибираємо гідросилікати магнію дисперсністю 10 мкм та концентрації у складі КММ (Літол-24) 5% за масою.

3.1.2 Вплив складу модифікатора на протизносні властивості КММ

Для оцінки хімічного складу обраного класу модифікатора тертя було проведено фазовий аналіз магнею гідросилікатів. На рис. 3.5 наведено результат рентгенографічних досліджень фазового складу вихідних дисперсних мінералів.



a) Талькіт



a) Серпентиніт

Рис. 3.5 Рентгенограми порошків гідросилікатів магнею

На основі аналізу рентгенограм на рис.3.5 складено об'єднану рентгенограму фазового складу з виділеними рефlekсами піків, властивим двом спорідненим гідросилікатам (див. рис. 3.6).

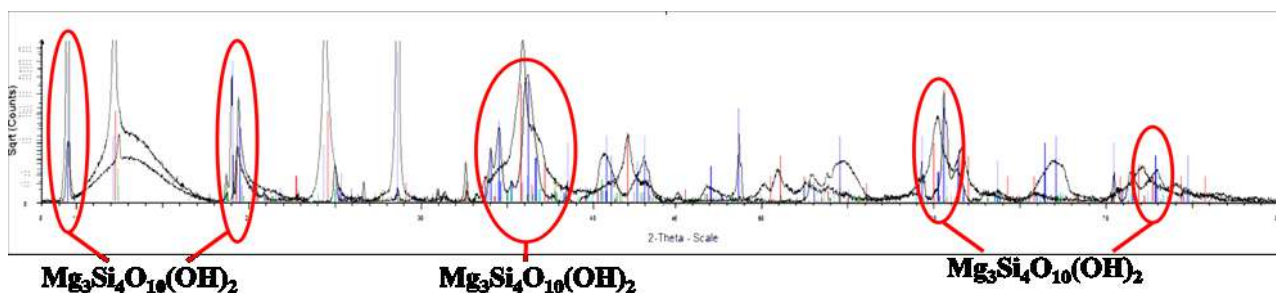


Рис. 3.6 Об'єднана рентгенограма фазового складу серпентиніту та талькиту

Так встановлено, що вибраний серпентиніт містить у собі лізард, тальк, оксид кальцію та тетрагідроксоалюмінат кальцію. До складу талькиту входять: тальк, гідроксид алюмінію, клинохлор та андродит гідрований. У таблиці 3.2 представлені результати відсоткового вмісту фаз у досліджуваних гідросилікатах магнею.

Таблиця 3.2 Зміст фазових складових у досліджуваних зразках гіросилікатів

Фазові складові	%
Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂	11,1
(Mg,Al) ₃ (Si,Al) ₂ O ₅ (OH) ₄	62,6
(Mg,Fe) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	19,5
CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	4,9
CaO	1,6

Фазові складові	%
Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂	95,6
Mg ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	1,2
Al(OH) ₃	1,7
Ca(Fe _{0,87} Al _{0,13}) ₂ (SiO ₄) _{1,65} (OH) _{5,4}	1,5

Серпентиніт

Талькіт

Фазовий склад гіросилікатів визначає їх морфологічні особливості. Як видно з мікрофотографій дисперсних частинок (див. рис. 3.7), талькіт має листові та лускаті безбарвні з характерною прозорістю агрегати; Дисперсні частинки серпентиніту мають характерний скляний блиск, пластинчасту форму з рівними надломами.

Серпентинит



Талькіт



Рис. 3.7 Мікрофотографії морфологічних особливостей дисперсних частинок магнею гіросилікатів (x400).

Для оцінки протизносних властивостей, залежно від хімічного складу, були виконані випробування на ЧШМ – 3,2 з розміром дисперсних частинок 10 мкм. На рис. 3.8 представлені порівняльні результати протизносних властивостей двох характерних споріднених представників класу гіросилікатів магнею: талькіти та серпентиніти.

Зі зростанням концентрації добавки гідросилікату спостерігається різке зниження розміру плями зносу 1-6% мас. Це свідчить про покращення протизносних властивостей КММ. Подальше збільшення концентрації добавки з 6 до 10% не істотно впливає на величину розміру плями зносу. Що добре узгоджується з результатами досліджень інших авторів [73,76].

Результати розрахунку індексу задира для різних гідросилікатів магнію концентрацією 5% мас. у КММ представлені на рис. 3.9.

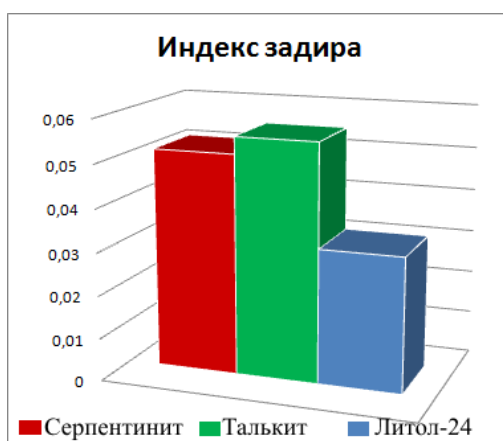


Рис. 3.9 Індекс задира КММ із добавками

Спостерігається позитивний вплив добавки на основі магнію гідросилікатів. Обидва наповнювачі збільшують індекс задира та підвищують протизносні властивості КММ порівняно з базовим мастильним матеріалом Літол-24 майже в 2 рази.

3.1.3 Суміші для оцінки впливу складу гідросилікатів на протизносні властивості Літол-24

Мономінерали як модифікатори використовуються в чистому вигляді вкрай рідко, внаслідок високої ціни на очищення вихідних порід. Для оцінки впливу різних складових гідросилікатів були створені різні суміші споріднених гідросилікатів (серпентиніти та талькіти).

Результати випробувань протизносних властивостей КММ з добавкою

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

5% масою суміші частинок талькиту і серпентиніту в різних пропорціях показані на рис. 3.10.

З побудованого графіка видно, що при збільшенні концентрації талькиту в суміші до $\approx 45\%$ масою відбувається зростання плями зносу кульок і при цьому співвідношенні концентрацій (45/55) досягає максимального значення. У результаті максимальне зношування при використанні КММ із сумішшю перевищує знос при використанні КММ тільки з серпентинітом на $\approx 20\%$. При збільшенні концентрації талькиту $\approx 45\%$ зношування починає знижуватися. Виявлено, що у разі співвідношення талькиту та серпентиніту в суміші (58/42)% діаметр плями зносу аналогічний КММ зі 100% серпентиніту. З подальшим збільшенням концентрації талькиту в суміші відбувається різке зниження зносу до концентрації талькиту в суміші $\approx 70\%$, після чого знос знижується, але меншою мірою і досягає свого мінімального значення при використанні 100% талькиту в суміші.

При різних пропорційних співвідношеннях гідросилікатів магнію у суміші спостерігається позитивна протизносна дія у складі КММ. Однак найбільш ефективним є використання гідросилікатів магнію класу талькітів. Можна припустити, що ця поведінка сумішей гідросилікатів обумовлена різним комплексним механізмом протизносної дії і при приблизно рівному співвідношенні спостерігається максимальна конкуренція цих двох механізмів дії, що призводить до зменшення зносостійких властивостей. [82, 83]

3.1.4 Дослідження ефективності консистентного мастильного матеріалу підшипнику кочення

Для випробувань на несучу здатність та протизадирні властивості пластичного мастильного матеріалу використовується машини тертя ЧШМ-3,2. Чотирьохкулькова машина тертя (ГОСТ 9490-75)

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

випробувань тільки тертя ковзання, коли в реальному вузлі тертя, наприклад, у підшипнику кочення, переважно виникає тертя кочення в поєднанні з тертям ковзання між сепаратором та тілами кочення. У рамках цієї роботи було розроблено оснащення для проведення випробувань, що відповідають реальному виду тертя в підшипниках кочення (див. п. 2.3.5). Тривалість кожного випробування становила 60 хвилин, навантаження - 1002кгс.

Також до та після випробування проводилися вимірювання профілів шорсткості поверхонь роликів підшипників за допомогою профілометра Mahr MARSURF PS1 (див. 2.3.4). Типові приклади профілю поверхні до та після випробування КММ з дисперсними частинками представлені на рис.3.11, а зведені параметри результатів аналізу таких філограм представлені на рис.3.13.

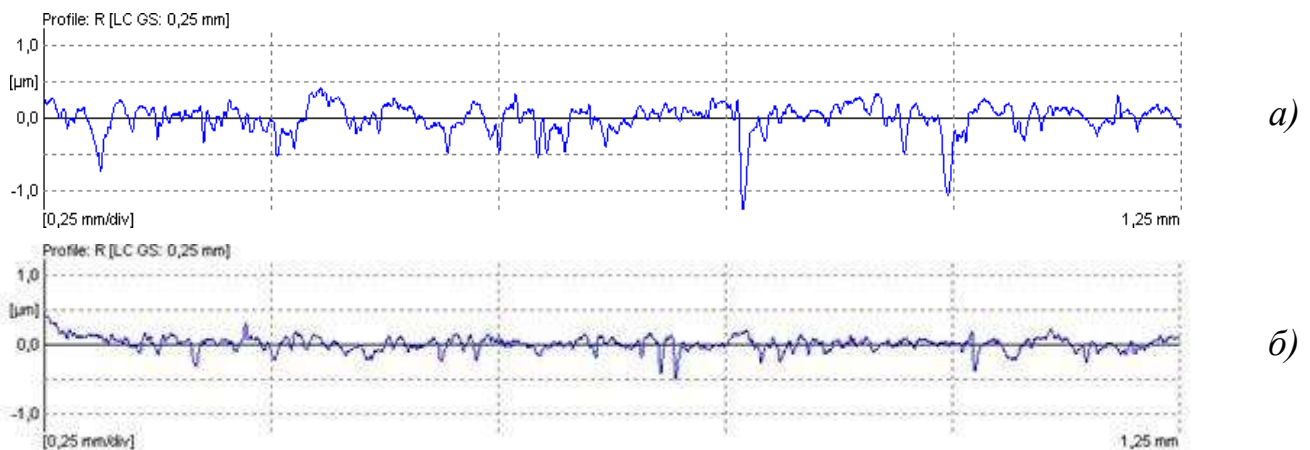


Рис. 3.11 Характерні філограми до (а) та після (б) випробування КММ з дисперсними частинками гідросилікату магнію

Важливою характеристикою поверхні є графік змінання профілю (крива Аббота) рис.3.12. Вона утворюється шляхом реєстрації складових елементів профілю за ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [71] залежно від обробки різанням та модифікації профілю поверхні в результаті контактної взаємодії поверхонь, що труться.

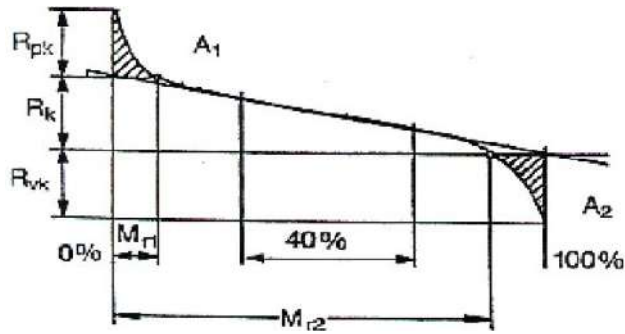


Рис.3.12 Графік змінання профілю (крива Аббота)

де R_a – середнє арифметичне відхилення; R_t - загальна висота профілю; R_z - максимальна висота профілю; R_p - максимальна довжина профілю; R_v – максимальна глибина западини; M_{r1} та M_{r2} (в %) визначають точки перетину кривої Аббота з верхньою та нижньою межами серцевини шорсткості профілю.

Для оцінки маслозатримуючих властивостей поверхні використовується параметр об'єму канавок V_o . Оцінка цього параметра проводиться за формулою [84]:

$$V_o = \frac{R_v \cdot (100 - M_{r2})}{200} \quad (3.7)$$

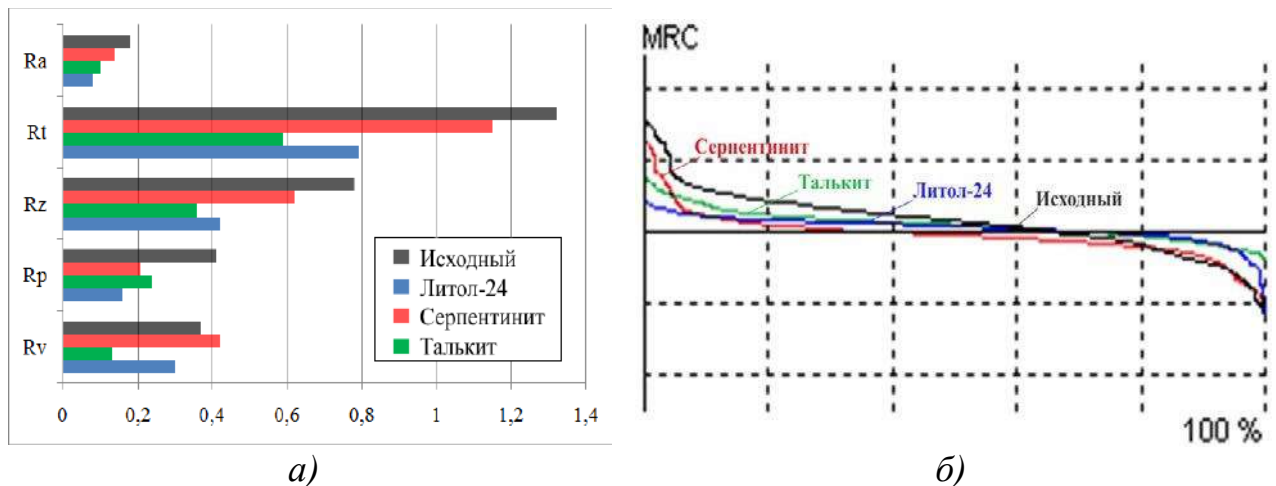


Рис.3.13 Параметри профілю поверхні (а) та графік змінання профілю (крива Аббота) (б)

На основі аналізу профілю поверхні видно, що у КММ з дисперсними добавками талькиту зменшилися показники западин та вершин, що може

бути причиною заповнення мікронерівностей частинками талькиту. Зростання температури поверхонь, що труться, викликає підвищення хімічної активності металів. Відбувається більш інтенсивне їх окислення та утворення плівок оксидів, що уповільнюють розвиток процесу схоплювання [80] та спостерігається зниження моменту тертя.

З проведеного дослідження видно, що при додаванні гідросилікатів магнію в КММ момент тертя зменшується з підвищенням мастильного матеріалу в процесі тертя. Аналогічний результат був отриманий у роботі [81], коли проводилися дослідження з кульковими підшипниками на машині тертя, де поєднувалися кочення та ковзання і таким чином відтворювалися умови роботи зубчастих передач.

На зведених діаграмах видно, що КММ, що містить дисперсні добавки магнію гідросилікатів магнію концентрацією 5% по мас. та дисперсністю 10мкм, показує найменший момент тертя (рис. 3.14) з незначним збільшенням температур щодо базового ММ Літол-24 (рис. 3.15).

Енергетичні втрати в підшипниках складаються в основному з втрат на тертя, що виникають внаслідок прослизання в місцях контакту тіл кочення з кільцями та сепаратором та механічних втрат у мастильному матеріалі. Переходячи в теплоту, ці втрати спричиняють підвищення температури підшипникових вузлів. Вони не є постійними в часі та визначаються конструкцією підшипника, режимами його роботи та мастила. Потужність, що витрачається на подолання тертя у підшипнику визначається за формулою:

$$P_{тр} = 0,10477 \cdot T_{тр} \cdot n \quad (3.8)$$

де $T_{тр}$ -момент тертя; n – частота обертання.

При підстановці даних з експерименту отримаємо значення потужності для підшипників, що працюють з різними випробуваними КММ, результати представлені в таблиці 3.3.

У рамках цієї роботи особливий інтерес представляє складова моменту

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

тертя, обумовлена втратами в мастильному матеріалі:

$$T_{см} = 0,979 \cdot 10^{-10} \cdot f_{см} \cdot (v \cdot n)^{2/3} \cdot D_{р\omega}^3 \quad (3.9)$$

де $\square\square$ - кінематична в'язкість мастильного матеріалу; $D_{р\omega}$ - діаметр кола, що проходить по центрах тіл кочення; $f_{см}$ - коефіцієнт, що залежить від типу підшипника та способу змащування (для роликового підшипника $f_{см} = 3$).

Таким чином, при використанні КММ з серпентинітом потужність, що витрачається на подолання тертя в підшипнику кочення порівняно з базовим КММ менше на 40%, а КММ з талькітом на 60%.

Здійснивши розрахунок моменту тертя підшипника кочення для кожного КММ, отримаємо, що КММ, що містить дисперсні добавки серпентиніту і талькиту знижують момент тертя на 11% і 17% щодо базового мастильного матеріалу відповідно.

Так само слід зазначити, що момент стругування (відповідний максимальному зусилля опору руху поверхонь, що труться, обумовленому сукупністю сил необхідних на руйнування структурних каркасів КММ, силі тертя поверхонь без мастильної плівки, припрацювання нерівностей поверхонь і т.д.) у КММ, модифікованих дисперсними добавками, значно менше, ніж у базового мастильного матеріалу. Це явище можливо пояснити зміною структури РМ. Для обґрунтування цього припущення, необхідно дослідити структурні зміни у РМ при введенні дисперсних добавок та виявити характерні особливості взаємозв'язку реологічних та експлуатаційних властивостей.

3.2 Структура консистентного мастильного матеріалу

На підставі аналізу фотографій структурних каркасів (рис.3.16), отриманих з оптичного мікроскопа, можна відзначити, що базовий КММ має найбільші осередки структурного каркаса з тонкими межами загусника. При додаванні дисперсного наповнювача спостерігається зменшення

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

розмірів осередків, і збільшення меж їх розділу, що становлять дрібнокомірчасту структуру загусника і базового масла. Однак, залежно від типу дисперсного наповнювача (гідросилікату магнію) дрібнокомірчаста структура має відмінність, що полягає в розмірі та кількості осередків. Це спостереження відповідає концентрації дисперсних частинок у кількості 5% мас.

З подальшим збільшенням концентрації дисперсного наповнювача спостерігається тенденція до зменшення розмірів структурних каркасів незалежно від типу наповнювача та при концентрації ~20% мас. ознак відмінності структурних каркасів не виявляється. При даній концентрації превалює дрібної щільна структура, що складається з малих обсягів базового масла, оконтурованих широкими прошарками загусника.

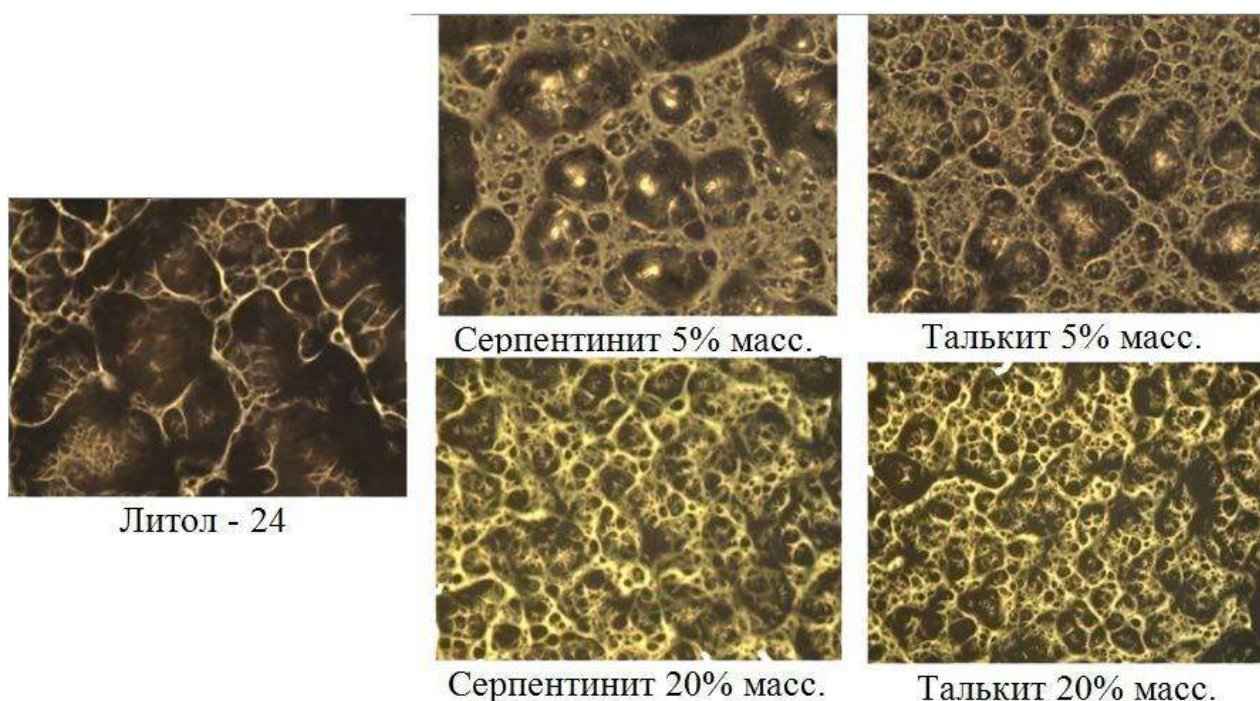


Рис. 3.14 Зміна структури консистентного мастильного матеріалу залежно від концентрації дисперсних частинок

На підставі фотографій структурних каркасів, отриманих з оптичного мікроскопа, виконано аналіз зображень за допомогою програмного аналізатора Thixomet, визначено розподіл структурних складових каркасу КММ визначено середні розміри осередків каркасів. При підвищенні

концентрації дисперсних частинок понад відомий поріг (у нашому випадку близько 20% мас і вище) дисперсний наповнювач виступатиме як загусник, тим самим погіршуючи триботехнічні характеристики КММ.

При введенні дисперсних добавок у КММ відбувається перерозподіл структурних зв'язків та зміна структурних каркасів. У деяких випадках це може призвести до розриву зв'язків та дроблення первинних структурних елементів. Корозійна стійкість

Застосування дисперсних добавок на основі гідросилікатів магнію впливає на зміну структури КММ, а також на хімічну активність, з якою компоненти КММ взаємодіятимуть з поверхнями пар тертя. Одна з найважливіших особливостей хімічної дії ММ – антикорозійна дія.

Відповідно до описаного методу проводилася оцінка корозійної дії Літол-24 і з 5% мас. добавками на основі гідросилікатів магнію. Результати наданих класів корозійної стійкості КММ представлені на рис.3.23

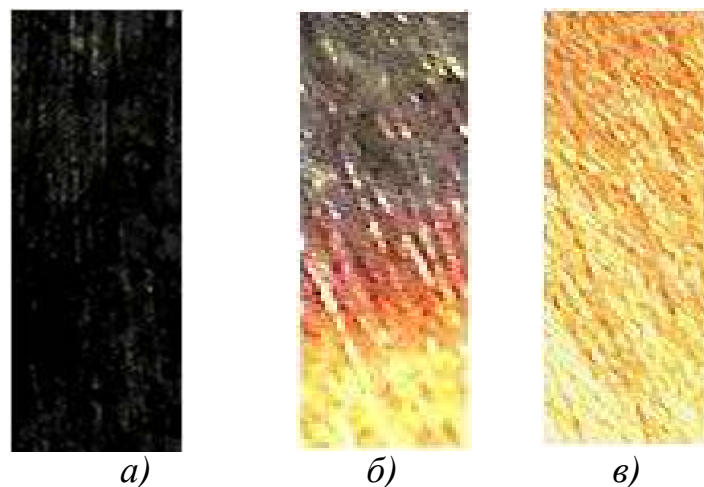


Рис.3.15 Корозійна дія КММ на мідних платинах а) Літол-24 - 4b; б) Літол-24 + серпентиніт 5% мас. - 2с; в) Літол-24 + талькіт 5% мас. - 1а

У базовому стані Літол-24 має низькі антикорозійні властивості, введення в нього дисперсних частинок гідросилікатів магнію підвищує ці властивості КММ. Ймовірно, це пов'язано із утворенням захисних плівок, які ведуть до зміни поверхневої енергії з утворенням гідрофобного шару.

Доказом цього припущення можна надати результати вимірювання крайового кута змочування поверхонь зразків до та після випробувань на корозійну стійкість

У вихідному стані поверхня мідного зразка гідрофільна (кут змочування менше 90о), а поверхні, що зазнали теплового впливу в мастилі стають гідрофобними (кут змочування більше 90о).

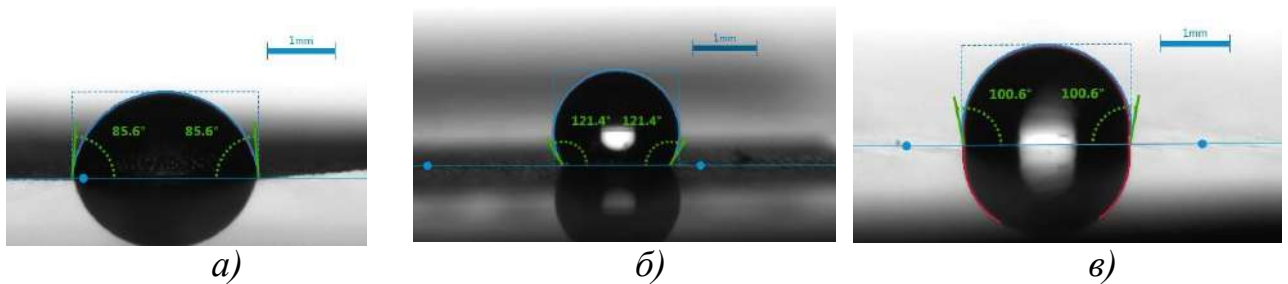
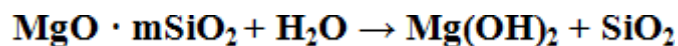


Рис. 3.16 Крайовий кут змочування поверхні зразка до та після випробувань на корозійну стійкість

- а) вихідна мідна поверхня; б) після випробування КММ + талькіт 5% мас.;
в) після випробування КММ + серпентиніт 5% мас.

З проведених результатів вимірювання крайового кута змочування видно, що чим вище гідрофобність плівок, що утворюються частинками



дисперсних добавок КММ, тим стійкіша поверхня до корозійної дії зовнішнього середовища. Однією з причин виникнення захисної плівки може бути вміст силікату магнію, який є плівкоутворюючим інгібітором за рахунок утворення феросилікатної плівки на поверхні металу, що уповільнює корозійну дію. Інгібування корозії металу викликано протіканням реакції гідролізу силікату магнію з утворенням луку та аморфного осаду кремнезему з адсорбованою на ньому водою:

Таке утворення плівки може супроводжуватися хімічними реакціями, у результаті утворюється об'ємна полімерна сітка з високими фізико-механічними та захисними властивостями.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ПЛІВОК З ГІДРОСИЛКАТАМИ МАГНІЮ

4.1 Формування тонких плівок на поверхнях трибоспорядження

В результаті оптичних досліджень після випробувань на тертя за ГОСТ 9490-75 було виявлено два різновиди тонких плівок (рис.4.1). У разі використання КММ з дисперсними частинками серпентиніту відбувається формування тонких плівок, що ґрунтуються на схильності компонентів серпентиніту до утворення склоподібних тіл, розміри яких досягають до 50мкм, що спекаються за рахунок високих температур у зоні контакту (рис.4.1а). Слідів схоплювання другого роду фрикційному контакті спостерігається мало.

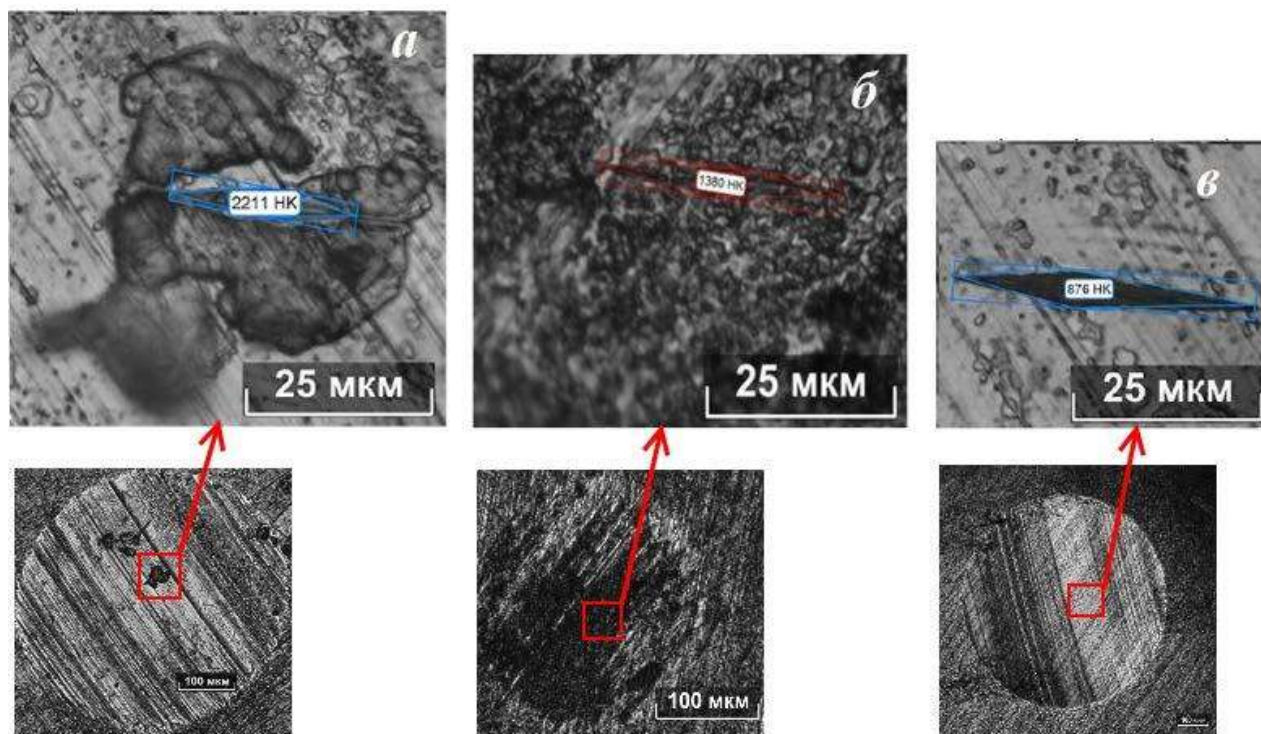


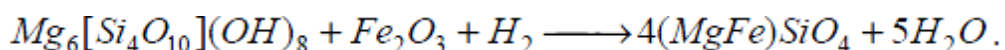
Рис.4.1 Мікрофотографії відбитків індентора: а - локальна область із плівкою, утвореною серпентинітом; б - локальна область із плівкою, утвореною талькітом; в - область поверхні тертя без плівки (x1000)

У разі використання КММ з дисперсними частинками талькиту механізм утворення захисних плівок ґрунтується на адгезійних виривах, заповнених пластичним талькітом. Місцями по областях тертя можуть

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

формуватися склоподібні тіла із середнім розміром до 10мкм.

Авторами наведено можливий механізм утворення захисної плівки на поверхні тертя, який полягає в тому, що при механічному та тепловому впливі серпентин (мінерал, що входить до складу серпентиніту) розкладається і, в процесі тертя, виділяється кількість теплоти, достатня для розігріву та розм'якшення металу. Цей процес призводить до виникнення наступної реакції:



При цьому відбувається впровадження в структуру металу мікрочастинок мінералу та утворення композитної серпентинометалічної структури (метал – мінерал) на поверхні вузлів тертя.

На ділянках, що спостерігаються (рис.4.1) було виконано дослідження твердості поверхонь тертя в локальних ділянках з утвореними плівкам (рис.4.1 а, б), а також без їх утворення для базового ММ Літол-24 (рис.4.1 в). Для вимірювання твердості використовувався автоматичний мікротвердомір FM-300.

В результаті проведених вимірювань встановлено, що твердість за Кнупом в локальній області з плівкою, утвореною серпентинітом може досягати 2211НК, плівки при талькіті - 1380 НК, а в області без плівки твердість становить 876НК, що практично ідентично твердості загартованого зразка. Таким чином, на поверхні тертя при фрикційній взаємодії утворюються та руйнуються захисні плівки, які реалізують дискретне екранування поверхонь, додатково розділяючи матеріали поряд з окисними плівками.

Оптичні дослідження після випробувань на тертя за розробленою схемою для кулькових підшипників кочення не виявили утворення тонких плівок (ймовірно через їх занадто малий розмір). Однак, на роликівих підшипниках з КММ модифікованим серпентинітом було зафіксовано виникнення подібних склоподібних тіл як при випробуваннях на тертя

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ковзання (див. рис.4.2).



Рис. 4.2. Склоподібне тіло, виявлене на поверхні тертя роликового підшипника

Ймовірно, виникнення тонких плівок ймовірніше для тертя ковзання, яке може виникати в роликових підшипниках більшою мірою, ніж у кулькових підшипниках. Тертя ковзання є «екстремальним» видом тертя, якому властиво вищі контактні тиски, зсувні зусилля, локальні температури, які, можливо, і створюють умови для виникнення подібних структур.

Було також проведено мікрорентгеноспектральний аналіз на мікроскопі SEM Mira3 Tescan з аналізатором EDS Oxford Instruments X-Max, який показав, у зоні формування склоподібних тіл наявність у поверхневому шарі великого вмісту SiO₂ на поверхні металу після роботи КММ з гідросилікатом магнію. Результати представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати МРСА поверхневих шарів зразка після випробувань КММ із гідросилікатом магнію.

O	Mg	Si	S	Ca	Fe
78,5 %	0,4 %	4,1 %	1,0 %	1,1 %	14,9 %

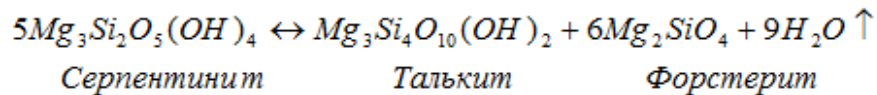
Формуванню захисних плівок на основі гідросилікатів магнію сприяють процеси, зумовлені їх фізико-механічними характеристиками та хімічними властивостями. На рис.4.3 наведено схематичні моделі механізмів утворення склоподібних тіл (локальних плівок) за відповідних термомеханічних умов. У дужках на рисунках наведені ймовірні склади локальних склоподібних плівок без урахування впливу металеві підкладки,

на яких вони формуються.

Теплова дія в результаті тертя призводить до фазових перетворень гідросилікатів. Так при температурах до 490оС існують усі фазові складові характерні для гідросилікатів магнію. За температур вище 490оС починається розпад фазових складових. Наприклад, серпентиніт зазнає змін, тоді як талькіт продовжує існувати аж до 780 оС. (Див. табл. 4.2)

Таблиця 4.2 Температури поліморфних перетворень серпентинітів [92]

<490°С	490-650°С	650-780°С	>780°С
тальк, серпентиніт, энстатит, брусит, форстерит	тальк, энстатит, брусит, форстерит	тальк, энстатит, форстерит	энстатит, форстерит



На рис. 4.4 представлені результати термічного впливу на вихідні порошки талькіту (а) та серпентиніту (б) до 1000оС, що призвела до характерної зміни кольору властивого энстатиту та форстериту відповідно.



а) Талькіт



б) Серпентиніт

Рис.4.4 Порошки гідросилікатів магнію після термічного впливу (до 1000оС)

З літературних джерел [58, 94] відомо, що локальна температура нагріву в зоні тертя може досягати дуже високих значень, що, у свою чергу, може призвести до локальної зміни структури дисперсного модифікатора. Для оцінки цих температур існує велика кількість математичних залежностей [93, 95, 96] за певних граничних умов.

На підставі припущення про подібність теорії стійкості дисперсних систем (ДЛФО) [101] взаємодії елементів структурного каркасу КММ, були проведені оцінні розрахунки потенційної енергії взаємодії структурних складових КММ залежно від їх розміру та концентрації дисперсних частинок. Розрахунки дали можливість побудувати графік взаємодії потенційних енергій (рис. 4.6), який має 3 характерні перегини:

Перший - характеризується наявністю великих структурних каркасів, що мають велику енергію тяжіння і відповідає практично повній відсутності дисперсних частинок і максимальної в'язкості КММ.

На другому ділянці, що відповідає середньому розміру структурних осередків відсутня схильність до агрегування окремих елементів системи через великий розкид розмірів цих елементів. Це відповідає максимальній рухливості системи, в'язкість мінімальна (відповідає процесу коалесценції структурних осередків).

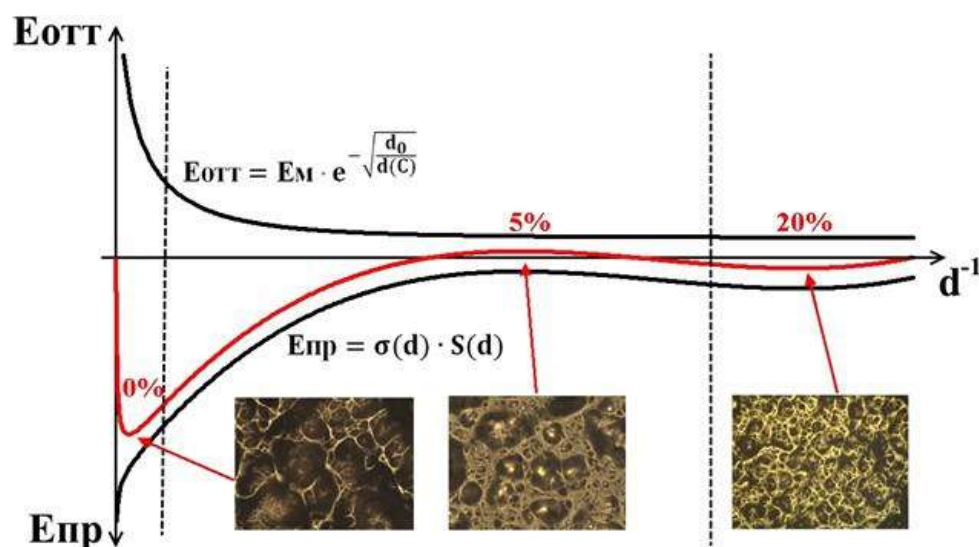


Рис. 4.5 Зміна потенційної енергії взаємодії структурних складових КММ залежно від їх розмірів

Третя ділянка відповідає подальшому збільшенню вмісту дисперсних частинок, де відбувається швидка флокуляція структурних елементів, зростає внесок енергії тяжіння між дисперсними частинками та збільшення в'язкості. Частинки не мають прямого контакту, їх розділяє прошарок

середовища (загусники, якими при великих концентраціях добавки можуть виступати не тільки мила та кислоти, а й самі дисперсні частинки магнію гідросилікатів).

4.2 Вплив температури на формування та руйнування захисних плівок, утворених гідросилікатами магнію

Температура є одним з найважливіших факторів, що впливає на процеси тертя при граничному мастилі, як самих поверхонь, що труться, так і при зміні властивостей дисперсних частинок гідросилікатів магнію в складі КММ. Зміна температури в зоні граничного тертя переважно визначається умовами режимів роботи (від легкого режиму роботи вузла тертя до важкого). Вплив таких режимів зміну коефіцієнта тертя описується узагальненої температурної залежністю, запропонованої І.В. Крагельським.

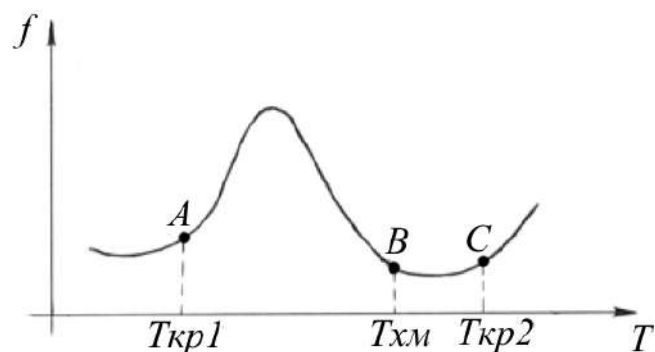


Рис. 4.6 Узагальнена залежність коефіцієнта тертя від температури при граничному мастилі

Ця узагальнена залежність визначається трьома перехідними температурами: $T_{кр1}$, $T_{кр2}$ і $T_{хм}$. Температура $T_{кр1}$ характеризує початок руйнування адсорбційного шару (десорбція) молекул РМ. десорбція викликає дезорієнтації молекул ММ на поверхні і падає несуча здатність, з'являється металевий контакт поверхонь, що труться. Це призводить до різкого збільшення коефіцієнта тертя та катастрофічного руйнування сполучених деталей. Якщо ММ містить хімічно активні компоненти або дисперсні добавки, то зайва теплова енергія, викликана збільшенням

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

температури в зоні тертя, сприяє вступу в реакцію з поверхнями цих активних компонентів ММ, особливо якщо в

У процесі тертя утворюються ювенільні поверхні. Таким чином, зі зростанням температури збільшується товщина захисного покриття між поверхнями, що труться, коефіцієнт тертя починає знижуватися до тих пір, поки не досягне температури $T_{хм}$.

$T_{хм}$ характеризує таку товщину захисного шару величина товщини шару, при якій подальше зростання захисної плівки енергетично не вигідне і залишається приблизно однаковим у досить широкому діапазоні температур. Досягши температури, що відповідає точці $T_{кр2}$, коли швидкість руйнування захисної плівки перевищує швидкість її утворення. Знову виникає металевий контакт поверхонь, що труться, і зростання коефіцієнта тертя з подальшим руйнуванням поверхонь і виходом з ладу вузла тертя.

Слід зазначити, що безрозмірне збільшення концентрації хімічно активних речовин або дисперсних добавок ММ не дають постійного ефекту зниження коефіцієнта тертя. Певна концентрація створює мінімально досяжний коефіцієнт тертя, а подальше збільшення концентрації викликає корозійно-механічне зношування.

На підставі узагальненої залежності коефіцієнта тертя від температури при граничному мастиллі опишемо процеси, що протікають у трибовузлі з КММ, модифікованим дисперсними добавками магнію гідросилікатів:

Механізм для КММ із талькитами:

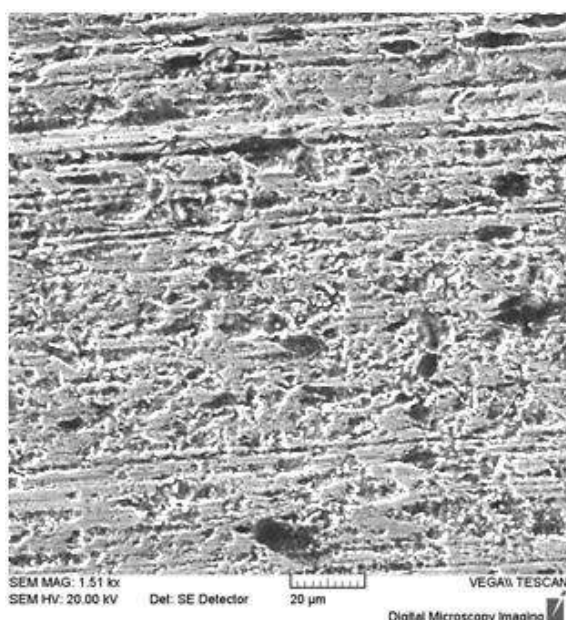
При досягненні $T_{кр1}$ відбувається механічна взаємодія сполучених деталей та дисперсною добавкою талькиту. Пластинчаста конфігурація частинок мінералу дозволяє орієнтуватися добавці паралельно в потоці КММ щодо поверхні тертя. Спостерігається підвищення коефіцієнта тертя у процесі опрацювання до досягнення $T_{хм}$.

залишається практично постійним у досить широкому інтервалі температур.

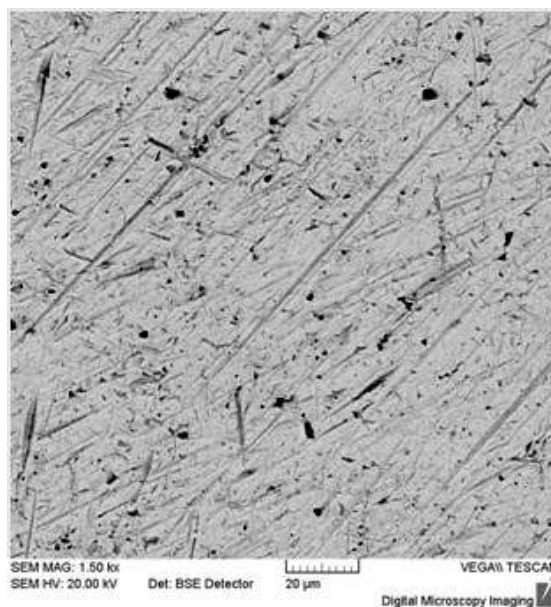
					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Відбувається зміцнення молекулярних зв'язків активних сполук, процес тертя протікає по базальних поверхнях талькиту, що встановилися. З підвищенням температури збільшується швидкість утворення модифікованого шару з талькиту. Одночасно збільшується швидкість руйнування цього шару внаслідок зношування та дисоціації.

$T_{кр2}$ -швидкість руйнування модифікованого шару (молекулярних зв'язків талькиту та металу) перевищує швидкість його утворення, має місце металевий контакт пар тертя, викликаючи різке підвищення коефіцієнта тертя, через відокремлення частинок талькиту від поверхні металу. Корозійно-механічне зношування змінюється інтенсивним адгезійним зносом, який є виривами на поверхні тертя.



а)



б)

Рис. 4.7 Поверхня сталі ШХ15 після тертя ковзання в КММ+5%мас. гідросилікату магнію

а) талькіт – адгезійні вириви; б) серпентиніт - абразивний знос

Механізм для КММ із серпентинітами:

До досягнення $T_{кр1}$ у парі тертя переважає механічну взаємодію дисперсних частинок серпентиніту з поверхнями металу. При молекулярному взаємодії моделі відбувається «перекочування» серпентиніту в зоні тертя, яке не утворює пов'язаний молекулярний

ланцюжок з поверхнями.

При зростанні температури $T_{\text{хм}}$ у зоні контакту серпентиніт розкладається на хімічно активні компоненти.

4.3 Практичне застосування гідросилікатів магнію у складі консистентних мастильних матеріалів.

Підтримка рухомого складу в належному стані, що відповідає вимогам експлуатації, є складним та відповідальним завданням. Однією з важливих проблем є обслуговування ходової частини транспорту, від якої залежить безпека руху. Зміна стану ходової частини тролейбуса викликається переважно впливом зовнішніх умов, таких як механічні, теплові навантаження та електрохімічні реакції. Регулярне обслуговування в процесі експлуатації та своєчасний ремонт висуває низку вимог до таких витратних матеріалів як КММ.

У таблиці подано основні несправності ступичних вузлів (рис.4.17). Умовою запобігання таким несправностям є своєчасне техобслуговування та ремонт маточок тролейбуса, що полягає в регулярному додаванні або заміні ММ у підшипниках, а також їх регулюванні та затягуванні.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

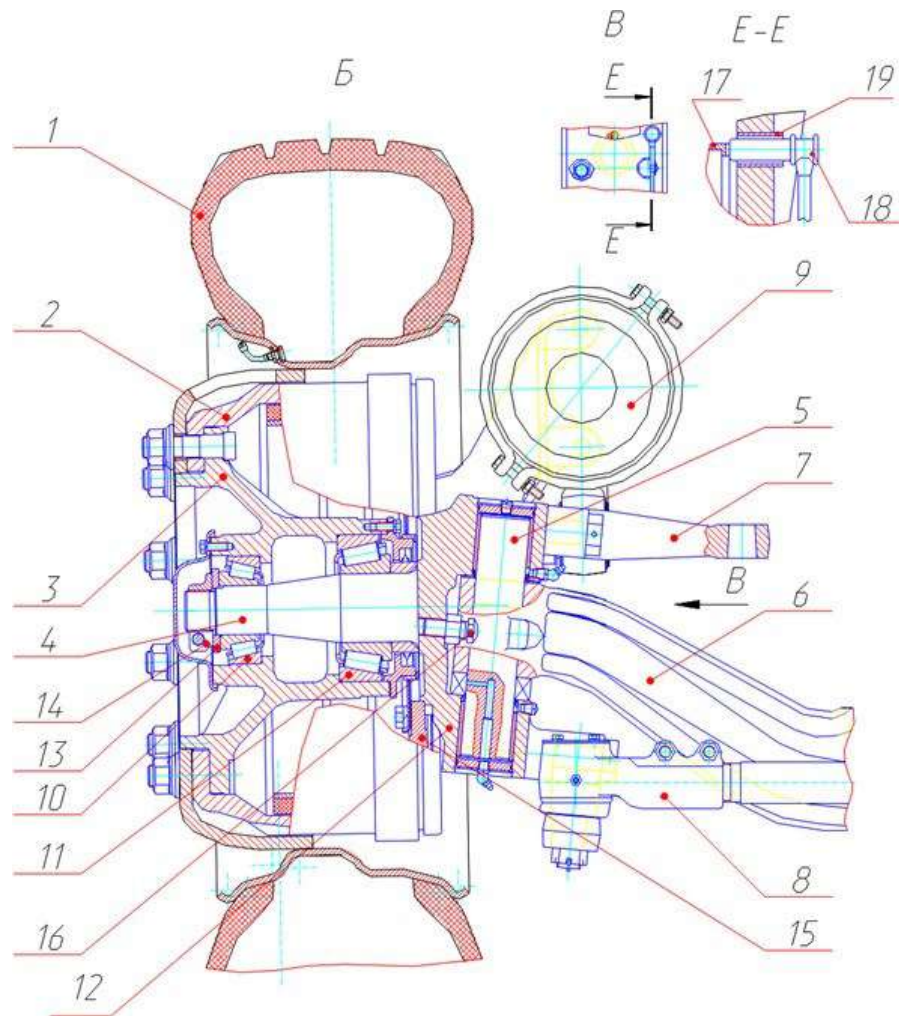


Рис. 4.8 Креслення ступичного вузла передньої підвіски РАМА тролейбуса
 1 – колесо; 2 – барабан гальмівний; 3 – маточина; 4 – кулак поворотний;
 5 – шворень; 6 – балка; 7 – важіль поворотний; 8 – поперечна рульова
 тяга; 9 – гальмівний механізм із гальмівною камерою; 10,11,12 –
 підшипники; 13 - шайба; 14 – гайка; 15 - супорт; 16 - болт зав'язаний; 17 -
 ротор АБС; 18 – датчик АБС; 19 – втулка датчика[114].

Дані несправності найчастіше є наслідком важких режимів роботи підшипника ступичного (поз. 10,11 рис. 4.17), викликаного динамічними навантаженнями, агресивною корозійною дією навколишнього середовища.

Для забезпечення безвідмовної роботи ступичних підшипників необхідно використовувати РМ, що відповідають режиму експлуатації. Наразі у виробничому депо ДУП «Міськелектротранс» існує потреба у якісному вітчизняному КММ, який дозволить збільшувати інтервали

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

технічного обслуговування та скоротити витрати на експлуатаційні витрати. Для оцінки основних триботехнічних характеристик були виконані порівняльні випробування імпортних КММ, що використовуються на даний момент, з КММ, пропонованими в даній роботі. Як видно з порівняльних гістограм, за всіма показниками КММ модифіковані гідросилікатами магнію підвищують свої експлуатаційні характеристики, порівняно з базовим ММ Літол-24, а у разі використання дисперсних частинок талькиту, можуть досягати аналогічних показників з імпортними зразками.

За результатами даних випробувань Літол-24 з дисперсними добавками талькиту може забезпечувати високі протизносні, протизадирні властивості, а також виявляти здатність добре утримуватися на поверхні вузлів тертя, що дозволяє рекомендувати його як заміну імпортних аналогів ММ. Для оцінки впливу дисперсних частинок на антикорозійні властивості КММ було проведено порівняльні дослідження КММ (ГОСТ 32335-2013), результати представлені на рис.4.9.

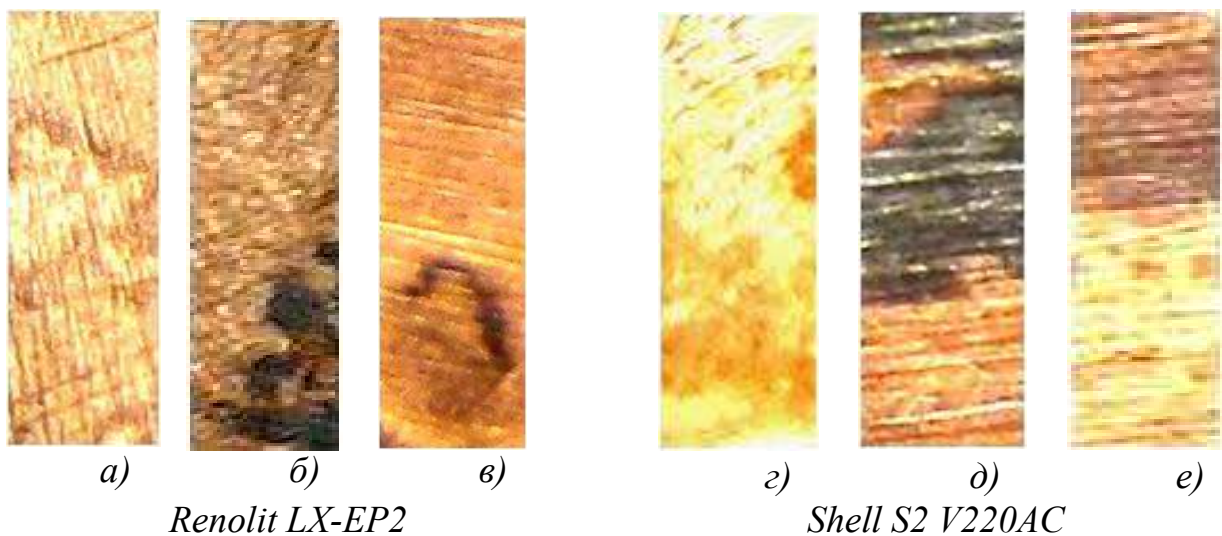


Рис. 4.9 Антикорозійні властивості КММ із дисперсними частинками гідросилікатів магнію: а) Renolit LX-EP2 – 1б; б) Renolit LX-EP2 + 5% серпентиніт – 3б; в) Renolit LX-EP2+ 5% талькіт – 3а; г) Shell S2 V220AC - 1б; д) Shell S2 V220AC+ 5% серпентиніт – 3б; е) Shell S2 V220AC + 5% талькіт - 2с.

Як було встановлено раніше (п. 3.4) у базовому стані Літол-24 має

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

низькі антикорозійні властивості, введення в нього дисперсних частинок гідросилікатів магнею підвищує ці властивості (рис. 3.23). Результати антикорозійних властивостей модифікованих дисперсними добавками гідросилікатів магнею імпорتنних КММ, що використовуються в ступичних підшипниках і спочатку мають високі антикорозійні властивості (рис. 4.19 а, г) показали зниження корозійної стійкості (рис. 4.19 б, в, д, е). Дане явище можна пояснити конфліктом між штатним пакетом антикорозійних присадок і пасивною дією захисної плівки, що утворюється на основі гідросилікату магнею.

Таким чином, Літол-24, модифікований дисперсними частинками гідросилікатів магнею, а саме талькитами, задовольняє всім вимогам, що пред'являються до КММ, що працюють у ступичних вузлах тертя, і може бути рекомендований для заміни імпорتنних КММ.

На підставі даної рекомендації були реалізовані натурні випробування КММ з дисперсною добавкою талькиту у роликівих радіально-упорних підшипниках з конічними роликами 6-7614А ступичного вузла тролейбуса моделі ПТЗ-5283 (рис. 4.10).



Рис. 4.10 Тролейбус моделі ПТЗ-5283 та передній міст у зборі
Експлуатація даного вузла проводилася протягом одного року з подальшим розбиранням та оцінкою поверхонь тертя підшипника (рис. 4.11). Після року експлуатації в рамках планового обслуговування ступичних вузлів проводилися дослідження профілів поверхні кілець підшипників, які працювали з КММ Renolit LX-EP2 та Літол-24+5%

мас.талькіт. На графіку змінання профілю (крива Аббота) спостерігається зменшення висоти та западин профілю для Renolit LX-EP2, коли як у Літол-24 з талькітом по переважно спостерігається зменшення глибини западин і незначне зменшення висоти вершин, що притаманно освіті захисного шару, утвореного гидросиликатом магнію, для формування якого згадувалося раніше.



Рис. 4.11 Фотографії поверхонь кілець та роликів підшипників після року експлуатації.

На основі аналізу поверхонь кілець та роликів можна відзначити, що підшипник, що експлуатується з Renolit LX-EP2, на поверхнях роликів має численні задирки, а на кільцях ММуги корозії. Для Літол-24 з дисперсними частинками талькіту характерним є виходжування поверхні роликів та утворення пористого шару на поверхнях кілець.

Висновки

1. Визначено ефективний склад на основі дисперсних частинок гідросилікатів магнію у КММ.
2. На поверхні тертя при фрикційній взаємодії утворюються та руйнуються захисні плівки, які реалізують дискретне екранування поверхонь, додатково розділяючи матеріали поряд з окисними плівками.
3. Реологічні властивості консистентних мастил безпосередньо залежать від їх структури. Без використання реологічних методів не можна оцінити структурно-механічні властивості РМ.
4. Встановлено вплив структури мастильного матеріалу на ряд експлуатаційних характеристик, обумовлених наявністю дисперсних частинок гідросилікатів магнію.
5. Розроблено та випробувано на ступичному вузлі тертя КММ з дисперсними добавками, який дозволить збільшувати інтервали технічного обслуговування маточини тролейбуса та скоротити витрати на експлуатаційні витрати.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Список літератури

1. NIIR Board of Consultants and Engineers Modern Technology of Petroleum, Greases, Lubricants & Petro Chemicals (2nd Revised Edition). NIIR PROJECT CONSULTANCY SERVICES, 2015. - 704 p.
2. Hand Book Of Lubricants, Greases And Petrochemical Technology Paperback.
3. by EIRI. Engineers India Research Institute, 2008. - 251 p.
4. Piet M. Lugt Grease Lubrication в Rolling Bearings. - Wiley, 2013. - 472 p.
5. Ю. L. Ishchuk Lubricating Grease Manufacturing Technology Hardcover. - New Age International Private Limited, 2005. - 236 p.
6. ГОСТ 26581-85 Змащення пластичні. Метод визначення ефективної в'язкості на ротаційному віскозиметрі. Запроваджено з 30.06.1986.М: Видавництво стандартів, 1985.
7. ГОСТ 7163-84 Нафтопродукти. Метод визначення в'язкості автоматичним капілярним віскозиметроК. Запроваджено з 01.07.1985.М: Стандартінформ, 2016.
8. ГОСТ 19295-73 Змащення пластичні. Метод визначення механічної стабільності. Запроваджено з 01.01.1975. М: ІПК Видавництво стандартів, 2001.
9. ГОСТ 6793-74 Нафтопродукти. Метод визначення температури краплі. Запроваджено з 01.01.1975. М: Стандартінформ, 2006.
- 10.ГОСТ 7142-74 Змащення пластичні. Методи визначення колоїдної стабільності. Запроваджено з 01.01.1975. М: Стандартінформ, 2006.
- 11.Бонер К.Дж. Виробництво та застосування консистентних мастил: переклад з англ. інж. А. П. Чочія. - К.: Гостоптехіздат, 1958. - 704 с.
- 12.ГОСТ ISO 11009-2013 Нафтопродукти та мастила. Визначення стійкості консистентних мастил до вимивання водою. Введено з 01.01.2015. М: Стандартінформ, 2014.
- 13.Ішчук Ю. L. Lubricating Grease. Manufacturing Technology. - New Age International Publisher, 2005. - 248 p.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

- 14.ГОСТ 7143-73 Змащення пластичні. Метод визначення межі міцності та термозміцнення. Запроваджено з 01.01.1975. М: Стандартінформ, 2006.
- 15.Dorinson A., Ludema KC Mechanics and Chemistry in Lubrication. - Elsevier Science Publishers BV, 1985. - 634 p.
- 16.ГОСТ 9.082-77 Єдина система захисту від корозії та старіння (ЕСЗКС). Олії та мастила. Методи лабораторних випробувань на стійкість до дії бактерій. Запроваджено з 01.01.1979. М: Стандартінформ, 2006.
- 17.Tribological properties of conductive lubricating greases / Fan X., Xia Y., Wang L. // Friction. - 2014. - Vol. 2, Issue 4. - P. 343-353.
- 18.Хебда К., Чичінадзе А.В. Довідник з триботехніки. Том 2. Мастильні матеріали, техніка, мастила, опори ковзання та кочення. - К.: Машинобудування, 1990. - 416 с.
- 19.Михайлов Н.В., Ребіндер П.А. Про структурно-механічні властивості дисперсних та високомолекулярних систем // Колл.журнал. - 1955. - Т. 18, № 2, - С. 107-119.
- 20.Ostwald Wo., Auerbach R. Ueber die Viscositat Kolloider Losungen im Struktur-Laminar-und Turbalenz-gebiet // Kolloid Zeitschrift. - 1926. - Bd. 38. a. - S. 261-264.
- 21.Casson NA Rheol. of disperse systems // Ed. CC Mill. L. – 1959. – P. 84. 37. Hershell WH, Bulkey R. Konsistenzmessungen von Gummi-Btnzolloosungen a. // Kolloid Zeitschrift. - 1926. - S. 291.
- 22.Ree T., Eyring H. Theory of Non-Newtonian Flow. // 2. Solution System of High Polymers, J.Appl.Phys. - 1955. - Vol. 26, N. 7. - P. 793-809.
- 23.Bingham EC Fluidity and plasticity. - NY: McGraw-Hill, 1922. - 219. p.
- 40.Маньковська Н.К. Сучасні уявлення про хімізм процесів окислення різних класів вуглеводнів, його інгібування та антиокислювальна стабільність пластичних мастил. - Київ: Наукова думка, 1976. - 46 с.
- 24.Крагельський І. В. Тертя та знос. - К.: Машинобудування, 1968. - 480 с.
46. Гаркунов Д. Н. Сучасні проблеми триботехніки та її суспільна

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

- значущість // Ремонт, відновлення, модернізація. - 2007. - №6. - С. 2-4.
- 25.49.A computed model for tribological properties of porous self-lubricating PPS composites: Numerical analysis and experimental verification / Wang H., Liu D., Yan L. and ect. // Wear. - 2014. - Vol. 320, Issue 1. - P. 94-102.
- 26.Введення у проблему використання природних шаруватих геомодифікаторів у трибосполученнях / Усачов В.В., Погода Л.І., Телух Д.К. та ін // Тертя та змащення в машинах та механізмах. - 2010. - а. №1. - С.36-43.
- 27.Space grease lubrication modeling: A discrete element approach / Busquet M., Renouf M., Berthier Y., Sicre, J. // Tribology International. - 2017. - Vol. 111.
- 28.Усачов В.В., Погода Л.І., Крюков Є.Ю. Розробка технології, що зміцнює обробки трибосполучень природнимигеомодифікаторами тертя // Тертя та мастило в машинах та механізмах. - 2009. - №11. - С. 8-23
- 29.Donnet C., Erdemir A. Tribology of Diamond-Like Carbon Films.Fundamentals and Applications. - Springer US XVI, 2008. - 664 p.
- 30.ГОСТ 9490-75 Матеріали мастильні. Рідкі та пластичні. Метод визначення триботехнічних характеристик на чотирикульковій машині. Запроваджено з 01.01.1978. К. ДЕРЖСТАНДАРТ СРСР, 1978.
- 31.Технічні характеристики Літол-24 [Електронний ресурс]. (<http://tpgargo.ru/catalog/smazki-gost-i-tu/litol-24>).Перевірено 13.11.2017.
- 32.Тарасевич Ю.І. Будова та хімія поверхні шаруватих силікатів. - Київ: Наукова думка, 1988. - 246 с.
- 33.ГОСТ 32335-2013 (ASTM D 4048-10) Змащення пластичні. Визначення корозійного на мідну пластинку. Введено з 01.01.2015.М: Стандартінформ, 2016.
- 34.Dunaev AV Hypotheses mechanism of repair serpentine tribopreparatov // Nanotechnics. - 2012. - № 4 (32). - P. 58-63.
- 35.Smith JF, Vishnyakov VM, Davies MI Nanoscale Friction Measurements До

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

750 ° C // Tribology Letters. - 2013. - Vol.49, Issue 3. - P. 455-463.

36. Blok H. Theoretical Study of Temperature Rise в Surfaces of Actual Contact Under Oiliness Lubricating Conditions // Proc. of Gen. Discussion Lubrication and Lubricants, Instn. Mech. Engrs. - 1937. - Vol. 2. - P. 222-235.

37. Крагельський І.В. Тертя та знос. - К.: Машинобудування, 1967. - 480 с.

38. Михайлов А.В., Корольов І.А., Червоний В.А. Теорія тертя та зношування: Навчально-методичний комплекс. - СПб.: Санкт-Петербурзький гірничий університет, 2016. - 166 с.

39. Крагельський І.В., Добичин К.К., Комбалов В.С. Основи розрахунків на тертя та знос. - К.: Машинобудування, 1977. - 526 с.

					МРТАМ 23.22369.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82