



## Дослідження часу релаксації напружень структурою мастильної плівки на поверхні тертя з фулереновими композиціями

А.Г. Кравцов

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. Петра Василенка, (м.Харків, Україна)  
email: kravcov\_84@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3103-6594*

У роботі представлені теоретичні дослідження зміни часу релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя з фулереновими композиціями у змащувальному матеріалі. Дослідження структурної в'язкості різних рідин за допомогою реологічних рівнянь дозволяє стверджувати про необхідність використання такого показника, як час релаксації. При визначенні величин часу релаксації в поверхневих структурах, що містять кластери і міцели фулеренів, в залежності від величин діючих напружень і деформацій було прийнято наступне припущення. Дисперсію кластерів та міцел поряд з поверхнею тертя (в полі дії електростатичних сил), приймаємо за структуру гелю, де між міцелами та поверхнею тертя діють сили електростатичної взаємодії, які сприяють утворенню каркасу з агрегатів, порожнини між якими, заповнені в'язкою рідиною. У даній роботі під часом релаксації розуміється період часу, за який, після зняття зовнішнього впливу, зникають напруження і припиняються деформації. Якщо тривалість дії зовнішньої сили менше ніж час релаксації, то структура поводить як тверде пружне тіло Гука. Якщо тривалість дії зовнішньої сили на структуру більше ніж час релаксації в структурі, то матеріал поводить як в'язка ньютонівська рідина.

Теоретичним шляхом отримані залежності зміни часу релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя, які дозволяють стверджувати, що фізична величина - час релаксації напружень є мірою переходу в'язких властивостей в пружні і навпаки, від пружних в в'язкі. Встановлено, що збільшення швидкості ковзання і трибологічних характеристик базових мастильних матеріалів зменшує час релаксації напружень. Отже, структура гелю на поверхні тертя втрачає властивість пружного тіла і сприймає навантаження як в'язке середовище. При цьому збільшення навантаження збільшує час релаксації, отже структура гелю буде сприймати навантаження як пружне тіло. Концентрація фулеренів в базовому змащувальному матеріалі не робить істотного впливу на величину динамічної в'язкості агрегатів в складі структури гелю.

Показано, що зміна величини внутрішнього тертя структури сполучених матеріалів в конструкції трибосистеми (рухомий і нерухомий трибоелементи) не впливає на час релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя.

**Ключові слова:** фулерени; мастильна плівка; фулеренові композиції; час релаксації; структурна в'язкість; структура гелю; електростатичне поле поверхні тертя; динамічна в'язкість

### Постановка проблеми та її актуальність.

Одним з перспективних напрямків підвищення трибологічних характеристик сучасних мастильних матеріалів, як рідких так і пластичних, є використання нанодобавок. Широке застосування в якості нанодобавок знайшли фулерени. Введення фулеренів у вигляді нанопорошків в змащувальний матеріал сприяє створенню всередині мастильного матеріалу дрібнодисперсних структур у вигляді кластерів і міцел. Особливо активно йде процес міцелоутворення, коли застосовується попереднє диспергування молекул фулерену в розчинниках, наприклад, рослинних

олія, а потім введення отриманого розчину фулеренів в мастильний матеріал. При такому способі отримання фулеренових композицій спостерігається максимальний ефект підвищення трибологічних характеристик мастильних матеріалів, що і наведено в роботі [1].

Електрично активні дисперсні системи з розвиненою питомою поверхнею, до яких відносяться кластери і міцели, що містять молекули фулерену, є одним з перспективних класів сучасних нанодобавок до мастильних матеріалів, які можуть реагувати на електростатичне поле поверхонь тертя трибосистем.

Складність будови структурованих плівок на поверхні тертя, а також можливість сприймати навантаження і релаксувати напруження на фактичних плямах контакту, визначають напрям досліджень про механізм зниження зносу і втрат на тертя в трибосистемах, де в мастильних матеріалах використовуються фулерени.

**Аналіз останніх публікацій по даній проблемі.** На підставі виконаних досліджень автори роботи [2] стверджують, що стан мастила на поверхні тертя під час роботи трибосистеми не можна назвати рідким або твердим. У сучасній літературі вводяться поняття рідкеподібного і твердеподібного станів, що відрізняються від рівноважних термодинамічних фаз, оскільки рельєф поверхні тертя істотно впливає на мастило, порушуючи симетрії стану.

Згідно з експериментальними даними, які представлені в роботах [3-5], мастило на поверхні тертя є дуже в'язка рідина, яка поводить себе як аморфне тверде тіло і характеризується межею плинності. Виходячи з цього, на підставі реологічного опису в'язкопружного середовища, яке володіє теплопровідністю, в роботі [2] отримана система кінетичних рівнянь, які визначають поведінку зсувних напружень і деформацій, а також температуру в тонкій плівці мастила на поверхні тертя [6, 7]. Отримані реологічні рівняння і результати моделювання за допомогою рівнянь, дозволили авторам зробити висновок, що величина ефективної в'язкості набагато відрізняється від величини об'ємної в'язкості і залежить від температури. На думку авторів роботи [2] зазначений зворотний зв'язок між величиною напружень, температурою і деформацією означає, що перехід мастила з твердеподібного стану в рідкеподібний обумовлений як нагріванням, так і впливом напружень, які створюються твердими поверхнями тертя. Це узгоджується з розглядом нестійкості твердої фази в рамках уявлення зсувного динамічного плавлення при відсутності теплових флуктуацій [8].

Результати представленої вище аналізу дозволяють розширити існуючі уявлення про фізику процесів, що відбуваються на поверхнях тертя трибосистем, які працюють в режимі граничного мащення. Особливо це актуально на сучасному етапі розвитку науки трибологія, коли в мастильних матеріалах використовуються нанорозмірні частинки і класичний закон Амонтона-Кулона не виконується, такої думки дійшли автори роботи [2]. Автори даної роботи стверджують, що плавлення ультратонкої плівки мастила між твердими поверхнями тертя, представлено як результат дії зсувних напружень і швидким нагріванням малого локального об'єму. Критична температура локальних об'ємів поверхні тертя, при якій відбувається плавлення, збільшується зі зростанням характерного значення зсувної в'язкості і зменшу-

ється зі зростанням модуля зсуву мастила за лінійним законом. Показано, що переривчастий режим тертя (stick-slip) реалізується, якщо час релаксації температури в мастильному матеріалі набагато перевищує значення часу для зсувних напружень і деформації.

На наш погляд такий підхід зобов'язує враховувати ефективну в'язкість шарів мастильного матеріалу, які адсорбовані на поверхні тертя і знаходяться в полі дії електростатичних сил. Одним з перших дослідників аномальної в'язкості В. Оствальдом в 1925 році запропоновано використовувати термін «структурна в'язкість». На думку В. Оствальда для просторової структури характерно взаємодія довгих макромолекул, при якому виникають зачеплення, вузли, ділянки тривимірної сітки. Деформування при зсуві розриває деякі зв'язки і забезпечує рух деяких ділянок структури, як незалежних одиниць течії.

У роботах [9, 10] представлені теоретичні дослідження зміни структурної в'язкості мастильних плівок на поверхні тертя з фулереновими композиціями. Встановлено, що для тонкої мастильної плівки, що знаходиться в полі дії електростатичних сил поверхні тертя, необхідно розглядати структурну динамічну в'язкість мастильного матеріалу, який у поверхні тертя має структуру гелю, а в міру зменшення електростатичних сил від поверхні тертя - структура гелю переходить в структуру золю.

#### **Мета дослідження.**

Метою даної роботи є виконати теоретичні дослідження зміни часу релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя з фулереновою композицією в змащувальному матеріалі в полі дії електростатичних сил.

**Методичний підхід в проведенні досліджень.** Дослідження структурної в'язкості різних рідин за допомогою реологічних рівнянь дозволяє стверджувати про необхідність використання такого показника, як час релаксації. У монографії М. Райнера [11] при отриманні реологічних рівнянь використовуються два види часу релаксації. У даній роботі під часом релаксації розуміється період часу, за який, після зняття зовнішнього впливу зникають напруження і припиняються деформації. Якщо тривалість дії зовнішньої сили менше, ніж час релаксації, то структура поводить себе як тверде пружне тіло Гука. Якщо тривалість дії зовнішньої сили на структуру більше, ніж час релаксації в структурі, то матеріал поводить себе як в'язка ньютонівська рідина.

При визначенні величин часу релаксації в поверхневих структурах, що містять кластери і міцели фулеренів, в залежності від величин діючих напружень і деформацій, були прийняті такі припущення.

1. Дисперсію кластерів і міцел в об'ємі рідкого мастильного матеріалу поза дією електроста-

тичного поля поверхні тертя приймаємо за структуру золю [11]. В такій структурі напруження сприймаються в'язким рідким середовищем і передається на пружні агрегати. Такій структурі притаманні в'язко-пружні властивості.

2. Дисперсію кластерів та міцел поряд з поверхнею тертя (в полі дії електростатичних сил), приймаємо за структуру гелю [12], 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 [11]. В такій структурі напруження сприймаються пружними елементами агрегатів і передаються у в'язке рідке середовище.

**Результати досліджень.** На підставі виразів, які отримані в роботі [9] структурну в'язкість гелю визначимо за формулою:

$$\mu_r = k_p \mu_p + k_\phi \mu_M, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (1)$$

де  $k_p$  і  $k_\phi$  – безрозмірні коефіцієнти які враховують концентрацію фулеренів в рідині. Формули для розрахунку коефіцієнтів наведені в роботі [9];  $\mu_p$  і  $\mu_M$  – динамічна в'язкість базового мастильного матеріалу при 100°C і динамічна структурна в'язкість агрегатів, які складаються з тіл Максвелла, розмірність Па · с.

Динамічна структурна в'язкості агрегатів, що складаються з тіл Максвелла  $\mu_M$ , згідно роботі [9], визначимо за виразом:

$$\mu_M = \frac{G_{пр,г}(1 + tg^2 \phi_r)}{\omega \cdot tg \phi_r}, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (2)$$

де  $G_{пр,г}$  – приведений модуль зсуву структури гелю, розмірність Па;  $\phi$  – кут, який визначається між нормаллю до поверхні тертя і головною віссю агрегату, у вигляді еліпсоїда, розмірність радіан;  $\omega$  – частота коливань, які збуджуються виступаючими шорсткостями на фактичних плямах контакту в процесі ковзання, визначається за виразом:

$$\omega = \frac{v}{d_{фпк}}, \frac{1}{c}, \quad (3)$$

де  $v$  – швидкість ковзання, м/с;  $d_{фпк}$  – діаметр фактичної плями контакту, розмірність - м, визначається за роботою [13].

Приведений модуль зсуву структури гелю визначається за виразом, який наведено в роботі [9]:

$$G_{пр,г} = \frac{E_{пр,г}}{(2 + 2 \cdot \nu_n)}, \text{ Па}, \quad (4)$$

де  $E_{пр,г}$  – приведений модуль пружності структури гелю, визначається за формулами роботи [9];  $\nu_n$  – коефіцієнт Пуассона дисперсної фази, дорівнює 0,3.

Кут між нормаллю до поверхні тертя і головною віссю агрегату, у вигляді еліпсоїда, визначається за виразом:

$$tg \phi_r = th(0,12 \cdot h \cdot 1 \cdot 10^6), \quad (5)$$

де  $h$  – товщина мастильної плівки на поверхні тертя, яка сформована під дією поля електростатичних сил поверхні тертя, розмірність м, визначається за роботою [10]; коефіцієнт рівний  $1 \cdot 10^6$  є коефіцієнтом, який враховує розмірність, 1/м; коефіцієнт 0,12 враховує наявність градієнта напруження електростатичного поля при видаленні від поверхні тертя, отриманий нами експериментальним шляхом, безрозмірна величина.

На підставі отриманих виразів, формули (1) - (5), запишемо вираз для визначення часу релаксації напружень в структурі гелю, яка утворена за допомогою кластерів і міцел фулеренів на поверхні тертя в полі дії електростатичних сил поверхні;

$$T_{рел,г} = \frac{\mu_r}{G_{пр,г}}, \text{ с}. \quad (6)$$

На підставі висновків роботи [11] сформулюємо такі припущення [11].

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

$$T_{рел,г} \gg t_{ж} \quad (7)$$

то така структура сприймає напруження як тверде пружне тіло.

Якщо час релаксації менше часу життя фактичної плями контакту:

$$T_{рел,г} \ll t_{ж} \quad (8)$$

то така структура сприймає напруження як в'язка рідина.

Час життя фактичної плями контакту визначається за виразом:

$$t_{ж} = \frac{d_{фпк}}{v}, \text{ с}. \quad (9)$$

Залежності зміни часу релаксації структурою тонкої мастильної плівки на поверхні тертя (структурою гелю) представлені на рис. 1 та рис. 2.

Для моделювання було обрано трибосистему: рухомий трибоелемент сталь 40X (HRC 52); нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (НВ 100); площа тертя рухомого трибоелементу  $F_{тр,р} = 0,0003 \text{ м}^2$ , нерухомого  $F_{тр,н} = 0,00015 \text{ м}^2$ ; навантаження на трибосистему 1000 Н; базове мастильне середовище – моторна олива М – 10Г<sub>2</sub>к; схема спряження «кільце-кільце».

Для такої трибосистеми, згідно методики роботи [13] були розраховані:  $d_{фпк} = 6,825 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ;  $t_{ж} = 13,65 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , (для  $v = 0,5 \text{ м/с}$ ).

Характер зміни представлених залежностей дозволяє зробити наступні висновки.

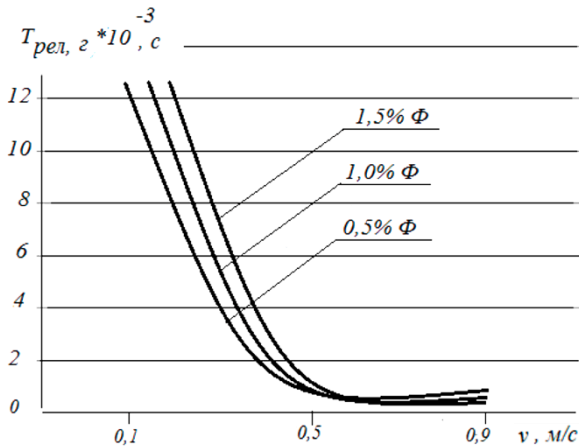


Рис.1. Залежності зміни часу релаксації в структурі гелю від швидкості ковзання і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

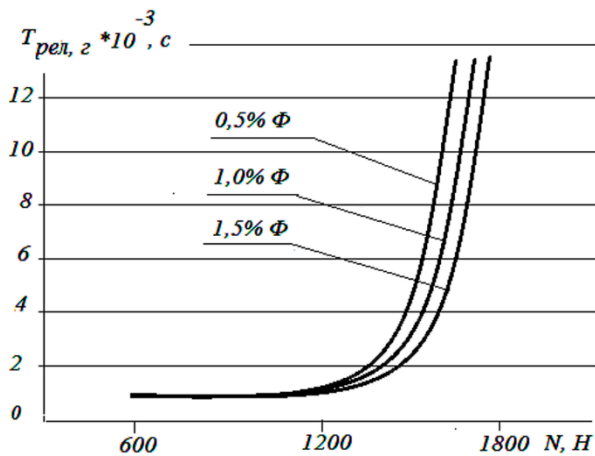


Рис.2. Залежності зміни часу релаксації в структурі гелю від навантаження і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

Грунтуючись на висновках роботи [11] можна стверджувати, що великий час релаксації у структурі гелю характеризує наявність пружних властивостей у мастильної плівки на поверхні тертя в полі дії електростатичних сил. При цьому збільшення швидкості ковзання зменшує величину міри переходу від пружних властивостей до в'язких. Пояснити це явище можна руйнуванням агрегатів всередині структури гелю, що призводить до збільшення в'язких властивостей.

Як впливає з представлених залежностей на рис. 2 збільшення навантаження значно збільшує структурну в'язкість гелю, в 13 - 20 разів. Таке підвищення динамічної в'язкості структури гелю можна пояснити видавлюванням в'язкої рідини під навантаженням і тим самим, зменшення її змісту в структурі гелю. Збільшення часу релаксації напружень при збільшенні навантаження свідчить про те, що структура гелю набуває пружні властивості.

Концентрація фулеренів в базовому змащувальному матеріалі не робить істотного впливу на величину динамічної в'язкості агрегатів в складі структури гелю.

Моделювання характеру зміни параметрів процесу релаксації напружень при зміні трибологічних властивостей базового мастильного середовища і концентрації фулеренів в цьому середовищі, наведено на рис. 3.

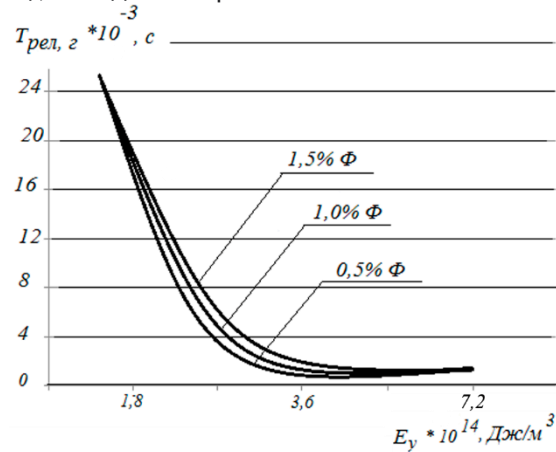


Рис.3. Залежності зміни часу релаксації в структурі гелю від трибологічних властивостей мастильного середовища і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

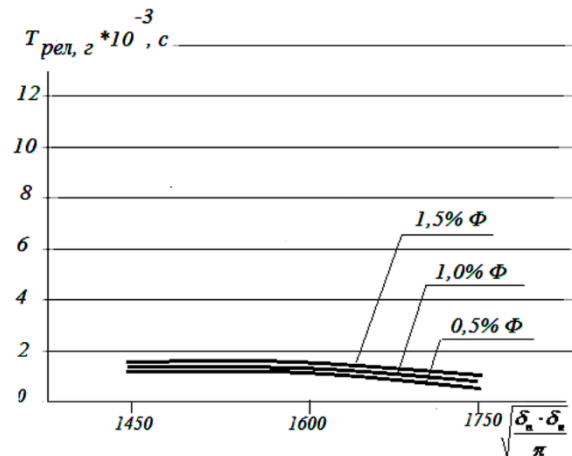


Рис.4. Залежності зміни часу релаксації структури гелю від внутрішнього тертя структури матеріалів трибоелементів і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

При моделюванні використовувалися наступні мастильні середовища:

- гідравлічна олива МГП-10,  
 $E_y = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$
- моторна олива М-10Г<sub>2</sub>К,  
 $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$
- трансмісійна олива VALVOLINEGL-5,  
 $E_y = 7,2 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$ .

Визначення трибологічних властивостей мастильних середовищ у вигляді параметра  $E_y$  – питомої роботи зношування, представлено в роботі [14]. Конструкція трибосистеми аналогічна представленої вище.

Як впливає з представлених залежностей збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища, знижує величину структурної в'язкості гелю на поверхні тертя в 3 рази. При цьому концентрація фулеренів в межах 0,5 - 1,5% не робить істотного впливу на дані показники. На наш погляд, дане явище можна пояснити наявністю або відсутністю пакета присадок в базовому мастильному середовищі. У тих олів, де пакет присадок відсутній або присутній в незначній концентрації,  $E_y = (1,8 - 3,6) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, введення фулеренів і розчинника сприяє утворенню кластерів і міцел, які збільшують структурну в'язкість, а отже, і утворюють на поверхні тертя плівку у вигляді структури гелю. І навпаки, якщо вводити фулерени і розчинник в базове мастильне середовище, яке містить великий і збалансований пакет присадок, де трибологічні властивості високі,  $E_y = (3,6 - 7,2) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, взаємодія на молекулярному рівні не відбувається. Фулерени в меншій мірі будуть утворювати стійкі агрегати у вигляді міцел.

Моделювання характеру зміни параметрів процесу релаксації напружень при зміні структури сполучених матеріалів в трибосистемі, виконаємо для трьох трибосистем.

1. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 2644$ . Таке сполучення матеріалів в трибосистемі визначимо за допомогою комплексного безрозмірного параметру

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1492.$$

2. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – сірий модифікований чавун СЧМ (HB 280), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 3315$ . Величина комплексного безрозмірного параметру сполучених матеріалів в трибосистемі дорівнює

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1670.$$

3. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутріш-

нє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – Бр.АЖ 9 – 4 (HB 100), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 3494$ . Величина комплексного безрозмірного параметру сполучених матеріалів в трибосистемі дорівнює

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1715.$$

Мастильним середовищем було обрано моторна олива М-10Г2к ( $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>), навантаження на трибосистему  $N = 1000$  Н, швидкість ковзання  $v = 0,5$  м/с. Концентрація фулеренів варіювалася в межах від 0,5% до 1,5%.

Результати моделювання характеру зміни параметрів процесу релаксації напружень на фактичної плямі контакту представлені залежностями на рис. 4.

З представлених залежностей випливає, що зміна матеріалів трибоелементів не робить істотного впливу на значення часу релаксації напружень, як міра переходу від в'язких властивостей до пружних.

**Висновки.** Теоретичним шляхом отримані залежності зміни часу релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя, які дозволяють стверджувати, що фізична величина - час релаксації напружень є мірою переходу в'язких властивостей в пружні і навпаки, від пружних в в'язкі. Встановлено, що збільшення швидкості ковзання і трибологічних характеристик базових мастильних матеріалів, зменшує час релаксації напружень. Отже, структура гелю на поверхні тертя втрачає властивість пружного тіла і сприймає навантаження як в'язке середовище. При цьому, збільшення навантаження збільшує час релаксації, отже структура гелю буде сприймати навантаження як пружне тіло.

Зміна величини внутрішнього тертя структури сполучених матеріалів в конструкції трибосистеми не впливає на час релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя.

## Література

1. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystem sin the Presence of Fullerene sinthe Lubricant / V. A. Vojtov, A. G. Kravcov, B. M. Tsymbal // *FRICITION AND WEAR*, 2020, - Vol. 41, - No. 6, - С. 704- 710. DOI: 10.3103/S1068366620060197
2. Хоменко А.В., Ляшенко Я.А. Статистическая теория граничного трения атомарно-гладких твёрдых поверхностей при наличии смазочного слоя / А.В.Хоменко, Я.А.Ляшенко // *УФН*. 2012, - Т. 182, - № 10, - С. 1081 - 1110 DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201210f.1081>

3. Yoshizawa H., Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules / H. Yoshizawa, J. Israelachvili // *Phys. Chem.*, 1993, - V. 97, <https://doi.org/10.1021/j100145a031>

4. Kachanov L. M., Foundations of the Theory of Plasticity / L. M. Kachanov // North-Holland, Amsterdam, 1971. – 482 p.

5. Эйрих Ф. Реология: Теория и приложения / Ф. Эйрих - М., 1962. – 761 с.

6. Khomenko A. V., Yushchenko O. V. Solid-liquid transition of ultrathin lubricant film / A. V. Khomenko, O. V. Yushchenko // *Phys. Rev.*, 2003, -V. 68 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.036110>

7. Khomenko A. V. Effect of correlated temperature fluctuations on the phase dynamics in an ultrathin lubricant film / A. V. Khomenko // *Tech. Phys.*, 2007. – V. 52. - P. 320-327, <https://doi.org/10.1134/S1063784207030061>

8. Aranson I.S., Tsimring L.S., Vinokur V.M. Stick-slip friction and nucleation dynamics of ultrathin liquid films / I. S. Aranson, L. S. Tsimring, V.M. Vinokur // *Phys. Rev.* 2002. – V. 65 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.125402>

9. Kravtsov A.G. Investigation of the structural viscosity of oil film on the friction surface with fullerene compositions / A.G. Kravtsov // *Problemi tribologii*. 2021. - № 1, - С. 49—55

10. 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 / A. Kravtsov, Y. Gradiskiy, B. Tsymbal, K. Borak // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. – V. 1021(1), 012040. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012040

11. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. // Перев. с англ. под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Наука, 1965. – 223 с.

12. Кравцов А.Г. Розробка макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності фуллеренів / А.Г. Кравцов // *Проблеми трибології*. 2018. – № 4. – С. 36 – 40.

13. Войтов В. А., Захарченко М.Б. Моделирование процесов соприкосновения 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.

14. Войтов В. А., Захарченко М.Б. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. — Харків: УкрДАЗТ. 2015 (2), - № 151, - С. 5—10

## References

1. Vojtov, V., Kravtsov, A. and Tsymbal, B., 2020. Evaluation of Tribotechnical Characteristics for Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *Journal of Friction and Wear*, 41(6), pp.521-525.

2. Khomenko, A. and Lyashenko, I., 2012. Statistical theory of the boundary friction of atomically flat solid surfaces in the presence of a lubricant layer. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 182(10), pp.1081-1110.

3. Yoshizawa, H. and Israelachvili, J., 1993. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(43), pp.11300-11313.

4. Kachanov L. M., 1971. Foundations of the Theory of Plasticity. North-Holland, Amsterdam, p. 482.

5. Eyrikh F. 1962. Reologiya: Teoriya i prilozheniya. M., p. 761.

6. Khomenko, A. and Yushchenko, O., 2003. Solid-liquid transition of ultrathin lubricant film. *Physical Review E*, 68(3).

7. Khomenko, A., 2007. Effect of correlated temperature fluctuations on the phase dynamics in an ultrathin lubricant film. *Technical Physics*, 52(3), pp.320-327.

8. Aranson, I., Tsimring, L. and Vinokur, V., 2002. Stick-slip friction and nucleation dynamics of ultrathin liquid films. *Physical Review B*, 65(12).

9. Kravtsov A.G. 2021. Investigation of the structural viscosity of oil film on the friction surface with fullerene compositions. *Problems of Tribology*, 1(99), pp. 49-55.

10. Kravtsov, A., Gradiskiy, Y., Tsymbal, B. and 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, p.012040.

11. Reyner M. 1965. Reologiya. Perev. s angl. pod red. E.I. Grigolyuka, p. 223.

12. Kravtsov A.G. 2018. Rozrobka makrereolohichnoyi modeli relaksatsiyi napruzhen' v mastyl'niy plivtsi na poverkhni tertya pry nayavnosti fullerenuv. *Problems of Tribology*, 4(90) pp. 36-40.

13. Vojtov V. A., and Zakharchenko M.B. 2015. Modelirovaniye protsessov treniyai i znashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipatsii v tribosistemakh. *Problems of Tribology*, 1(75), pp. 49–57.

14. Vojtov V. A., and Zakharchenko M.B. 2015. Intehral'nyy parameter otsenky trybolohycheskykh svoystv smazochnykh materyalov. *Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koyi derzhavnoyi akademiyi zaliznychnoho transportu*, 151, pp. 5-10.

**Аннотация****Исследование времени релаксации напряжений структурой смазочной пленки на поверхности трения с фуллереновыми композициями****А.Г.Кравцов**

В работе представлены теоретические исследования изменения времени релаксации напряжений в структуре смазочной пленки на поверхности трения с фуллереновыми композициями в смазочном материале. Исследование структурной вязкости различных жидкостей с помощью реологических уравнений позволяет утверждать о необходимости использования такого показателя, как время релаксации. При определении величин времени релаксации в поверхностных структурах, содержащих кластеры и мицеллы фуллеренов, в зависимости от величин действующих напряжений и деформаций, было принято следующее допущение. Дисперсию кластеров и мицелл рядом с поверхностью трения (в поле действия электростатических сил), принимаем за структуру геля, где между мицеллами и поверхностью трения действуют силы электростатического взаимодействия, которые способствуют образованию каркаса из агрегатов, полости между которыми заполнены вязкой жидкостью. В данной работе под временем релаксации понимается период времени, за который, после снятия внешнего воздействия, исчезают напряжения и прекращаются деформации. Если продолжительность действия внешней силы меньше, чем время релаксации, то структура ведет себя как твердое упругое тело Гука. Если продолжительность действия внешней силы на структуру больше, чем время релаксации в структуре, то структура ведет себя как вязкая ньютоновская жидкость.

Теоретическим путем получены зависимости изменения времени релаксации напряжений в структуре смазочной пленки на поверхности трения, которые позволяют утверждать, что физическая величина - время релаксации напряжений, является мерой перехода вязких свойств в упругие и наоборот, от упругих в вязкие. Установлено, что увеличение скорости скольжения и трибологических характеристик базовых смазочных материалов, уменьшает время релаксации напряжений. Следовательно, структура геля на поверхности трения теряет свойство упругого тела и воспринимает нагрузки как вязкая среда. При этом, увеличение нагрузки увеличивает время релаксации, следовательно структура геля будет воспринимать нагрузки как упругое тело. Концентрация фуллеренов в базовом смазочном материале не оказывает существенного влияния на величину динамической вязкости агрегатов в составе структуры геля.

Показано, что изменение величины внутреннего трения структуры сопрягаемых материалов в конструкции трибосистемы (подвижный и неподвижный трибоэлементы) не влияет на время релаксации напряжений в структуре смазочной пленки на поверхности трения.

**Ключевые слова:** фуллерены; смазочная пленка; фуллереновые композиции; время релаксации; структурная вязкость; структура геля; электростатическое поле поверхности трения; динамическая вязкость

**Abstract****Study of stress relaxation time by the structure of a lubricating film on a friction surface with fullerene composites****A.G. Kravtsov**

*The paper presents theoretical studies of the change in the stress relaxation time in the structure of the lubricating film on the friction surface with fullerene compositions in the lubricant. The study of the structural viscosity of various liquids using rheological equations allows us to assert the need to use such an indicator as the relaxation time. When determining the values of the relaxation time in surface structures containing clusters and micelles of fullerenes, depending on the magnitudes of the acting stresses and strains, the following assumption was made. Dispersion of clusters and micelles near the friction surface (in the field of action of electrostatic forces), we take for the structure of the gel, where the forces of electrostatic interaction act between the micelles and the friction surface, which contribute to the formation of a framework of aggregates, the cavities between which are filled with a viscous liquid. In this work, the relaxation time is understood as the period of time during which, after the removal of the external influence, the stresses disappear and the deformations stop. If the duration of the action of the external force is less than the relaxation time, then the structure behaves like a rigid elastic Hooke's body. If the duration of the action of an external force on the structure is longer than the relaxation time in the structure, then the material behaves like a viscous Newtonian fluid.*

The dependences of the change in the stress relaxation time in the structure of the lubricating film on the friction surface were obtained theoretically, which make it possible to assert that the physical quantity, the stress relaxation time, is a measure of the transition of viscous properties to elastic and vice versa, from elastic to viscous. It was found that an increase in the sliding speed and tribological characteristics of basic lubricants reduces the stress relaxation time. Consequently, the structure of the gel on the friction surface loses the property of an elastic body and perceives the load as a viscous environment. At the same time, an increase in the load increases the relaxation time, therefore, the structure of the gel will perceive the load as an elastic body. The concentration of fullerenes in the base lubricant does not significantly affect the dynamic viscosity of the aggregates in the gel structure.

It is shown that the change in the value of the internal friction of the structure of the mating materials in the structure of the tribosystem (movable and stationary triboelements) does not affect the stress relaxation time in the structure of the lubricating film on the friction surface.

**Keywords:** *fullerenes; lubricating film; fullerene compositions; relaxation time; structural viscosity; gel structure; electrostatic field of the friction surface; dynamic viscosity*

---

**Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard**

Kravtsov, A. G. (2021) «Study of stress relaxation time by the structure of a lubricating film on a friction surface with fullerene composites», *Engineering of nature management*, (1(19), pp. 13 - 20.

---

*Подано до редакції / Received: 16.03.2021*