

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15235

В. А. ВОЙТОВ, А. Г. КРАВЦОВ, А. В. ВОЙТОВ

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

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В МАСТИЛЬНІЙ ПЛІВЦІ НА ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ФУЛЕРЕНІВ В МАСТИЛЬНОМУ МАТЕРІАЛІ

В роботі представлені результати теоретичних досліджень по формуванню мастильної плівки на поверхні тертя при наявності фулеренів в змащувальному матеріалі. На основі аналізу літературних джерел доведено, що поверхня тертя, яка в процесі роботи трибосистеми є «генератором електростатичного поля», спонукає до зміни структурної в'язкості мастильної плівки. Збільшення швидкості роботи дисипації в трибосистемі призводить до збільшення величини електростатичного поля поверхні тертя, яке сприяє формуванню зміцел фулеренів каркаса. Наведено результати моделювання зміни величин часу життя фактичної плями контакту, а також часу релаксації напружень на фактичній плямі контакту при наявності на поверхні тертя мастильної плівки, що має структуру гелю. Виконано параметричну ідентифікацію макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на фактичних плямах контакту. Отримано теоретичні залежності зміни часу життя фактичної плями контакту та часу релаксації напружень від величин швидкості роботи дисипації і концентрації фулеренової композиції. Доведено, що величина часу релаксації, є мірою переходу в'язких властивостей структури мастильної плівки в пружні властивості і, навпаки, пружних у в'язкі. Показано, що рушійною силою переходу є швидкість роботи дисипації в трибосистемі, яку можна назвати енергією накачування.

Результати моделювання зазначених параметрів дозволяють стверджувати про існування значень швидкості роботи дисипації, при досягненні яких на поверхні тертя починає формуватися структура гелю (структура у вигляді каркасу), яка сприймає навантаження як тверде тіло. При малих значеннях швидкості роботи дисипації енергії накачування недостатньо для формування структури гелю і мастильна плівка буде мати структуру золю і сприймати навантаження як в'язке тіло.

Ключові слова: макрореологічна модель, реологічні властивості, кластери, міцели, гель, золь, в'язкість рідини, електростатичні сили, фулерени, трибосистема, поверхні тертя, час життя фактичної плями контакту, час релаксації напружень на фактичній плямі контакту

Вступ. Використання добавок фулеренів до технічних рідких мастильних матеріалів ставить ряд питань про їх ефективність, ступень впливу на протизносні і протизадирні властивості. Інтерес до даного явища має як фундаментальний, так і прикладний характер. Важливою особливістю фулеренових добавок стало те, що фулерени добре розчиняються в широкому класі органічних і неорганічних розчинників. При цьому відзначено погана розчинність фулеренів в технічних оливах (мінеральних, напівсинтетичних і синтетичних). Ще одним цікавим явищем, які спостерігаються в розчинах фулерена C_{60} , є процеси утворення і зростання кластерів, які вказують на близькість багатьох розчинів C_{60} до класу колоїдних систем.

Складність експериментальних досліджень впливу фулеренових добавок полягає в тому, що поверхня тертя в процесі роботи трибосистеми під дією пластичної і пружної деформацій шорсткостей і матеріалу поверхневого шару, виступає в якості «генератора електростатичного силового поля», що впливає на впорядкування структури тонкої масляної плівки і визначає її міцність і товщину. Це дозволяє представити процес взаємодії молекул кластерів і міцел, що знаходяться в змащувальному матеріалі, з «енергетично зарядженою» поверхнею тертя.

Електрично активні дисперсні системи з розвиненою питомою поверхнею, до яких відносяться кластери і міцели, є одним з перспективних класів сучасних добавок до мастильних матеріалів, які можуть створювати «розумний мастильний матеріал», здатний реагувати на енергетично заряджену поверхню тертя. Такі добавки найближчим часом будуть застосовуватися при розробці нових мастильних композицій, які реагують на електростатичне поле поверхонь тертя трибосистем.

Аналіз останніх публікацій по даній проблемі. Роботи [1-3] присвячені фулеренам, як добавкам до мастильних матеріалів. Автори відзначають, що використання фулеренів знижує коефіцієнт тертя і підвищує зносостійкість сполучень. В роботі [3] відзначається, що концентрація фулеренової добавки повинна бути в межах 0,5 ... 2,0% мас. В роботі [4] наведено результат використання фулерена C_{60} . Автори відзначають позитивний ефект, проте роблять висновок, що механізм сенергізма фулеренів з базовою оливою неясний і вимагає подальших досліджень. При цьому в роботі відзначено, що зниження коефіцієнта тертя при добавці фулеренів в оливи може досягати 90% в порівнянні з базовою оливою.

Аналіз робіт, присвячених застосуванню фулеренів, як добавок до мастильних матеріалів, дозволяє зробити висновок, що фулерени недиспергують (розчиняються) у всіх технічних оливах [5-7]. Даний висновок підтверджено автором роботи [8]. Введення фулеренових добавок у вигляді дрібнодисперсного порошку в технічні оливи різних класів в'язкості і різних груп експлуатації покращує протизносні властивості оливи, які оцінюються показником зносу на чотирьохкульовій машині тертя (збільшення на 11,1 ... 15%) і критичним навантаженням (збільшення на 11,8 ... 17,4%). На протизадирні властивості базових оливи, які оцінюються навантаженням задира, фулеренові добавки не впливають. Такий результат дозволяє констатувати, що шлях поліпшення трибологічних властивостей мастильних матеріалів шляхом введення дрібнодисперсного порошку фулеренів в базові технічні оливи є малоефективним. Як випливає з наведеного вище аналізу наукових робіт, такий незначний ефект характерний через інтенсивне кластероутворення молекул фулеренів в середовищі технічних оливи, що містять поверхнево-активні речовини.

Автором роботи [9] проведені теоретичні дослідження, які дали змогу розробити макрореологічні моделі у вигляді диференціальних рівнянь другого порядку. Рішення рівнянь дає можливість виконувати моделювання процесу релаксації напружень на плямах фактичного контакту в трибосистемі при наявності фулеренів в тонкій мастильній плівці, адсорбованій за рахунок електростатичних сил на поверхні тертя. Але для проведення моделювання необхідно виконати параметричну ідентифікацію складових, які входять в рішення диференціальних рівнянь. Параметрична ідентифікація дасть змогу визначити величини напружень на плямах фактичного контакту та розрахувати значення швидкості зношування та коефіцієнта тертя трибосистем при наявності фулеренів в змащувальному матеріалі.

Мета дослідження. Метою даної роботи є параметрична ідентифікація макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя трибосистем на плямах фактичного контакту при наявності фулеренових композицій в змащувальному матеріалі.

Методичний підхід в проведенні досліджень. При розробці макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності кластерів і міцел на основі фулеренів, автором роботи [9] прийняті два допущення.

1. Дисперсію кластерів і міцел в об'ємі рідкого мастильного матеріалу поза дією електростатичного поля поверхні тертя приймаємо за структуру золя. В такій структурі напруження сприймаються в'язким рідким середовищем і передаються на пружні агрегати. Такій структурі притаманні в'язко-пружні властивості, схему такої реологічної моделі наведено в роботі [9].

2. Дисперсію кластерів та міцел поряд з поверхнею тертя (в полі дії електростатичних сил), приймаємо за структуру геля, де між міцелами та поверхнею тертя діють сили електростатичної взаємодії, які сприяють утворенню каркасу з агрегатів, порожнини між якими заповнені в'язкою рідиною. Такій структурі притаманні пружно-в'язкі властивості. В такій структурі напруження сприймаються пружними елементами агрегатів і передаються у в'язке рідке середовище, схему такої реологічної моделі наведено в роботі [9].

Завдяки наявності в'язкої рідини між міцелами пружна деформація при навантаженні не виникає миттєво, а протікає з запізненням.

На підставі представлених схем реологічних моделей золя і геля автором роботи [9] наведено рішення диференційних рівнянь.

Рішенням для диференційного рівняння реологічної моделі золя є вираз:

$$\sigma_{\text{фнк}}(t_3) = \sigma_{\text{фнк}} \left(\exp\left(-\frac{t_{\text{ж}}}{T_{\text{рел.з}}}\right) \cdot \cos \Omega_3 \cdot t_{\text{ж}} + A_3 \sin \Omega_3 \cdot t_{\text{ж}} \right), \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{фнк}}(t_3)$ – напруження на фактичній плямі контакту в кінці дії обурюючої сили, Па; $\sigma_{\text{фнк}}$ – напруження на фактичній плямі контакту на початку дії обурюючої сили, Па; $t_{\text{ж}}$ – час життя фактичної плями контакту, с; $T_{\text{рел.з}}$ – час релаксації напружень в структурі золя, с; Ω_3 – частота коливань напружень на фактичній плямі контакту, 1/с; A_3 – діапазон зміни амплітуди коливань напружень від встановленої величини для структури золя.

Рішенням для диференційного рівняння реологічної моделі геля є вираз:

$$\sigma_{\text{фнк}}(t_2) = \sigma_{\text{фнк}} \left(\exp\left(-\frac{t_{\text{ж}}}{T_{\text{рел.г}}}\right) \cdot \cos \Omega_2 \cdot t_{\text{ж}} + A_2 \sin \Omega_2 \cdot t_{\text{ж}} \right), \quad (2)$$

де $\sigma_{\text{фнк}}(t_2)$ – напруження на фактичній плямі контакту в кінці дії обурюючої сили, Па; $T_{\text{рел.г}}$ – час релаксації напружень в структурі геля, с; Ω_2 – частота коливань напружень на фактичній плямі контакту, 1/с; A_2 – діапазон зміни амплітуди коливань напружень від встановленої величини для структури геля.

В виразах для рішення диференційних рівнянь присутня коливальна складова, яка враховує stick-slip-режими, при яких сила тертя змінюється в часі періодично. Врахування таких коливань дозволяє наблизити ідеалізовану математичну модель до експерименту та реальних умов функціонування.

Рішення диференційних рівнянь дає можливість виконувати моделювання процесу релаксації напружень на плямах фактичного контакту в трибосистемах,

що дозволяє підвищити точність розрахункових значень швидкості зношування та втрат на тертя.

Розрахунок величин напружень на фактичній плямі контакту на початку дії обурюючої сили $\sigma_{\text{фнк}}$, Па, виконується за допомогою методики, яку наведено в роботах [10, 11]. Вхідними параметрами для визначення величини напружень є.

1. Технологічні параметри – параметри шорсткості контактуючих поверхонь тертя:

– R_{ap} , R_{an} – середнє арифметичне відхилення точок профілю рухомого і нерухомого трибоелементів, м;

– S_{mp} , S_{mn} – середній крок нерівностей по середній лінії профілю рухомого і нерухомого трибоелементів, м.

Параметри Ra і Sm визначаються згідно ГОСТ 2789-73.

2. Фізико-механічні властивості контактуючих матеріалів в трибосистемі:

– E_p , E_n – модуль пружності матеріалу рухомого і нерухомого трибоелементів, Па;

– ν_p , ν_n – коефіцієнт Пуасона матеріалу рухомого і нерухомого трибоелементів.

3. Конструктивні параметри трибосистеми:

– F_{min} – менша площа тертя одного із трибоелементів, м².

4. Експлуатаційні (робочі) параметри:

– N – навантаження на трибосистему, Н;

– $v_{ков}$ – швидкість ковзання, м/с.

Наступним етапом досліджень є визначення параметрів, які входять в рішення диференціальних рівнянь (1) та (2). Такий етап в теорії ідентифікації динамічних об'єктів називається параметричною ідентифікацією математичної моделі. Останнє означає, що вирази для визначення параметрів процесу повинні бути отримані із мікрореологічної моделі релаксації напружень на фактичній плямі контакту при наявності фулеренів в тонкій мастильній плівці, адсорбованій на поверхні тертя.

Результати досліджень. Час існування фактичної плями контакту, який отримав назву час життя фактичної плями контакту – $t_{ж}$, також залежить від перерахованих вище параметрів і визначається за наступними виразами:

– для структури золя:

$$t_{ж,з} = \frac{d_{\text{фнк},з}}{v_{\text{ков}}}, \text{ с}, \quad (3)$$

– для структури геля:

$$t_{ж,г} = \frac{d_{\text{фнк},г}}{v_{\text{ков}}}, \text{ с}, \quad (4)$$

де $d_{\text{фнк},з}$ і $d_{\text{фнк},г}$ – діаметр фактичної плями контакту при наявності в змащувальному матеріалі структури золя и геля відповідно, розраховується за допомогою методики, яку наведено в роботах [10; 11], розмірність м;

На підставі отриманих формул і висновків роботи [12], можна записати вирази для визначення часу релаксації напружень в структурі золя $T_{\text{рел},з}$ і в структурі геля $T_{\text{рел},г}$:

$$T_{\text{рел},3} = \frac{\mu_3}{G_{\text{нр},3}}, \text{ с}, \quad (5)$$

$$T_{\text{рел},2} = \frac{\mu_2}{G_{\text{нр},2}}, \text{ с}, \quad (6)$$

де μ_3 та μ_2 – динамічна структурна в'язкість золя і геля відповідно, Па·с;

$G_{\text{нр},3}$ та $G_{\text{нр},2}$ – приведений модуль зсуву мастильного матеріалу в зоні дії електростатичних сил поверхні тертя, якій має структуру золя і геля відповідно, Па.

Методика розрахунку величин динамічної структурної в'язкості і модуля зсуву мастильних матеріалів, що містять фулеренові композиції різних концентрацій, буде приведена в наступних наших публікаціях.

Обговоримо фізичний зміст величин на прикладі переходу в'язких властивостей в пружні і навпаки, пружних властивостей в в'язкі. Згідно з методикою, викладеною в роботі [12] для реологічних моделей золю і гелю, в результаті складання швидкостей деформації, можна записати реологічне рівняння:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_{\text{фнк}}}{2G} + \frac{\sigma_{\text{фнк}}}{2\mu}, \quad (7)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації матеріалу на плямах фактичного контакту, розмірність 1/с.

$\dot{\sigma}_{\text{фнк}}$ – швидкість зміни напружень на плямах фактичного контакту, розмірність Па/с.

Використовуючи роботу [12] вираз (7) можна записати у вигляді:

$$2\varepsilon = \frac{(\sigma_{\text{фнк}} + \frac{1}{T_{\text{рел}}} \int \sigma_{\text{фнк}} dt)}{G}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{фнк}} = 2\mu\dot{\varepsilon} - \dot{\sigma}_{\text{фнк}} T_{\text{рел}}, \quad (9)$$

де ε – деформація матеріалу на плямах фактичного контакту.

З аналізу рівнянь (8) и (9) слідує.

1. Якщо час релаксації напружень набагато більше часу життя фактичної плями контакту, протягом якого ці напруження існують:

$$T_{\text{рел}} \gg t_{\text{ж}}, \quad (10)$$

то:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\text{фнк}}}{2G}. \quad (11)$$

Отже, така структура сприймає напруження як тверде пружне тіло.

2. Якщо час релаксації менше часу життя фактичної плями контакту:

$$T_{\text{рел}} \ll t_{\text{ж}}, \quad (12)$$

то:

$$\sigma_{\text{фнк}} = 2\mu\dot{\varepsilon}. \quad (13)$$

Отже, така структура сприймає напруження як в'язка рідина.

Результати моделювання зміни величин часу життя фактичної плями контакту $t_{\text{ж}}$, а також часу релаксації напружень на фактичній плямі контакту $T_{\text{рел}}$, при

наявності на поверхні тертя мастильної плівки, що має структуру гелю, представлені на рис.1.

Як об'єкти моделювання було обрано такі матеріали: рухомий трибоелемент – сталь 40X, HRC 55 ... 58, (аналоги 5135 і 5140 США). Нерухомий трибоелемент – бронза Бр.АЖ 9-4, HB 110, (аналог С61900 США). В якості базового мастильного середовища застосовувалася моторна олива М-10Г_{2к} (мінеральна олива, по в'язкості відповідає SAE 30, за експлуатаційними характеристиками API CC, аналог оливи: ROTELLA SX 30 SHELL). Трибологічні властивості моторної оливи М-10Г_{2к} наведені в роботі [8]. Схема випробувань «кільце-кільце», $K_{63} = 0,5$. Навантаження $N = 500 \dots 1500$ Н; швидкість ковзання $v_{\text{ков}} = 0,2 \dots 0,8$ м / с. Шорсткість поверхонь тертя рухомих і нерухомих трибоелементів: $R_a = 0,2$ мкм; $S_m = 0,4$ мм.

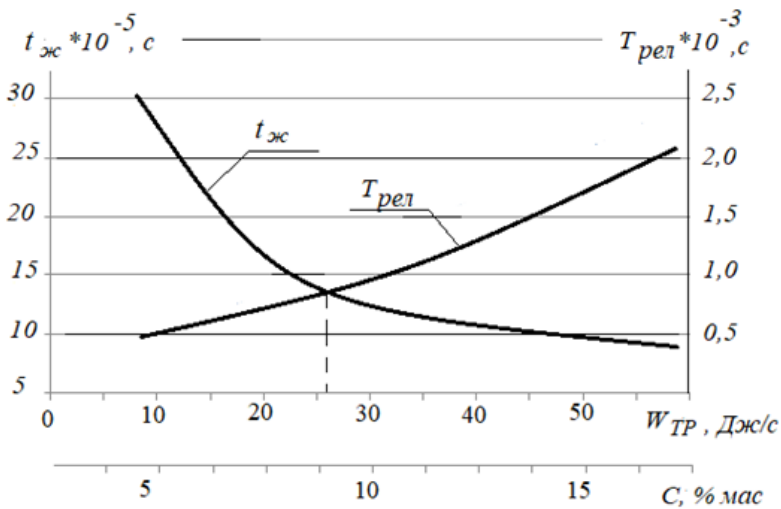


Рис. 1. Залежності зміни часу життя фактичного плями контакту і часу релаксації напружень на фактичній плямі контакту від величин швидкості роботи дисипації в трибосистемі і концентрації фулеренової композиції в базовому змащувальному матеріалі

Наведені вихідні дані дозволили, згідно методики викладеної в роботах [10; 11], розрахувати швидкість роботи дисипації в трибосистемі при зміні навантаження і швидкості ковзання за виразом:

$$W_{\text{ГР}} = \sigma_{\text{фнк}} \cdot \dot{\varepsilon} \cdot V_{\text{д}} \cdot n, \text{ Дж/с}, \quad (14)$$

де $V_{\text{д}}$ – обсяг матеріалу одиначної фактичної плями контакту, який бере участь в деформації, м³; n – кількість плям контакту на поверхні тертя.

Як впливає з рис.1, при збільшенні навантаження і швидкості ковзання одночасно, час життя фактичної плями контакту зменшується. Це можна пояснити наступним чином. При збільшенні навантаження спостерігається незначне збільшення діаметра плями контакту, в більшій мірі зростає кількість плям. Однак зростання швидкості ковзання, в 4 рази, випереджає збільшення діаметра і кількості плям одночасно. У підсумку, при збільшенні навантажувально-швидкісного діапазону роботи трибосистеми, який викликає збільшення швидкості роботи дисипації, спостерігається зменшення часу життя фактичного плями контакту.

Наявність у поверхні тертя, яка в процесі роботи трибосистеми є «генератором електростатичного поля», кластерів і міцел на основі фулеренів, призводить до зміни структурної в'язкості. Збільшення швидкості роботи дисипації в трибосистемі призводить до збільшення величини електростатичного поля поверхні тертя, яке сприяє формуванню з міцел фулеренів каркаса, така структура сприймає навантаження як тверде тіло. Отже, зі збільшенням структурної в'язкості, формула (6), збільшується час релаксації напружень, що і відображено на рис. 1. Крива побудована для наступних концентрацій: 5% мас = 0,5 г фулеренів і 49,5 г рослинної ріпакової олеїнової олії; 10% мас = 0,75 г фулеренів і 99,25 г рослинної ріпакової олеїнової олії; 15% мас = 1,0 г фулеренів і 149,0 г рослинної ріпакової олеїнової олії. Перераховані добавки вводили в один літр базової моторної оливи M-10Г_{2к}.

Обговорення результатів досліджень. На підставі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що величина часу релаксації є мірою переходу в'язких властивостей структури мастильної плівки в пружні властивості і, навпаки, пружних в в'язкі. Рушійною силою переходу є швидкість роботи дисипації в трибосистемі, яку можна назвати енергією накачування. Перетин кривих на рис.1 дозволяє стверджувати про існування значень W_{TP} , при досягненні яких на поверхні тертя починає формуватися структура гелю (у вигляді каркаса), яка сприймає навантаження як тверде тіло. Лівіше точки перетину енергії накачування недостатньо для формування структури гелю і мастильна плівка буде мати структуру золю і сприймати навантаження як в'язке тіло.

Змашувальні матеріали, до складу яких входять електрично активні дисперсні системи з розвиненою питомою поверхнею на основі фулеренових композицій, є одним з перспективних класів сучасних добавок до мастильних матеріалів, які можуть створювати «розумний мастильний матеріал», здатний реагувати на енергетично заряджену поверхню тертя.

Висновки. Виконано параметричну ідентифікацію макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя трибосистем на фактичних плямах контакту при наявності фулеренових композицій в змашувальному матеріалі. Доведено, що величина часу релаксації, є мірою переходу в'язких властивостей структури мастильної плівки в пружні властивості і, навпаки, пружних в в'язкі. Показано, що рушійною силою переходу є швидкість роботи дисипації в трибосистемі, яку можна назвати енергією накачування.

Результати моделювання зазначених параметрів дозволяють стверджувати про існування значень W_{TP} , при досягненні яких на поверхні тертя починає формуватися структура гелю (структура у вигляді каркасу), яка сприймає навантаження як тверде тіло. При малих значеннях W_{TP} , енергії накачування недостатньо для формування структури гелю і мастильна плівка буде мати структури золю і сприймати навантаження як в'язке тіло.

Список літератури

1. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, Xiaowei Yang, Bingshe Xu Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters* Volume 62, Issue 16, 2007, Pages 2524-2527 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>

2. L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J. L. Hutchison, R. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship // *Wear* Volumes 225–229, Part 2, 1999, Pages 975–982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)
3. F. A. Yunusov, A. D. Breki, E. S. Vasilyeva, O. V. Tolochko The influence of nanoadditives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings* Available online 14 February 2020 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>
4. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, Kwang-Ryeol Lee, Aiyang Wang Insights into friction dependence of carbon nano particles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon* Volume 150, 2019, Pages 465–474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>
5. Безмельницын В. Н., Елецкий А. В., Окунь М. В. Фуллерены в растворах // *Успехи физических наук*. — 1998, № 11, 1195—1220
6. Гиндзбург Б. М., Байдакова М. В., Киреенко О. Ф. [и др.]. Влияние фуллеренов C₆₀, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов // *Журнал технической физики*. — 2000, № 12, 87—97
6. Яхьяев Н. Я., Бегов Ж. Б., Батырмурзаев Ш. Д. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля // *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*. — 2009, № 1, 47—52
7. Kravcov A.G. Evaluation of tribological characteristics of liquid lubricants with fullerene additives // *Problems of Tribology*, -2020, V. 25, No 3/97, 50-54 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-97-3-50-54>
8. Кравцов А.Г. Розробка макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності фулеренів / А.Г. Кравцов, *Проблеми трибології*. — 2018. — № 4. — С. 36 – 40.
9. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / В. А. Войтов, М.Б. Захарченко // *Проблеми трибології*. — 2015. — №1. — С. 49 – 57.
10. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М.Б. Захарченко // *Проблеми трибології*. — 2015. — №2. — С. 36 – 45.
11. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. // перев. с англ. под ред. Э.И. Григолоука. — М.: Наука, 1965. — 223 с.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2020.

Войтов Віктор Анатолійович – д.т.н., проф., завідувач кафедри транспортних технологій і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, vavoitovva@gmail.com.

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., старший викладач кафедри деревооброблявальних технологій та системотехніки лісового комплексу Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, K1kavoitov@gmail.com.

V. A. VOJTOV, A. G. KRAVTSOV, A. V. VOITOV

SIMULATION OF THE STRESS OF RELAXATION OF STRESSES IN THE LUBRICANT FILM ON THE SURFACE OF FRICTION IN THE PRESENCE OF FULLERENES IN THE LUBRICANT

The paper presents the results of theoretical studies on the formation of a lubricating film on the friction surface in the presence of fullerenes in the lubricant. Based on the analysis of literature sources, it is proved that the friction surface, which in the process of operation of the tribosystem is an "electrostatic field generator", encourages a change in the structural viscosity of the lubricating film. Increasing the rate of dissipation in the tribosystem leads to an increase in the magnitude of the electrostatic field of the friction surface, which promotes the formation of micelles of fullerenes of the framework. The results of modeling the change in the values of the life time of the actual contact spot, as well as the relaxation time of stresses on the actual contact spot in the presence on the friction surface of a lubricating film having a gel structure. Parametric identification of the macro rheological model of stress relaxation in the lubricating film on the actual contact spots is performed. Theoretical dependences of the change in the life time of the actual contact spot and the stress relaxation time on the values of the dissipation rate and the concentration of the fullerene composition are obtained. It is proved that the value of the relaxation time is a measure of the transition of the viscous properties of the structure of the lubricating film into elastic properties and, conversely, elastic into viscous. It is shown that the driving force of the transition is the rate of dissipation in the tribosystem, which can be called the pumping energy.

The results of modeling these parameters allow us to assert the existence of values of the rate of dissipation, at the achievement of which on the friction surface begins to form a gel structure (structure in the form of a framework), which perceives the load as a solid. At small values of the rate of dissipation of the pumping energy is not enough to form the structure of the gel and the lubricating film will have the structure of the sol and perceive the load as a viscous body.

Keywords: macro rheological model, rheological properties, clusters, micelles, gel, sol, fluid viscosity, electrostatic forces, fullerenes, tribosystems, friction surface, the life time of the actual contact spot, stress relaxation time on the actual contact spot

References

1. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, Xiaowei Yang, Bingshe Xu Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters* Volume 62, Issue 16, 2007, Pages 2524-2527 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>.
2. L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J. L. Hutchison, R. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship // *Wear* Volumes 225–229, Part 2, 1999, Pages 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X).
3. F. A. Yunusov, A. D. Breki, E. S. Vasilyeva, O. V. Tolochko The influence of nanoadditives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings* Available online 14 February 2020 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>.
4. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, Kwang-Ryeol Lee, Aiyang Wang Insights into friction dependence of carbon nano particles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon* Volume 150, 2019, Pages 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>.
5. Bezmel'nicyn V. N., Eleckij A. V., Okun' M. V. Fullereny v rastvorah // *Uspehi fizicheskikh nauk.* — 1998, № 11, 1195—1220.
6. Gindzburg B. M., Bajdakova M. V., Kireenko O. F. [i dr.]. Vlijanie fullerenov S60, fullerenovyh sazh i drugih uglerodnyh materialov na granichnoe treni skol'zhenie metallov // *Zhurnal tehnichejskoj fiziki.* — 2000, № 12, 87—97.

6. Jah'jaev N. Ja., Begov Zh. B., Batyrmurzaev Sh. D. Novaja smazohnaja kompozicija dlja modifikacii poverhnostej tribosoprjazhenij sudovogo malorazmernogo dizelja // Vest-nik AGTU. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. — 2009, № 1, 47—52.

7. Kravcov A.G. Evaluation of tribological characteristics of liquid lubricants with fullerene additives // *Problems of Tribology*, -2020, V. 25, No 3/97, 50-54 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-97-3-50-54>

8. Kravtsov A.H. Rozrobka makroreolohichnoi modeli relaksatsii napruzhen v mastyl-nii plivtsi na poverkhni tertia pry naiavnosti fulereniv / A.H. Kravtsov, *Problemy trybologii*. — 2018. — № 4. — S. 36 – 40.

9. Vojtov V. A. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipacii v tribosistemah / V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko // *Problemy trybologii*. — 2015. — №1. — S. 49 – 57.

10. Vojtov V. A. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 2. Rezul'taty modelirovanija / V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko // *Problemy trybologii*. — 2015. — №2. — S. 36 – 45.

11. Rejner M. Reologija / M. Rejner. // perev. s angl. pod red. Je.I. Grigoljuka. — M.: Nauka, 1965. — 223 s.