

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).24-33](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).24-33)**А.Г. Кравцов**, доц., канд. техн. наук*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім .П. Василенка, м. Харків, Україна  
e-mail: [kravcov\\_84@ukr.net](mailto:kravcov_84@ukr.net)*

## Дослідження структури сервовитної плівки на поверхні тертя з фулереновими композиціями

У роботі представлені експериментальні результати дослідження поверхонь тертя без застосування і при застосуванні фулеренової композиції в мастильному матеріалі. Доведено, що параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Наведено результати Фур'є-аналізу, які дозволяють стверджувати, що при застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації. Хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції показав збільшенням процентного вмісту вуглецю при одночасному зменшенні процентного вмісту кисню.

**трибосистема, сервовитна плівка, фулеренові композиції, кластери, міцели, Фур'є-аналіз, вектор напруження, хімічний аналіз поверхонь тертя**

**Постановка проблеми.** За останні роки з'явилося багато публікацій присвячених застосуванню нанодобавок до мастильних матеріалів [1-3]. Виявлено, що модифіковані оливи наноматеріалами, утворюють дисперсні системи, підвищують зносостійкість робочих поверхонь різних типів трибосистем та знижують втрати на тертя. Дослідження формування оптимального складу трибологічних присадок до базової оливи показали можливість покращення характеристик змащувальних матеріалів. Було виявлено, що застосування наноматеріалів дає можливість формувати функціональні поверхневі шари, які забезпечують підвищення ресурсу трибосистем.

Наявність в змащувальному матеріалі дисперсної фази у вигляді кластерів і міцел на основі молекул фулерена, створюють на поверхні тертя "зшиті" структури, які сприймають і релаксують напруження на фактичних плямах контакту. Управління процесом створення таких структур дозволить підвищити зносостійкість і знизити втрати на тертя.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами роботи [4] представлено огляд літератури по мастильним матеріалам з додаванням наночастинок. Проаналізовано вплив наночастинок на трибологічні характеристики оливо. У роботі відзначено, що використання нанодобавок до мастильних матеріалів призводить до підвищення в'язкості базового середовища, високої несучої здатності сполучення, зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості.

В роботі [5] показано, що ефект введення вуглецевих наночастинок в пластичні мастила істотно залежить від типу мастила, і може як покращувати, так і погіршувати трибологічні показники мастил. У той же час на всіх досліджених типах мастил при введенні вуглецевих наночастинок отримано збільшення навантаження задира, незалежно від типу мастила-бази.

Авторами роботи [6] робиться висновок про перспективність використання наноматеріалів в мастильних матеріалах. Робота містить висновки, що характеристики мастильного матеріалу можна покращити застосуванням нанопридадків. Робота присвячена інформаційному огляду застосування нанодобавок до рідких мастильних матеріалів і перспективам їх використання при виробництві оливи.

Деякі важливі аспекти використання наночастинок наведені в роботі [7]. При модифікації мастильних матеріалів автори враховують такі чинники: розмір наночастинок, форму, структуру, модифікацію поверхні тертя, концентрацію частинок, фізичні і хімічні властивості поверхонь тертя. Було відмічено, що при додаванні нанодобавок до мастильних матеріалів, навіть при низьких концентраціях, значно знизилася коефіцієнти тертя і швидкість зношування. Крім того, вуглецеві нанотрубки і графен екологічно чисті і безпечні матеріали. На підставі проведених досліджень автори позитивно оцінюють перспективи використання зазначених наноматеріалів для модифікації мастильних матеріалів.

У роботах [8, 9] були виконані дослідження фулеренів високого ступеня очищення після їх додавання в базову оливу. Дослідження виконувалися на чотирьохкульовій машині тертя. Результати показали, що застосування фулеренів зменшує діаметр плями зносу. На поверхні тертя спостерігалася наявність плівки. Автори роботи рекомендують такі мастильні матеріали для підшипників ковзання, а також для твердих мастильних матеріалів. При цьому концентрації добавок в базовій оливі варіювали в інтервалі 0,5-2,0 мас. %.

Авторами роботи [10] досліджувалися як тверді мастильні матеріали з фулереновими добавками, включаючи графен (G), фулерен (C60) і вуглецеві нанотрубки (CNT), так і рідкі мастильні матеріали. Автори відзначають, що такі мастильні композиції викликають величезний інтерес завдяки своїм чудовим трибологічним характеристикам. У порівнянні з базовою оливою застосування фулеренів призводить до зниження коефіцієнта тертя на 90%, що забезпечує найкращі антифрикційні властивості. Автори висувують припущення, що на поверхні тертя утворюється блокова фізична захисна плівка, яка значно згладжує поверхню тертя.

Значне зниження коефіцієнта тертя в порівнянні зі швидкістю зношування відзначається в роботах [3, 11]. Досліджувалася малов'язка компресорна олива з додаванням фулеренів 0,1% об. В результаті коефіцієнт тертя зменшився на 90%, в порівнянні з базовою оливою. Перспективність застосування фулеренів в багатьох технічних областях відзначається в роботах [12-16].

Авторами роботи [17] експериментально встановлено, що шлях поліпшення трибологічних властивостей мастильних матеріалів введенням дрібнодисперсного порошку фулеренів в базові технічні оливи малоефективний. У вказаній роботі запропоновано варіант попереднього диспергування фулеренів в рослинних високоолеїнових оліях, наприклад ріпакової, а потім додавання даної композиції в технічні оливи. В роботі наведені експериментальні дослідження зі зміни коефіцієнта тертя, який зменшується на 86%.

Відповідно до висновків роботи [17] агрегати дисперсної фази, об'єднані зовнішніми електростатичними силами в суцільну сітку (каркас) на поверхні тертя, набувають властивостей "твердого тіла". Незначне зовнішнє навантаження утворює пружну деформацію каркасу. При досить високому навантаженні, каркас руйнується, а окремі агрегати роз'єднуються.

Виконаний аналіз літературних джерел по перспективам використання фулеренів, як добавок до мастильних матеріалів, дозволяє висунути робочу гіпотезу про формування на поверхні тертя "зшитий" структури з агрегатів, що містять молекули

фулеренів. Такі структури беруть участь в релаксації напружень на плямах фактичного контакту при роботі трибосистеми, тим самим знижують швидкість зношування і коефіцієнт тертя.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підтвердити робочу гіпотезу про формування на поверхні тертя "зшитих просторових структур", які створюються за рахунок утворення і взаємодії між собою кластерів і міцел в полі дії електростатичних сил поверхонь тертя.

**Виклад основного матеріалу.** Мікроструктурний та хімічний аналіз поверхонь тертя проводили для конструкції трибосистеми: "сталь 40X + Бр.АЖ 9-4"; площа тертя рухомого трибоелемента  $F_{тр,р}=0,0003 \text{ м}^2$ , нерухомого  $F_{тр,н}=0,00015 \text{ м}^2$ ; навантаження на трибосистему  $N = 1000 \text{ Н}$ ; швидкість ковзання  $v_{ков} = 0,5 \text{ м/с}$ ; базова олива М-10Г<sub>2к</sub> ( $E_y=3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$ ); концентрація фулеренової композиції 100 г/кг [17]. Отримані результати порівнювали з поверхнями тертя аналогічної трибосистеми, де в моторній оливі не застосовувалася фулеренова композиція. Аналізу підлягали поверхні тертя сталевих та бронзових трибоелементів.

Шорсткість і профіль поверхні зразків визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідно стандартам ISO 4287-1997. Шорсткість оцінювали середнім арифметичним відхиленням точок профілю  $Ra$ , розмірність мкм, та середнім кроком нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ , розмірність, мм. Похибка вимірювання  $Ra$  та  $Sm$  не перевищувала 10%, відтворюваність становила  $\leq 5 \%$ .

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя представлено в таблиці 1 та таблиці 2.

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Товщина мастильної плівки  $h$  залежить від великої кількості робочих, технологічних і конструктивних параметрів, які перераховані в роботі [18]. В кінцевому рахунку  $h$  впливає на величину робочої шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  за рахунок утворення "зшитих структур" з міцел і кластерів, які утримуються на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Такі структури "вирівнюють" поверхні тертя зменшуючи  $Ra$  і збільшуючи  $Sm$ .

Таблиця 1 – Середні значення мікрошорсткості бронзового зразка Бр.АЖ 9-4, після випробувань в моторній оливі та в моторній оливі з фулереновою композицією

Умови вимірювання	Моторна олива	Моторна олива з фулереновою композицією 100 гр/кг
Параметри	Величина	Величина
Мінімум профілю, мкм	0,205	0,18
Максимум профілю, мкм	0,227	0,190
$Ra$ , мкм	0,2	0,166
$Rmax$ , мкм	0,23	0,19
$Sm$ , мм	0,42	0,54

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 – Середні значення мікросорсткості сталевого зразка сталь 40X, після випробувань в моторній оливі та в моторній оливі з фулереновою композицією

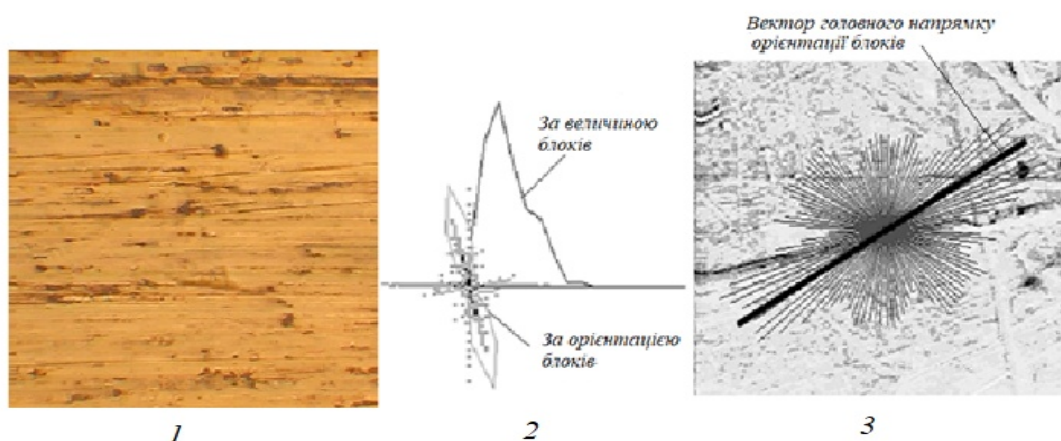
Умови вимірювання	Моторна олива	Моторна олива з фулереновою композицією 100 гр/кг
Параметри	Величина	Величина
Мінімум профілю, мкм	0,276	0,211
Максимум профілю, мкм	0,298	0,262
$Ra$ , мкм	0,23	0,195
$Rmax$ , мкм	0,27	0,21
$Sm$ , мм	0,40	0,50

Джерело: розроблено автором

Середнє арифметичне відхилення точок профілю  $Ra$ , розмірність мкм, при застосуванні фулеренових композицій, зменшується для бронзової поверхні тертя з величини  $Ra=0,2$  мкм, до величини  $Ra=0,166$  мкм, тобто на 17 %, похибка вимірювань 4,2 %. Для сталевий поверхні тертя з величини  $Ra=0,23$  мкм, до величини  $Ra=0,195$  мкм, тобто на 16 %, похибка вимірювань 5,4 %.

Середній крок нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ , розмірність, мм; при застосуванні фулеренових композицій, збільшується для бронзової поверхні тертя з величини  $Sm =0,42$  мм, до величини  $Sm =0,54$  мм, тобто на 28,5 %, похибка вимірювань 4,8 %. Для сталевий поверхні тертя з величини  $Sm =0,40$  мм, до величини  $Sm =0,50$  мм, тобто на 25 %, похибка вимірювань 5,8 %.

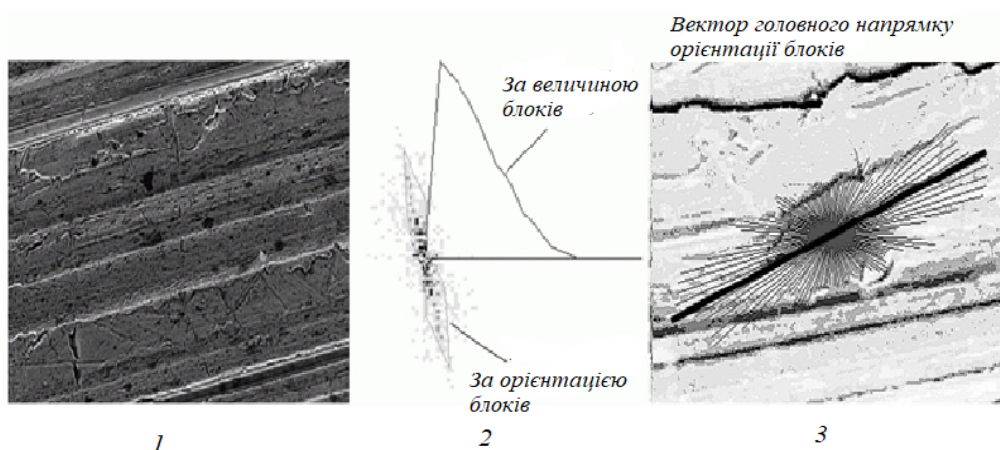
Результат проведеного Фур'є-аналізу, рис.1 – рис.4. дозволяють зробити наступні висновки, що застосування фулеренової композиції в мастильному матеріалі призводить до зниження головного вектора напруження як в сталевому, так і в бронзовому трибоелементах відповідно до вектора напрямку ковзання. При застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації.



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія); 3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 1 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя бронзового трибоелемента без застосування фулеренової композиції

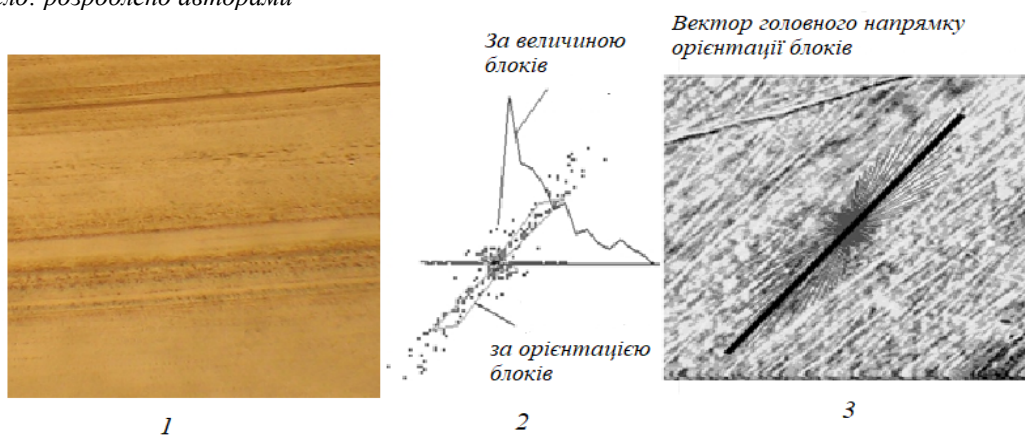
Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 2 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя сталевого трибоелемента без застосування фулеренової композиції

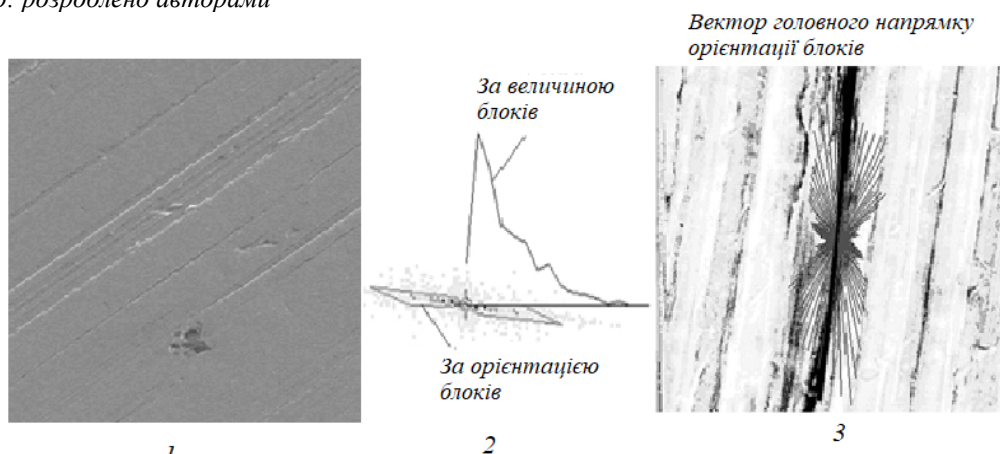
Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 3 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя бронзового трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції

Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 4 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя сталевого трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції

Джерело: розроблено авторами

Наступним кроком металографічних досліджень стало проведення хімічного аналізу сервовитної плівки, яка утворилася в результаті взаємодії електростатичного поля поверхонь тертя та кластерами і міцелами змащувального середовища з фулереновими композиціями.

Хімічний аналіз поверхонь тертя проводили на комплексі РЕММА 106И. Досліджувались дві пари зразків трибосистеми сталь 40X + Бр. Аж 9-4. На одній парі поверхонь тертя (сталевий та бронзовий трибоелементи), була сформована структура поверхневих шарів при роботі трибосистеми в мастильному середовищі М-10Г<sub>2к</sub> без фулеренової композиції. На другий парі поверхонь тертя була сформована структура поверхневих шарів при роботі трибосистеми в мастильному середовищі М-10Г<sub>2к</sub> при наявності фулеренової композиції концентрації 100 г/кг.

Провівши хімічний аналіз було встановлено, що на поверхні тертя бронзового трибоелемента без застосування фулеренової композиції, рис. 1, присутні такі хімічні елементи: Al = 10,2 %; Fe = 3,8 %; Cu = 72,55 %; O<sub>2</sub> = 12,3 %; Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %; C = 0,4 %. Процентне співвідношення хімічних елементів пояснюється наступним чином. Оскільки основу поверхні тертя становить бронза, то звичайно присутність Cu = 72,55 % і Fe = 3,8 % є цілком природна, а оскільки до моторної оливи входить комплексна присадка, то на поверхні тертя присутні Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %. Малий процентний вміст вуглецю, C = 0,4 % і великий вміст кисню, O<sub>2</sub> = 12,3 %, що цілком природно та відповідає результатам досліджень інших дослідників.

На поверхні тертя сталевого трибоелемента без застосування фулеренової композиції, рис. 2, присутні такі хімічні елементи: Fe = 77,55 %; Cu = 0,3 %; O<sub>2</sub> = 18,4 %; Cr = 1,0 %; Mn = 0,8 %; Si = 0,5 %; Cl = 0,4 %; Ni = 0,3 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %; C = 0,4 %. Процентне співвідношення хімічних елементів пояснюється таким чином. Оскільки основу поверхні тертя становить залізо, то звичайно присутність Fe = 77,55 %; і Cr = 1,0 %; є цілком природна. Наявність інших хімічних елементів пояснюється комплексною присадкою в моторній оливі. Тому на поверхні тертя присутні Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %. Малий процентний вміст вуглецю, C = 0,4 % і великий вміст кисню, O<sub>2</sub> = 18,4 %.

Хімічний аналіз поверхні тертя бронзового трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції, рис. 3, суттєво відрізняється. На поверхні тертя значно збільшується присутність вуглецю: C = 29,2 %. Одночасно зменшується наявність кисню O<sub>2</sub> = 9,1 %. Останні хімічні елементи майже залишаються не змінними. Такий результат дозволяє зробити висновок, що на поверхні тертя сформовано структуру, у складі якої присутній хімічний елемент вуглець, співвідношення якого значно перевищує інші хімічні елементи.

Аналогічні висновки можна зробити по результатам хімічного аналізу поверхні тертя сталевого трибоелементу, рис. 4. На поверхні тертя значно збільшується присутність вуглецю: C = 24,3 %. Одночасно зменшується наявність кисню O<sub>2</sub> = 7,4 %. Останні хімічні елементи майже залишаються не змінними. Такий результат дозволяє зробити висновок, що на поверхні тертя сталевого трибоелементу сформовано структуру, у складі якої присутній хімічний елемент вуглець.

**Обговорення результатів досліджень.** Як впливає з отриманих результатів, застосування фулеренових композицій в складі розчинників в базових мастильних рідких матеріалах буде зменшувати *Ra* і збільшувати *Sm*, що спричинить збільшення діаметра фактичної плями контакту сполучених поверхонь тертя і зниження напружень на фактичній плямі контакту. Зміна вказаних параметрів позитивно впливає на зміну величини об'ємної швидкості зношування, та коефіцієнт тертя, зменшуючи ці показники.

Провівши хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції встановлено, що на поверхні тертя присутня структура з великим вмістом вуглецю. Можна зробити припущення, що це є "зшита" структура, де ядром міцели виступає молекула, або декілька молекул фулерену, до яких приєднані молекули олеїнової кислоти розчинника. Така структура утримується на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Наявність таких сил пояснюється значно більшим дипольним моментом у сформованих міцел. Такий висновок підтверджується збільшенням процентного вмісту вуглецю  $C = 24,3...29,2$  %, при одночасному зменшенні процентного вмісту кисню з  $18,4$  % до  $7,4$  %. На основі проведених досліджень можна стверджувати, що формування зшитих структур призводить до зниження втрат на тертя, а зменшення окислювальної здатності поверхонь тертя – до зменшення швидкості зношування.

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями встановлено, що параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Товщина мастильної плівки впливає на величину робочої шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  за рахунок утворення "зшитих структур" з міцел і кластерів, які утримуються на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Такі структури "вирівнюють" поверхні тертя зменшуючи середнє арифметичне відхилення точок профілю  $Ra$  і збільшуючи середній крок нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ .

Результат проведеного Фур'є-аналізу дозволяє стверджувати, що застосування фулеренової композиції в мастильному матеріалі призводить до зниження головного вектора напруження як в сталевому, так і в бронзовому трибоелементах відповідно до вектора напруження ковзання. При застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації.

Провівши хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції встановлено, що на поверхні тертя присутня структура з великим вмістом вуглецю. Такий результат підтверджує робочу гіпотезу, що це є "зшита" структура з міцел, де ядром міцели виступає молекула, або декілька молекул фулерену, до яких приєднані молекули олеїнової кислоти розчинника. Така структура утримується на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Наявність таких сил пояснюється значно більшим дипольним моментом у сформованих міцел. Такий висновок підтверджується збільшенням процентного вмісту вуглецю з  $C = 0,4$  % до  $C = 24,3...29,2$  %, при одночасному зменшенні процентного вмісту кисню з  $18,4$  % до  $7,4$  %.

## Список літератури

1. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2014. 369 с.
2. Триботехнология восстановления деталей мобильной с.-х. и транспортной техники модификацией моторного масла фуллеренсодержащим составом / Аулин В.В., Деркач А.Д., Буря А.И. и др. *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. № 4. С. 26-29.
3. Аулін В.В., Деркач О.Д., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Вплив фулереновмісних оливок на фізико-механічні властивості поверхні тертя спряжень деталей. *Проблеми трибології*. 2018. №4. С. 60-64.
4. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // *Materials today: proceedings*, 2020, Volume 25, Part 4, pages 586-591 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>
5. Mungse H.P., Khatri O.P. Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel Material for Reduction of Friction and Wear // *Phys. Chem. C*, 2014, 118 (26), p. 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614.

6. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, V. 41, Issue 4, p. 3153-3170 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040>
7. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers // *Journal of Molecular Liquids*. 2019, V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
8. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, et al. Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters*. 2007, V. 62, Issue 16, p. 2524-2527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>
9. Rapoport L., Feldman Y., Homyonfer M., et al. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure-function relationship // *Wear*. 1999. V. 225-229, Part 2, p. 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)
10. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings*. 2020. Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>
11. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon*. 2019. V. 150, p. 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>
12. Jaekeun Lee, Sangwon Cho, Yujin Hwang et al. Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces // *Tribology International*. 2009. V. 42. Issue 3, p. 440-447.
13. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 2019. V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
14. Аулін В., Бабак Р., Забазний О. Механізм утворення вакансій, дислокацій та руйнування залізо-вуглецевих сплавів на основі фулеренової моделі вуглецю. *Наука виробництва-2004*: зб. наук. праць за матеріалами доповідей XXXVIII наук. конф. студентів, магістрантів та аспірантів. Кіровоград: КНТУ, 2004. С. 104-105.
15. Аулін В.В., Барановський Д.М. Отримання фулеренів в зоні лазерного опромінення графіту. *Наука виробництва-2004*. Зб. наук. праць за матеріалами доповідей XXXVIII наук. конф. студентів, магістрантів та аспірантів. Кіровоград: КНТУ, 2004. С. 119-121.
16. Аулін В.В., Кропівний В.М., Кузик О.В., Кропівна А.В. Вплив зміни концентрації фулеренів у залізівуглецевих матеріалах при хіміко-термічній обробці на рівень надійності деталей. *Крамаровські читання*. Зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції, 21-22 лют. 2019 р., м. Київ / НУБіП. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. – С. 192-195.
17. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant // *FRICITION AND WEAR*, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197
18. Kravtsov A., Gradiskiy Y., Tsymbal B., Borak K. Simulation of the oil film thickness on a friction surface in the presence of fullerene compositions in the lubricant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1021(1), 012040. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012040

## References

1. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh* [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems]. Kirovohrad: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Derkach, A.D., Burya, A.I. et al. (2014). Tribotehnologiya vosstanovleniya detaley mobilnoy s.-h. i transportnoy tehniky modifikatsiey motornogo masla fullerensoderzhaschim sostavom [Tribotechnology for restoring parts of a mobile agricultural and transport equipment by modifying the motor oil with a fullerene-containing composition]. *Traktory i selhozmashiny - Tractors and agricultural machinery*. № 4. 26-29 [in Russian].
3. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv fullerenovmisnykh olyv na fizyko-mekhanichni vlastyosti poverkhni tertia spriazhen detalei [Influence of fullerene-containing oils on physical and mechanical properties of the friction surface of conjugations of parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology*. №4. 60-64 [in Ukrainian].
4. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials today: proceedings*. 25 (4), 586-591. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245> [in English].
5. Mungse, H.P., Khatri, O.P. (2014). Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel



- Material for Reduction of Friction and Wear. *Phys. Chem. C.* 118 (26). 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614 [in English].
6. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid. (2015). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy.* 41 (4). 3153-3170. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040> [in English].
  7. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids.* 279. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113> [in English].
  8. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, et al. (2007). Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters.* 62 (16). 2524-2527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056> [in English].
  9. Rapoport L., Feldman Y., Homyonfer M., et al. (1999). Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. *Wear.* 225–229 (2). 975-982. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X) [in English].
  10. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. (2020). The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil. *Materials today: proceedings*, Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447> [in English].
  11. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. (2019). Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface. *Carbon*, 150, 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050> [in English].
  12. Jaekeun Lee, Sangwon Cho, Yujin Hwang et al. (2009). Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces. *Tribology International.* 42 (3), 440-447. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.003> [in English].
  13. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, et al. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers, *Journal of Molecular Liquids.* 279. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113> [in English].
  14. Aulin, V., Babak, R. & Zabaznyi, O. (2004). Mekhanizm utvorennia vakansii, dyslokatsii ta ruinuvannia zalizo-vuhletsevykh splaviv na osnovi fulerenovoi modeli vuhletsiu [Mechanism of establishing vacancies, dislocation and formation of hard-carbon alloys on the basis of fullerene model in carbon]. *Science virobnistvu-2004: Zb. nauk. prats za materialamy dopovidei XXXVIII nauk. konf. studentiv, mahistrantiv ta aspirantiv - Zb. sciences. Prats for materials of additional studies of XXXVIII sciences. conf. students, masters and postgraduates.* Kirovohrad: KNTU, S. 104-105 [in Ukrainian].
  15. Aulin, V.V. & Baranovskyi, D.M. (2004). Otrymannia fulereniv v zoni lazernoho oprominennia hrafitu. [Otrivation of fullerenes in the zone of laser optimization of graphite]. *Science virobnistvu-2004: Zb. nauk. prats za materialamy dopovidei XXXVIII nauk. konf. studentiv, mahistrantiv ta aspirantiv - Zb. sciences. Prats for materials of additional studies of XXXVIII sciences. conf. students, masters and postgraduates.* Kirovohrad: KNTU, S. 119-121 [in Ukrainian].
  16. Aulin, V.V., Kropivnyi V.M., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. (2019). Vplyv zminy kontsentratsii fulereniv u zalizovuhletsevykh materialakh pry khimiko-termichnii obrobtii na riven nadiinosti detalei [The effect of changes in the concentration of fullerenes in ferroc carbon materials during chemical heat treatment on the level of reliability of parts]. *Kramarovski chytannia. Zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii - Coll. abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference.* K.: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 2019. S. 192-195 [in Ukrainian].
  17. Vojtov, V. A., Kravcov, A. G., & Tsymbal, B. M. (2020). Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *FRICITION AND WEAR.* 41(6). 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197 [in English].
  18. Kravtsov A., Gradiskiy Y., Tsymbal B., Borak K. (2021). Simulation of the oil film thickness on a friction surface in the presence of fullerene compositions in the lubricant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 1021(1). 012040. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012040 [in English].

**Andrii Kravtsov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine*

### **Investigation of the Structure of a Servotic Film on the Surface of Friction with Fullerene Compositions**

The paper presents the experimental results of the study of friction surfaces without the use and when using a fullerene composition in a lubricant. It is shown that the parameters of the microrelief profile and the roughness of the friction surfaces after application of the fullerene composition in the lubricant differ significantly. The thickness of the lubricating film affects the amount of working roughness  $Ra$  and  $Sm$  due to the formation of "cross-linked structures" of micelles and clusters, which are held on the friction surface by

electrostatic interaction. Such structures "align" the friction surface by reducing the arithmetic mean deviation of the profile points  $Ra$  and increasing the average pitch of the inequalities along the midline of the profile  $Sm$ .

The results of the Fourier analysis, which allow us to state that the use of a fullerene composition leads to a decrease in the main stress vector in both steel and bronze triboelements in accordance with the vector of the sliding direction. When using the fullerene composition, the level of anisotropy of the subblocks of the structure increases significantly, almost 2 times, which indicates the transition of the tribosystem to a new, higher level of self-organization.

After chemical analysis of the friction surfaces using a fullerene composition, it was found that on the friction surface there is a structure with a high carbon content. This result confirms the working hypothesis that it is a "crosslinked" structure of micelles, where the nucleus of the micelle is a molecule, or several molecules of fullerene, to which are attached molecules of oleic acid solvent. This conclusion is confirmed by the increase in the percentage of carbon  $C = 24,3...29,2$  %, while reducing the percentage of oxygen from 18,4 % to 7,4 %. The latter chemical elements remain almost unchanged. This result allows us to conclude that a structure is formed on the friction surface, which contains the chemical element carbon, the ratio of which significantly exceeds other chemical elements..

**tribosystem, servite film, fullerene compositions, clusters, micelles, Fourier analysis, stress vector, chemical analysis of friction surfaces**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**UDC 62-82:631.3:621.659**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).33-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).33-43)

**Serhiy Shargorodskiy**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Volodymyr Rutkevych**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Vadym Zakrevskiy**, assistant

*Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine*

*e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, v\_rut@ukr.net, vadimzakreva@gmail.com*

## Modeling of Working Processes of an Adjustable APN Type PVC 1.85 Taking Into Account Parametric Oscillations

The paper presents the calculation results of the two mathematical models of the variable displacement axial piston pumps PVC 1.85. In the first mathematical model of the pistons averaged force was used, the application point of which corresponds to the offset of the swash plate's swivel axis. In the second mathematical model the parametric change of the pistons consolidated force magnitude and the coordinates of its application point was taken into account.

**variable displacement axial piston pump, flow rate characteristics, the swash plate swivel axis, moment of pistons consolidated force, pressure pulsation**

**Statement of the problem.** Energy saving and the increasing of the economic efficiency are the fundamental trends in the development of modern multipurpose mobile machines, including agricultural, constructional, road-building, etc. This is done with the help of energy supply activation to the working parts' driving units, productivity and operating speeds enhancement, extension of machines' technological capabilities, minimization of the number and the power of the drive engines. These tasks are most efficiently solved by using hydraulic power for the operating units' drives [1].