

**Кравцов А.Г.**Харківський національний технічний університет с/г ім. П. Василенка,  
м. Харків, Україна  
E-mail: kravcov\_84@ukr.net**РОЗРОБКА МАКРОРЕОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ  
РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В МАСТИЛЬНІЙ  
ПЛІВЦІ НА ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ ПРИ  
НАЯВНОСТІ ФУЛЛЕРЕНІВ**

УДК 621.891

DOI:10.31891/2079-1372-2018-90-4-36-40

В статті представлена розробка макрореологічної моделі релаксації напружень на плямах фактичного контакту трибосистеми при наявності фуллеренів в мастильному матеріалі. Макрореологічна модель представлена у вигляді диференціальних рівнянь другого порядку та їх рішень. Сформовано робочу гіпотезу зниження сил тертя в трибосистемах при наявності в мастильному матеріалі дисперсної фази, яка в подальшому буде підтверджена теоретичними моделями та експериментально.

**Ключові слова:** макрореологічна модель, реологічні властивості, кластери, міцели, гель, золь, в'язкість рідини, електростатичні сили, фуллерени, трибосистеми, поверхні тертя, рідкі мастильні матеріали.

**Вступ**

Загальна структурна особливість рідких мастильних матеріалів при наявності в них фуллеренів в якості функціональних добавок полягає в тому, що в об'ємі рідини утворюються кластери та міцели. Утворення кластерів і міцел в мастильному матеріалі залежить безпосередньо від концентрації фуллеренів, які вводяться в мастильний матеріал, та молекул олеїнової кислоти [1].

Проаналізувавши висновки, які представлені авторами в роботі [2], можна стверджувати, що в'язку рідину можливо розглядати як суцільне дисперсійне середовище, а кластери та міцели – як дисперсійну фазу. Молекули фуллеренів взаємодіють між собою і молекулами олеїнової кислоти рослинної олії та утворюють агрегати, а в'язке рідке середовище стає структурованим. Якщо розміри агрегатів змінюються в часі при постійній швидкості течії (ковзання), то така дисперсна система вважається тиксотропною [2].

Автор роботи [3] стверджує, що структуровані рідини утворюють агрегати в 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.

Анізотричні агрегати (циліндри, диски, еліпсоїди) здатні обертатись при зсуві шарів рідини.

На думку автора роботи [4] реологічні властивості суспензій обумовлені величиною об'ємної концентрації дисперсної фази, величиною сил взаємодії між агрегатами і частинками та структурою сформованих агрегатів. До основних факторів, які впливають на процес формування агрегатів, автор відносить броунівський рух частинок, сили тяжіння та відштовхування, які виникають між частинками, гідродинамічну взаємодію між частинками.

На нашу думку, при розгляді процесів тертя та зношування, коли поверхні тертя накопичують електростатичний заряд, необхідно розглядати сили електростатичної взаємодії між агрегатами дисперсної фази та поверхні 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 авторів роботи [2] агрегати дисперсної фази, об'єднані зовнішніми силами (в нашому випадку електростатичними) в суцільну сітку (каркас) на поверхні тертя, набуває властивостей "твердого тіла".

Незначні зовнішні сили утворюють пружну деформацію каркасу. При досить високому напруженні каркас руйнується, а окремі агрегати роз'єднуються. При цьому, на думку авторів роботи [2], окремі агрегати (в нашому випадку молекули фуллеренів) можуть утворювати обертальний рух між поверхнями тертя. При виникненні такого механізму взаємодії в'язкість рідини поступово зменшується [2].

**Мета роботи**

Метою даної роботи є розробка макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя трибосистем при наявності фуллеренів.

### Структура математичної моделі

Викладений вище висновок приймається нами як робоча гіпотеза зниження сил тертя в трибосистемах при наявності в мастильному матеріалі дисперсної фази, яка в подальшому буде підтверджена теоретичними моделями та експериментально.

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 1925р та отримало подальшого розвитку в роботі М. Рейнера [5]. 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.

При розробці макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності кластерів і міцел приймемо два допущення.

1. Дисперсію кластерів і міцел в об'ємі рідкого мастильного матеріалу поза дією електростатичного поля поверхні тертя приймаємо за структуру золя [5]. В такій структурі напруження сприймаються в'язким рідким середовищем і передаються на пружні агрегати. Такій структурі притаманні в'язко-пружні властивості рис. 1, а.

2. Дисперсію кластерів та міцел поряд з поверхнею тертя (в полі дії електростатичних сил), приймаємо за структуру геля [5], 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. Міжміцелярні сили можуть релаксувати, відповідно, структура поводить себе як тіло Максвелла, рис. 1, б [5]. В такій структурі напруження сприймаються пружними елементами агрегатів і передаються у в'язке рідке середовище.

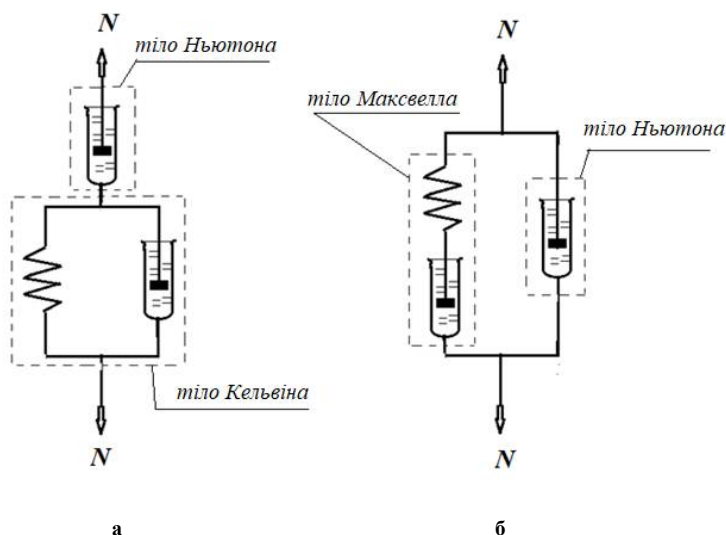


Рис. 1 – Схема моделі в'язко-пружного золя (а), тіло Лесерсіча і пружно-в'язкого геля (б), тіло Джеффіса

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

Схема моделі в'язко-пружного золя (тіло Лесерсіча) представлено на рисунку 1, а. Схема моделі пружно-в'язкого геля (тіло Джеффіса) представлено на рисунку 1, б. Представлена схема запозичена з роботи [5].

На підставі представлених схем реологічних моделей золя і геля з використанням методичного підходу, який викладено в роботі [5], можна записати вираз для реологічних рівнянь.

Реологічні рівняння для структури золя запишемо у вигляді диференціального рівняння другого порядку:

$$\sigma_{фнк} + \dot{\sigma}_{фнк} \cdot T_{рел,з} = 2\mu_3 (\dot{\epsilon}_3 + \ddot{\epsilon}_3 \cdot T_{зан,з}), \quad (1)$$

де  $\sigma_{фнк}$  – напруженість на плямах фактичного контакту, Па;

$T_{рел,з}$  – час релаксації напружень в структурі золя, с;

$\mu_3$  – динамічна структурна в'язкість золя, Па·с;

$\dot{\epsilon}_3$  та  $\ddot{\epsilon}_3$  – швидкість та прискорення деформації структури золя, 1/с и 1/с<sup>2</sup>;

$T_{\text{зап},3}$  – час запізнення деформації в структурі золя, с.

Рішенням для наведеного диференціального рівняння (1) є вираз:

$$\sigma_{\text{фнк},t} = \sigma_{\text{фнк}} \left( \exp\left(-\frac{t_{\text{жс}}}{T_{\text{рел},3}}\right) \cdot \cos \Omega_3 \cdot t_{\text{жс}} + A_3 \sin \Omega_3 \cdot t_{\text{жс}} \right), \quad (2)$$

де  $\sigma_{\text{фнк},t}$  – напруженість на фактичній плямі контакту в кінці дії обурюючої сили, Па;

$\sigma_{\text{фнк}}$  – напруженість на фактичній плямі контакту на початку дії обурюючої сили, Па;

$t_{\text{жс}}$  – час життя фактичної плями контакту, с;

$\Omega_3$  – частота коливань напружень на фактичній плямі контакту, 1/с;

$A_3$  – діапазон зміни амплітуди коливань від встановленої величини для структури золя.

Реологічне рівняння для структури геля запишемо у вигляді:

$$\sigma_{\text{фнк}} + \dot{\sigma}_{\text{фнк}} \cdot T_{\text{рел},2} = 2\mu_2 (\dot{\epsilon}_2 + \ddot{\epsilon}_2 \cdot T_{\text{зап},2}), \quad (3)$$

де  $T_{\text{рел},2}$  – час релаксації напружень в структурі геля, с;

$\mu_2$  – динамічна структурна в'язкість геля, Па·с;

$\dot{\epsilon}_2$  та  $\ddot{\epsilon}_2$  – швидкість та прискорення деформації структури геля, 1/с и 1/с<sup>2</sup>;

$T_{\text{зап},2}$  – час запізнення деформації в структурі геля, с.

Рішенням для диференційного рівняння (3) є вираз:

$$\sigma_{\text{фнк},t} = \sigma_{\text{фнк}} \left( \exp\left(-\frac{t_{\text{жс}}}{T_{\text{рел},2}}\right) \cdot \cos \Omega_2 \cdot t_{\text{жс}} + A_2 \sin \Omega_2 \cdot t_{\text{жс}} \right), \quad (4)$$

де  $\Omega_2$  – частота коливань напружень на фактичній плямі контакту, 1/с;

$A_2$  – діапазон зміни амплітуди коливань від встановленої величини для структури геля.

В виразах для рішення диференціальних рівнянь, на відміну від роботи [5], нами введена коливальна складова. Це виконано на підставі великої кількості проведених експериментальних досліджень, які показують, що в трибосистемах, які працюють в умовах граничного мащення, існують коливальні сили тертя. Крім цього, коливальну складову необхідно вводити при рішенні задач з великою кількістю неоднорідностей з зовнішніх впливів, дефектів, коли немає можливості описати всі впливи об'єктивно. Авторами роботи [6] такі режими названі як stick-slip-режими, при яких сила тертя змінюється в часі періодично. На думку авторів роботи [6] такі режими характерні для трибосистем, де на поверхні наявна тонка плівка мастильного матеріалу товщиною в декілька молекул.

Врахування таких коливань дозволяє наблизити ідеалізовану математичну модель до експерименту та реальних умов функціонування. Отримані реологічні рівняння в вигляді диференціальних рівнянь другого порядку (1) та (3), а також їх рішення в вигляді виразів (2) та (4) є результатом вибору макрореологічної моделі релаксації напружень в змащувальній плівці на поверхні тертя при наявності фуллеренів. Рішення диференційних рівнянь дає можливість виконувати моделювання процесу релаксації напружень на плямах фактичного контакту в трибосистемах, що дозволяє визначити втрати на тертя в вигляді коефіцієнту тертя.

Наступним етапом досліджень є визначення параметрів, які входять в рішення диференційних рівнянь (2) та (4). Такий етап в теорії ідентифікації динамічних об'єктів називається параметричною ідентифікацією математичної моделі. Останнє означає, що вирази для визначення параметрів процесу пови-

нні бути отримані із мікрореологічної моделі релаксації напруженостей на фактичній плямі контакту і втрат на тертя в трибосистемі при наявності фуллеренів в тонкій мастильній плівці адсорбованій на поверхні тертя.

### Висновки

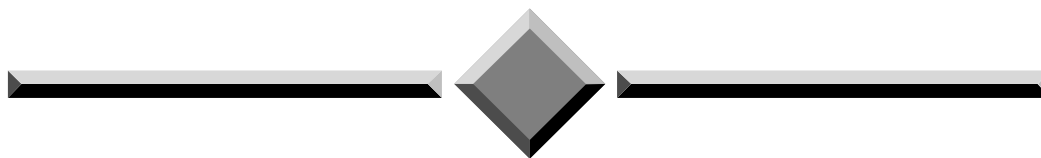
Проведені теоретичні дослідження дали змогу розробити мікрореологічні моделі в вигляді диференціальних рівнянь другого порядку. Рішення цих рівнянь дає можливість виконувати моделювання процесу релаксації напруженостей на плямах фактичного контакту в трибосистемах, що дозволяє визначити втрати на тертя в трибосистемі при наявності фуллеренів в тонкій мастильній плівці адсорбованій на поверхні тертя.

В подальшому буде розроблено мікрореологічна модель релаксації напружень на плямах фактичного контакту при наявності фуллеренів в мастильному матеріалі та проведено моделювання динаміки релаксації напружень та величини коефіцієнта тертя при наявності фуллеренів в змащувальному матеріалі.

### Література

1. 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 трибологии. – 2018. – № 1. – С. 69 – 77.
2. Матвиенко В.Н. Вязкость и структура дисперсных систем / В.Н. Матвиенко, Е.А. Кирсанов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 243 – 276.
3. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: 1981. 172 с.
4. Tadros Th. F. // Coll. And Surf. A. – 1986. – № 18. – р. 137.
5. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. // перев. с англ. под ред. Э.И. Григолоука. – М.: Наука, 1965. – 223 с.
6. Хоменко А.В. Статистическая теория граничного трения атомарно-гладких твердых поверхностей при наличии смазочного слоя / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // Успехи физических наук. – 2012. – Т.182. – № 10.– С. 1081 – 1110.

Надійшла в редакцію 02.01.2019



**Проблеми трибології**  
**“Problems of Tribology”**  
**E-mail: tribosensor@gmail.com**

**Kravtsov A.G. Development of macroreological model of strain relaxation in lubricating film on friction surface in the presence of fullerenes.**

In the article the development of the macroreological model of relaxation of stresses on the spots of the actual contact of tribosystems in the presence of fullerenes in the lubricant is presented. Macroreological model is represented as second order differential equations and their solutions. A working hypothesis is formed to reduce the frictional forces in tribosystems in the presence of a dispersed phase in a lubricant, which will be further confirmed by theoretical models and experimentally.

The general structural feature of liquid lubricants in the presence of fullerenes in them as functional additives is that clusters and micelles are formed in the volume of the liquid. The formation of clusters and micelles in the lubricant depends directly on the concentration of fullerenes that are introduced into the lubricant, and the oleic acid molecules.

The forces of electrostatic interaction between disperse phase units and friction surfaces were considered. In this case, the concentration of aggregates in the field of action of the electrostatic forces of the surface of the friction will be greater than at a distance from the surface, where the field does not work.

In the future, the microresimal model of relaxation of stresses on the points of actual contact with the presence of fullerenes in the lubricant will be developed, and a simulation of the stress relaxation dynamics and the coefficient of friction in the presence of fullerenes in the lubricant will be developed.

**Key words:** macroreological model, rheological properties, clusters, micelles, gel, sol, viscosity of liquid, electrostatic forces, fullerenes, tribosystems, friction surfaces, liquid lubricants.

**References**

1. Kravtsov A.G. Modelirovaniye formirovaniya maslyanoy plenki na poverhnosti treniya pri nalichii fullerenoviyh dobavok v smazochnom materiale i ee vliyanie na skorost iznashivaniya tribosistem. A. G. Kravtsov. Problemi tribologii. 2018. № 1. S. 69 – 77.
2. Matvienko V.N. Vyazkost i struktura dispersnyih sistem. V.N. Matvienko, E.A. Kirsanov. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Himiya. 2011. T.52. № 4. S. 243 – 276.
3. Bibik E.E. Reologiya dispersnyih sistem. E.E. Bibik. L.: 1981.172 s.
4. Tadros Th. F. Coll. And Surf. A. 1986. № 18. r. 137.
5. Reyner M. Reologiya. M. Reyner. perev. s angl. pod red. E.I. Grigolyuka. M. Nauka, 1965. 223 s.
6. Homenko A.V. Statisticheskaya teoriya granichnogo treniya atomarno-gladkih tverdyih poverhnostey pri nalichii smazochnogo sloya. A.V. Homenko, Ya.A. Lyashenko. Uspehi fizicheskikh nauk. 2012. T.182. № 10. S. 1081 – 1110.