

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15935

А. Г. КРАВЦОВ, А. В. ВОЙТОВ

Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенка, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОСИСТЕМ ПРИ НАЯВНОСТІ ФУЛЕРЕНІВ В МАСТИЛЬНОМУ МАТЕРІАЛІ. ЧАСТИНА 2. ЗА ПАРАМЕТРОМ НАВАНТАЖУВАЛЬНО- ШВИДКІСНОГО ДІАПАЗОНУ

В роботі представлені результати експериментальних досліджень об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя при застосуванні фулеренових композицій в змащувальному матеріалі та зміні навантажувально-швидкісного діапазону експлуатації. Обґрунтовано та експериментальним шляхом підтверджено раціональний вміст фулеренової композиції, яка складається з фулеренового дрібнодисперсного порошку, попередньо розчиненого в рослинній високоолеїновій ріпаковій олії. Доведено, що раціональною концентрацією може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу. Напрямок зниження об'ємної швидкості зношування за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоефективним і експериментально підтвердженим. Експериментальним шляхом одержані результати, які підтверджують гіпотезу формування мастильної плівки на поверхні тертя трибосистем при наявності фулеренових композицій в мастильних матеріалах. Встановлено ступінь впливу фулеренових композицій на об'ємну швидкість зношування, що дозволяє зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі даних експерименту. Зниження швидкості зношування становить 20 ... 25%, похибка моделювання становить 5,2 ... 14,0%. Експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування фулеренових композицій найбільш ефективно знижує коефіцієнт тертя (на 32,4 ... 86%), в порівнянні зі швидкістю зношування (на 20 ... 25%). На підставі таких результатів зроблено висновок, що фулеренова композиція в рідких мастильних матеріалах є антифрикційною і в меншій мірі протизносною. Експериментально встановлено, що застосування фулеренових композицій в змащувальних матеріалах має раціональний навантажувально-швидкісний діапазон експлуатації. В даному діапазоні відбувається максимальне зниження коефіцієнта тертя.

Ключові слова: трибосистема, кластери, міцели, фулерени, фулеренові композиції, електростатичне поле поверхні тертя, навантаження на трибосистему, швидкість ковзання, об'ємна швидкість зношування, коефіцієнт тертя

Вступ. Фулерени та їх похідні на сьогоднішній день знайшли широке застосування в різних областях науки і техніки, в тому числі і в трибології. В результаті реакцій приєднання фулерени можуть утворювати різні неорганічні і органічні сполуки. У світовій практиці для поліпшення трибологічних характеристик мастильних матеріалів в якості присадок почали застосовувати комплексні з'єднання, серед яких найбільшого поширення набули фулерени C₆₀. На думку деяких дослідників застосування фулеренів в якості присадок до мастильних матеріалів значно підвищить їх протизносні, протизадирні і антифрикційні властивості.

Використання добавок фулеренів до технічних рідких мастильних матеріалів ставить ряд питань про їх ефективність впливу на протизносні і антифрикційні властивості. Інтерес до даного явища має як фундаментальний, так і прикладний характер, що дозволить розробляти концепції їх застосування.

Дана робота є продовженням статті [1] і має на меті дослідити зміну трибологічних характеристик трибосистем, де в змашувальному матеріалі використовуються фулеренові композиції при зміні навантажувально-швидкісного діапазону експлуатації, та порівняти отримані експериментальні результати з теоретичними, які отримані раніше.

Аналіз останніх публікацій по даній проблемі. В даний час встановлено [2-5], що введення нетоксичних сферичних кластерів фулерену C_{60} до складу олив, пластичних мастил і твердозмашувальних покриттів знижує силу тертя, зменшує знос і підвищує протизадирну стійкість фрикційних вузлів. Однак, на думку авторів роботи [2], дані про вплив різних похідних фулерену на змашувальні властивості моторних палив в літературі відсутні. Це пов'язано з низькою розчинністю нанорозмірних частинок фулеренів в малов'язких рідинах. Так, розчинність фулерена C_{60} в бензинах і етанолі не перевищує сотих масових часток відсотка. Описані ж в літературі [3-5] ефекти поліпшення трибологічних властивостей в рідких і пластичних мастилах, спостерігалися при набагато більших масових частках фулеренів - більше 0,1%.

Авторами роботи [6] експериментально встановлено, що шлях поліпшення трибологічних властивостей мастильних матеріалів введенням дрібнодисперсного порошку фулеренів в базові технічні оливи малоефективний. У вказаній роботі запропонований варіант попереднього диспергування фулеренів в рослинних високоолеїнових оліях, наприклад, ріпакової, а потім додавання даної композиції в технічні оливи. Автори наводять результати випробування рідких мастильних матеріалів на чотирьохкульовій машині тертя, які підтверджують висунутий технологічний прийом. Такий варіант дозволяє поліпшити показник зносу на 26,6%, збільшити критичне навантаження на 40,9%. Однак протизадирні властивості такі композиції не покращують, навантаження зварювання не змінюється. В роботі наведені експериментальні дослідження зі зміни коефіцієнта тертя, який зменшується на 86%.

У роботі [7] представлений аналіз досліджень розчинності фулеренів в різних оліях рослинного походження. На підставі виконаних досліджень автори стверджують: фулерени досить добре розчинні в цих природних розчинниках; фулерени утворюють з природними рослинними оліями стійкі в часі розчини; фулеренові розчини не містять ніяких шкідливих домішкових компонентів; розчини фулеренів в оліях мають виражені антиоксидантні властивості.

Наявність в об'ємі мастильного матеріалу дисперсної фази у вигляді кластерів та міцел потребує, в ряді з загальною динамічною в'язкістю рідини, розглядати "структурну в'язкість". Дане поняття було введено В. Освальдом в 1925 р. та отримало подальший розвиток в монографії М. Рейнера в 1965 р. Використання даного поняття дозволяє враховувати не тільки динамічну в'язкість рідини, а й динамічну в'язкість агрегатів, які знаходяться в об'ємі рідини з урахуванням швидкості зсуву.

Автор роботи [8] стверджує, що структуровані рідини утворюють агрегати у вигляді дублетів або ланцюгів, ланцюги можуть утворювати суцільну сітку. Взаємодія агрегатів в об'ємі рідини виражається в утворенні досить міцних

з'єднань, перш за все коагуляційного походження. На думку автора роботи [8], реологічні властивості суспензій обумовлені величиною об'ємної концентрації дисперсної фази, величиною сил взаємодії між агрегатами і частинками та структурою сформованих агрегатів. Незначне зовнішнє навантаження утворює пружну деформацію каркасу. При досить великому навантаженні, каркас руйнується, а окремі агрегати роз'єднуються. При цьому, на думку авторів робіт [8, 9], окремі агрегати (кластери та міцели на основі фулеренів), можуть утворювати обертальний рух між поверхнями тертя. При виникненні такого механізму взаємодії, в'язкість рідини поступово зменшується.

В роботі [10] проведено порівняльні дослідження різних вуглецевих матеріалів (фулерену C_{60} , сажі, що містить і не містить C_{60} , графіту, технічних саж) в якості добавок до індустриальної оливи, при терті ковзання металів мідь-сталь і сталь-сталь. Автори роботи наводять дані, що поверхнева плівка являє собою композит мікроскопічної товщини ($\sim 1000 \text{ \AA}$), що складається, з одного боку, з шарів на основі модифікованого фулерену C_{60} і володіє підвищеною твердістю і, з іншого боку, з фулерено-полімерної сітки. Автори роблять висновок, що подальша деталізація надмолекулярної будови поверхневої плівки вимагає проведення додаткових досліджень. На підставі проведеного аналізу робіт [11-13] і власних експериментальних досліджень авторами сформульовано механізм антифрикційної і протизносної дії фулеренових присадок наступним чином.

В процесі трибopolімерізації мінеральної оливи на поверхнях, що труться, утворюється покриття у вигляді просторової трибopolімерної сітки, пов'язаної з підкладкою (мабуть, ковалентними зв'язками). Автори стверджують, що таке покриття захищає поверхні від безпосереднього контакту, запобігає масопереносу між поверхнями тертя і в той же час, будучи просторовою полімерною сіткою, утримує в своїх осередках мінеральну оливу, забезпечуючи таким чином і малозносний режим тертя та малий коефіцієнт тертя. Посилаючись на дослідження, які наведено в роботі [14], а також на власні дослідження, автори роботи роблять висновок, що в присутності фулерена, завдяки його великій реакційній здатності, різко прискорюється процес трибopolімерізації, що призводить до утворення трибopolімерної сітки, у вузлах якої знаходяться переважно молекули C_{60} . Це принципово змінює картину тертя, так як трибopolімерне захисне покриття в цьому випадку утворюється значно швидше, і малозносний і антифрикційний режим тертя встигає реалізуватися до задира. У представленій роботі наводяться дані, що якщо в процесі тертя трибopolімерне покриття руйнується (наприклад, під дією збільшення навантаження) і виникає безпосередній контакт тіл, що труться, процес трибopolімерізації посилюється і трибopolімерна плівка відновлюється. У даній роботі виконано вимір мікротвердості утвореної плівки на поверхні тертя при застосуванні фулеренів різної концентрації, до 5%. Автори стверджують, що така концентрація не може пояснити велике підвищення мікротвердості поверхневих шарів. Тому слід врахувати також можливість модифікації фулерену C_{60} в зоні тертя і утворення плівки з модифікованого фулерену. Ця можливість впливає з багатьох даних про структурні перетворення фулерена C_{60} при різних високоенергетичних впливах.

Факти утворення при терті проміжних шарів, що складаються з ультрадисперсних частинок матеріалів що труться, та зазнають поліморфні перетворення і вступають в досить незвичайні взаємодії з елементами зовнішнього середовища, досить добре відомі [15,16]. Тому трибоконтат є досить потужним реактором

для різного роду структурних перетворень і можна очікувати появи в зоні тертя тих модифікацій фулерена, які володіють підвищеною твердістю і можуть визначати властивості поверхневих плівок, що утворюються в процесі трибосинтезу.

На думку автора робіт [17, 18], при розгляді процесів тертя та зношування, коли поверхні тертя накопичують електростатичний заряд, необхідно розглядати сили електростатичної взаємодії між агрегатами дисперсної фази та поверхнею тертя. При цьому, необхідно враховувати, що концентрація агрегатів в полі дії електростатичних сил поверхні тертя буде більша, ніж на відстані від поверхні, де поле не діє. Відповідно до висновків роботи [8, 9] агрегати дисперсної фази, об'єднані зовнішніми електростатичними силами в суцільну сітку (каркас) на поверхні тертя, набувають властивостей "твердого тіла".

Викладений вище аналіз ставить завдання по дослідженню впливу навантажувально-швидкісного діапазону експлуатації трибосистем при наявності в базовій оливі фулеренових композицій різних концентрацій. Дослідження необхідно проводити на базовій оливі з середнім рівнем трибологічних властивостей, де ефект від застосування таких композицій максимальний [1].

Мета дослідження. Метою експериментальних лабораторних випробувань є оцінка трибологічних характеристик трибосистем при зміні навантажувально-швидкісного діапазону і різних концентрацій фулеренових композицій та підтвердження адекватності розроблених математичних моделей формування зносостійкої змашувальної плівки на поверхнях тертя, які опубліковані раніше.

Методичний підхід в проведенні досліджень. При плануванні лабораторних випробувань трибосистем при зміні навантажувально-швидкісного діапазону необхідно визначити мінімальний обсяг вибірки - кількість однакових повторів під час експерименту, які необхідні для отримання достовірної інформації з заданою точністю (відносної похибкою e) і достовірністю (довірчою ймовірністю q). З метою визначення шуканої величини, скористаємося основними положеннями математичної статистики і керівним документом із стандартизації РД 50-690-89.

Першою необхідною умовою такої оцінки є перевірка вибірки значень швидкості зношування I та коефіцієнту тертя f на відповідність нормальному закону розподілу.

Середньоквадратичне абсолютне відхилення (CAO) для швидкості зношування трибосистеми:

$$CAO = \sum |I_i - I_{cp}| / N ,$$

для коефіцієнту тертя трибосистеми:

$$CAO = \sum |f_i - f_{cp}| / N ,$$

де I_i і f_i – поточне значення швидкості зношування та коефіцієнту тертя; I_{cp} і f_{cp} – середнє значення швидкості зношування та коефіцієнту тертя; N - кількість однотипних випробувань - обсяг вибірки.

Для вибірки, що має нормальний закон розподілу, справедливо вираз:

$$\left| \frac{CAO}{S} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{N}}$$

де S – середньоквадратичне відхилення, визначається за формулою:

- для швидкості зношування:

$$S_I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{cp})^2},$$

- для коефіцієнту тертя:

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - f_{cp})^2},$$

Отриману експериментальну вибірку значень I і f необхідно перевірити на однорідність і відтворюваність від досліду до досліду за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$$

де S_{\max}^2 - максимальне значення дисперсії для I і f відповідно; S_i^2 - значення дисперсії i - го досліду для I і f відповідно.

Перевіряється гіпотеза:

$$G_p \leq G_{\text{табл}}$$

де $G_{\text{табл}}$ - табличне значення критерію Кохрена, при заданій довірчій ймовірності $q = 0,90$.

Отримані експериментальні значення об'ємної швидкості зношування і коефіцієнту тертя порівнювалися з теоретично отриманими значеннями за математичними моделями, які наведено в роботі [18]. Відносну похибку моделювання об'ємної швидкості зношування і коефіцієнту тертя в будь-якій точці процесу визначимо за виразами:

$$e_I = \left| \frac{I_{\text{екс}} - I_M}{I_{\text{екс}}} \right| \cdot 100\%,$$

$$e_f = \left| \frac{f_{\text{екс}} - f_M}{f_{\text{екс}}} \right| \cdot 100\%,$$

де e_I , e_f - відносна похибка моделювання об'ємної швидкості зношування і коефіцієнту тертя; $I_{\text{екс}}$, I_M , $f_{\text{екс}}$, f_M - значення об'ємної швидкості зношування і коефіцієнту тертя, які виміряні в процесі експерименту і отримані при моделюванні за моделями, які наведено в роботі [17].

Під час проведення лабораторних випробувань методом штучних баз реєстрували об'ємний знос рухомого та нерухомого трибоелементів та з урахуванням часу випробувань, розраховували сумарну об'ємну швидкість зношування, $\text{м}^3/\text{год}$.

Результати досліджень. Результати експериментальних досліджень зміни об'ємної швидкості зношування I , $\text{м}^3/\text{год}$ та коефіцієнта тертя при зміні швидкості ковзання $v_{\text{ков}}$, $\text{м}/\text{с}$, представлено на рис. 1 та рис. 2, а при зміні навантаження N , Н , на рис. 3 та рис. 4. Експериментальні дослідження проводилися на трибосистемі «сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4», кінематична схема – «кільце-кільце», коефіцієнт взаємного перекриття дорівнював 0,5. Базова олива М-10Г_{2к}, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Крива «базова олива» відповідає об'ємної швидкості зношування та коефіцієнту тертя трибосистеми, де в змащувальному матеріалі М-10Г_{2к} не містить-

ся фулеренових добавок. Нижні криві відповідають наступним концентраціям фулеренових композицій:

50 гр/кг = 0,5 гр/кг фулеренів + 49,5 гр/кг рослинної ріпакової олії;

100гр/кг = 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної ріпакової олії;

150 гр/кг = 1гр/кг фулеренів + 149 гр/кг рослинної ріпакової олії.

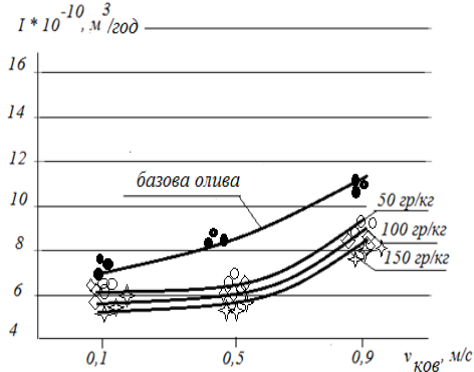


Рис. 1. Експериментальні та теоретичні залежності зміни об'ємної швидкості зношування від швидкості ковзання і концентрації фулеренової композиції в базовій оливі

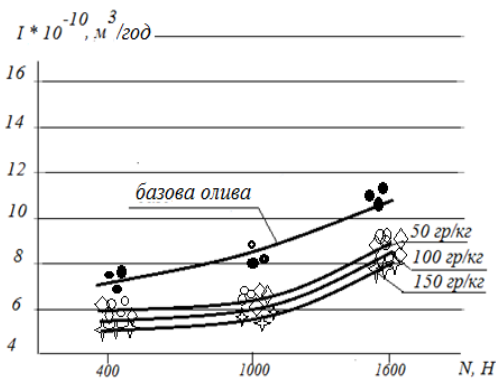


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності зміни об'ємної швидкості зношування від навантаження і концентрації фулеренової композиції в базовій оливі

Рослинна ріпакова олія олеїнового типу застосовувалася в якості розчинника фулеренів з подальшим додаванням до моторної оливи нафтового походження. Такий діапазон зміни концентрацій фулеренових композицій обраний на підставі експериментальних досліджень, які були проведені на чотирьохкульковій машині тертя [6]. Результатом цих досліджень є висновок, що збільшення фулеренової композиції більше 150 гр/кг позитивного ефекту не дає.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей (точки на полі графіка) і їх порівняння з теоретичними кривими (суцільні лінії, які отримано за моделями работ [17, 18]) дозволяє зробити висновок, що похибка моделювання об'ємної швидкості зношування трибосистеми становить 8,9 - 14,0%. При цьому, при зміні швидкості ковзання більша похибка відповідає меншій швидкості ковзання, а при зміні навантаження більша похибка відповідає більшому навантаженню.

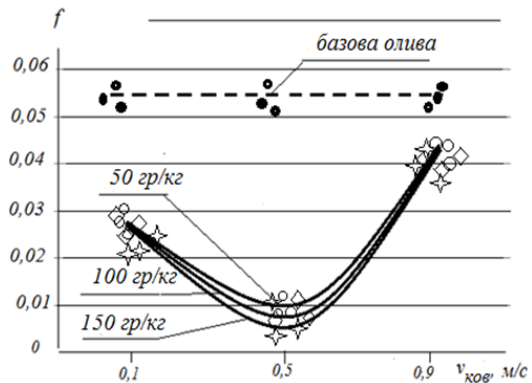


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності зміни коефіцієнта тертя трибосистеми від швидкості ковзання і концентрації фулеренової композиції

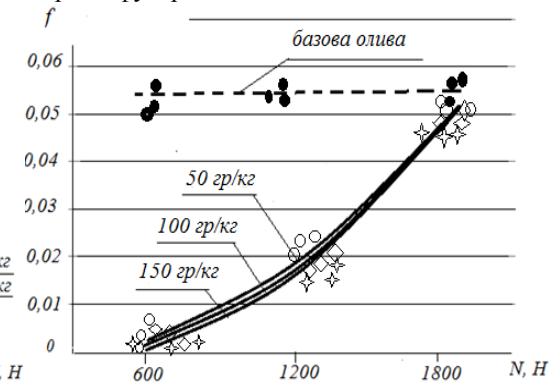


Рис. 4. Експериментальні та теоретичні залежності зміни коефіцієнта тертя трибосистеми від навантаження і концентрації фулеренової композиції

Оцінку відтворюваності результатів вимірювань швидкості зношування та коефіцієнта тертя виконувалася за допомогою критерію Кохрена. Аналіз розрахункових значень критерію Кохрена та їх порівняння з табличними значеннями при заданому рівні значущості 0,95 (кількість оцінюваних параметрів - 2, кількість повторів - 4), дозволяє зробити висновок, що результати експерименту однорідні і відтворювані.

Обговорення результатів досліджень. З аналізу представлених експериментальних значень і їх порівняння з теоретичними залежностями [18] слідує, що математична модель формування мастильної плівки на поверхні тертя трибоелементів, яка розроблена в роботі [17], адекватно відображає процес тертя та зношування і знаходиться в функціональному взаємозв'язку зі швидкістю зношування та коефіцієнтом тертя.

Експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретично отриманий в роботі [18] результат, що застосування фулеренової композиції, що складається з розчинника і дрібнодисперсного порошку фулеренів, знижує швидкість зношування при зміні навантаження і швидкості ковзання на 21,2 ... 24,9%. Похибка моделювання становить 6,5 ... 9,2%.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що збільшення концентрації фулеренової композиції в базовій оливі від 50 гр/кг до 150 гр/кг дозволяє знизити об'ємну швидкість зношування між даними концентраціями на 7,8% (теоретичний результат 6,4%). Тому напрямок зниження об'ємної швидкості зношування за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоефективним і експериментально підтвердженим.

Порівняння експериментальних точок і теоретичних кривих, рис. 2, дозволяє стверджувати, що ефект зниження коефіцієнта тертя при зміні швидкості ковзання має нелінійний характер. При експлуатації даної конструкції трибосистеми на швидкості ковзання менше або більше ніж оптимальна - 0,5 м/с, зниження коефіцієнта тертя досягає величини 43,6%, що підтверджує теоретичні результати. Похибка моделювання становить 6,4%.

Ефект зниження коефіцієнта тертя на швидкості ковзання 0,9 м/с не перевищує 11,2%, похибка моделювання становить 7,3%. Для даних режимів роботи трибо системи, експериментально підтверджено наявність коливального процесу коефіцієнта тертя (режим stic-slip).

При експлуатації трибосистеми на оптимальній швидкості ковзання, що дорівнює 0,5 м/с, експериментально підтверджено відсутність коливального процесу, а ефект від зниження коефіцієнта тертя становить 74%, похибка моделювання 9%.

Аналіз представлених експериментальних результатів на рис. 4 дозволяє зробити висновок, що при застосуванні фулеренових композицій максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя спостерігається при малих і середніх навантаженнях. Експериментально встановлено, що зниження коефіцієнта тертя при $N=600$ Н дорівнює 82%, при $N=1200$ Н, дорівнює 52%, похибка моделювання становить 14%. При максимальному навантаженні $N=1800$ Н, ефект становить 15%, похибка моделювання 7,8%. При цьому підтверджено теоретичний висновок, що при збільшенні навантаження процес тертя набуває коливальність.

Рациональною концентрацією може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25

гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу.

Експериментально підтверджено, що збільшення концентрації фулеренової композиції не робить істотного впливу на зниження коефіцієнта тертя. Різниця в величині при концентрації 50...150 г/кг становить не більше 7%, похибка моделювання 6%.

Висновки. Експериментальним шляхом одержані результати, які підтверджують гіпотезу формування мастильної плівки на поверхні тертя трибосистем [17] при наявності фулеренових композицій в мастильних матеріалах. Встановлено ступінь впливу фулеренових композицій на об'ємну швидкість зношування, що дозволяє зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі даним експерименту. Зниження швидкості зношування становить 20...25%, похибка моделювання становить 5,2...14,0%. Рациональною концентрацією може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу. Напрямок зниження об'ємної швидкості зношування за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоєфективним і експериментально підтвердженим.

Експериментальними дослідженнями підтверджено адекватність макро і мікрореологічних моделей релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя [19] при наявності фулеренових композицій в мастильних матеріалах і їх вплив на величину коефіцієнта тертя. Це дозволяє стверджувати, що застосування фулеренових композицій найбільш ефективно знижує коефіцієнт тертя (на 32,4...86%), в порівнянні зі швидкістю зношування (на 20...25%). На підставі таких результатів зроблено висновок, що фулеренова композиція в рідкі мастильні матеріали є антифрикційною і в меншій мірі протизносною. Розроблені математичні моделі адекватні даними експерименту. Похибка моделювання становить 7,8...14,0%.

Експериментально встановлено, що застосування фулеренових композицій в змащувальних матеріалах має рациональний навантажувально-швидкісний діапазон експлуатації. В даному діапазоні відбувається максимальне зниження коефіцієнта тертя.

Список літератури

1. Войтов В. А., Кравцов А. Г. Експериментальні дослідження трибосистем при наявності фулеренів в мастильному матеріалі. Частина 1. За параметром трибологічних характеристик базової оливи // Проблеми тертя та зношування. 2021. – №. 2 (91). – С. 27–36.
2. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены // Успехи физ. наук, 1993, 163 (2), 33–60. DOI: [10.3367/UFNr.0163.199302b.0033](https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199302b.0033)
3. Bhushan, B., Gupta, B.K., van Cleef, G.W., et al., Fullerene (C₆₀) Films for Solid Lubrication // Tribol. Trans., 1993, vol. 36, no. 4, pp. 573–580.
4. Bhushan, B., Gupta, B.K., van Cleef, G.W., et al., Sublimed C₆₀ Films for Tribology // Appl. Phys. Lett., 1993, vol. 62, no. 25, pp. 3253–3255.
5. Gupta, B.K. and Bhushan, B., Fullerene Particles as an Additive to Liquid Lubricants and Greases for Low Friction and Wear // Lubr. Eng., 1994, vol. 50, no. 7, pp. 524–528.
6. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsybal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / FRICTION AND WEAR, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197

7. Семенов К.Н., Чарыков Н.А., Арапов О.В. и др. Растворимость легких фуллеренов в некоторых эфирных и растительных маслах // Химия растительного сырья. 2010. №2. С. 147–152.

8. Библик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. – 172 с.

9. Матвиенко В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2011. – Т.52. – № 4. – С. 243 – 276.

10. Гинзбург Б.М., Байдакова М.В., Киреенко О.В. и др. Влияние фуллерена C_{60} , фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов / Журнал технической физики, 2000, т.70, вып.12, с.87-97.

11. Гинзбург Б.М., Киреенко О.Ф., Точильников Д.Г., Булатов В.П. Образование износостойкой структуры при трении скольжения стали по меди в присутствии фуллерена или фуллереновой сажи // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 23. Вып. 23. С. 38–42.

12. Гинзбург Б.М., Киреенко О.Ф., Байдакова М.В., Соловьев В.А. Образование защитной пленки на поверхности трения меди в присутствии фуллерена C_{60} // Письма в ЖТФ. 1999. Вып. 11. С. 113–116.

13. Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г., Киреенко О.Ф., Булатов В.П. Влияние фуллерена C_{60} на характеристики трения и изнашивания стали // Письма в ЖТФ. 1995. Вып. 22. С. 62–66

14. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Образование полимеров трения — новый принцип действия смазочных материалов. - М.: ЦНИИТЭ Нефтехим, 1976. - 44 с.

15. Ригни Д. Процессы изнашивания при трении скольжения // Трение и износ. 1987. № 8. С. 16–22.

16. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фракционном взаимодействии. - М.: Машиностроение. 1986. - 360 с.

17. Кравцов А.Г. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения – смазочная среда // Проблемы трибології. – 2017. – № 3. – С. 89 – 99.

18. Кравцов А.Г. Моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале и ее влияние на скорость изнашивания трибосистем / А. Г. Кравцов // Проблемы трибології. – 2018. – № 1. – С. 69 – 77.

19. Кравцов А.Г. Розробка макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності фулеренів/ А.Г. Кравцов // Проблемы трибології. – 2018. – № 4. – С. 36 – 40.

Стаття надійшла до редакції 27.06.2021

Кравцов Андрій Григорович – к.т.н., доцент, декан факультету технологічних систем і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка, kravcov@gmail.com

Войтов Антон Вікторович – к.т.н., доцент, старший викладач кафедри деревооброблювальних технологій та системотехніки лісового комплексу Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, k1kavoitov@gmail.com

A. G. KRAVTSOV, A. V. VOITOV

EXPERIMENTAL STUDIES OF TRIBOSYSTEMS IN THE PRESENCE OF FULLERENES IN LUBRICANT. PART 2. BY PARAMETER OF LOADING AND SPEED RANGE

The paper presents the results of experimental studies of the volumetric wear rate and friction coefficient when using fullerene compositions in the lubricant and changing the load-speed range of operation. The rational content of fullerene composition consisting of fullerene fine powder, pre-dissolved in vegetable high-oleic rapeseed oil, is substantiated and experimentally confirmed. It is proved that a rational concentration can be a theoretically substantiated and experimentally confirmed average value: 0,75 g/kg of fullerenes + 99,25 g/kg vegetable high oleic oil, as a solvent, followed by addition to the base oil. The direction of reducing the volumetric wear rate by increasing the concentration of the fullerene composition is more than 100 g/kg can be considered ineffective and experimentally confirmed. Experimental results have been obtained that confirm the hypothesis of the formation of a lubricating film on the friction surface of tribosystems in the presence of fullerene compositions in lubricants. The degree of influence of fullerene compositions on the volumetric wear rate is established, which allows to draw a conclusion about the adequacy of the developed mathematical model to the experimental data. The decrease in wear rate is 20...25%, the simulation error is 5,2...14,0%. Experimental studies have shown that the use of fullerene compositions most effectively reduces the coefficient of friction (by 32,4 ... 86%), compared with the wear rate (by 20 ... 25%). Based on these results, it is concluded that the fullerene composition in liquid lubricants is anti-friction and to a lesser extent antiwear. It is experimentally established that the use of fullerene compositions in lubricants has a rational load-speed range of operation. In this range there is a maximum reduction of the coefficient of friction.

Keywords: tribosystem, clusters, micelles, fullerenes, fullerene compositions, electrostatic friction surface, load on the tribosystem, sliding speed, volumetric wear rate, friction coefficient

References

1. Vojtov V. A., Kravtsov A. H. Eksperimental'ni doslidzhennya trybosystem pry nayavnosti fulereniv v mastyl'nomu materiali. Chastyna 1. Za parametrom trybolohichnykh kharakterystyk bazovoyi olyvy // Problemy tertya ta znoshuvannya. 2021. – №. 2 (91). – S. 27-36.
2. Eletskiy A.V., Smirnov B.M. Fullerenes // Uspekhi fiz. sciences, 1993, 163 (2), 33–60. DOI: [10.3367/UFNr.0163.199302b.0033](https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199302b.0033)
3. Bhushan, B., Gupta, B.K., van Cleef, G.W., et al., Fullerene (C₆₀) Films for Solid Lubrication // Tribol. Trans., 1993, vo. 36, no. 4, pp. 573–580.
4. Bhushan, B., Gupta, B.K., van Cleef, G.W., et al., Sublimed C₆₀ Films for Tribology // Appl. Phys. Lett., 1993, vol. 62, no. 25, pp. 3253–3255.
5. Gupta, B.K. and Bhushan, B., Fullerene Particles as an Additive to Liquid Lubricants and Greases for Low Friction and Wear // Lubr. Eng., 1994, vol. 50, no. 7, pp. 524–528.
6. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / FRICTION AND WEAR, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197
7. Semenov K.N., Charykov N.A., Arapov O.V. i dr. Rastvorimost' legkikh fullerenov v nekotorykh efirnykh i rastitel'nykh maslakh // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2010. №2. S. 147–152.
8. Bibik Ye.Ye. Reologiya dispersnykh sistem. – L.: Izd-vo Leningradskogo un-ta, 1981. -172 s.
9. Matviyenko V.N., Kirsanov Ye.A. Vyazkost' i struktura dispersnykh sistem // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya. – 2011. – T.52. – № 4.– S. 243 – 276.
10. Ginzburg B.M., Baydakova M.V., Kireyenko O.V. i dr. Vliyaniye fullerena C₆₀, fullerenovykh sazhi i drugikh uglerodnykh materialov na granichnoye treniye skol'zheniya metallov / Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2000, T.70, vyp.12, s. 87-97.

11. Ginzburg B.M., Kireyenko O.F., Tochil'nikov D.G., Bulatov V.P. Obrazovaniye iznosostoykoy struktury pri trenii skol'zheniya stali po medi v prisutstvii fullereny ili fullerenovoy sazhi // Pis'ma v ZHTF. 1995. T. 23. Vyp. 23. S. 38–42.

12. Ginzburg B.M., Kireyenko O.F., Baydakova M.V., Solov'yev V.A. Obrazovaniye zashchitnoy plenki na poverkhnosti treniya medi v prisutstvii fullereny C₆₀ // Pis'ma v ZHTF. 1999. Vyp. 11. S. 113–116.

13. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G., Kireyenko O.F., Bulatov V.P. Vliyaniye fullereny C₆₀ na kharakteristiki treniya i iznashivaniya stali // Pis'ma v ZHTF. 1995. Vyp. 22. S. 62–66.

14. Zaslavskiy YU.S., Zaslavskiy R.N. Obrazovaniye polimerov treniya - novyy printsip deystviya smazochnykh materialov. - M.: TSNIITE Neftekhim, 1976. - 44 s.

15. Rigni D. Protsessy iznashivaniya pri trenii skol'zheniya // Treniye i iznos. 1987. № 8. S. 16–22.

16. Bakli D. Poverkhnostnyye yavleniya pri adgezii i fraktsionnom vzaimodeystvii. - M.: Mashinostroyeniye. 1986. - 360 s.

17. Kravtsov A.G. Razrabotka matematicheskoy modeli vzaimodeystviya elektricheski aktivnykh geterogennykh melkodispersnykh sistem na granitse razdela poverkhnost' treniya – smazochnaya sreda // Problemi tribologii. – 2017. – № 3. – S. 89–99.

18. Kravtsov A.G. Modelirovaniye formirovaniya maslyanoy plenki na poverkhnosti treniya pri nalichii fullerenovykh dobavok v smazochnom materiale i yeye vliyaniye na skorost' iznashivaniya tribosistem / A. G. Kravtsov // Problemi tribologii. – 2018. – № 77.

19. Kravtsov A.H. Rozrobka makroreolohichnoyi modeli relaksatsiyi napruzhen' v mastyl'niy plivtsi na poverkhni tertya pry nayavnosti fulereniv/ A.H. Kravtsov // Problemi tribologii. – 2018. – № 4. – S. 36 – 40.