

## Дослідження часу запізнення в 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 запізнення в 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 зробити висновок про необхідність використання такого показника, як час запізнення.

Теоретичним шляхом отримані залежності зміни величин часу запізнення в релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя, які дозволяють стверджувати, що фізична величина  $T_{\text{зап}}$  враховує інерційні властивості структури. Малі значення часу запізнення характеризують відсутність затримок в релаксації напружень в структурі матеріалу та залишкових деформаціях. Великі значення часу запізнення характеризують наявність затримок і наявність залишкових деформацій в матеріалі після зняття напружень.

Показано, що величина часу запізнення доповнює фізичну величину часу релаксації. Різниця між вказаними фізичними величинами полягає в підтвердженні залишкових деформацій в структурах, що досліджуються. За допомогою фізичної величини часу запізнення можна пояснити наявність або відсутність коливального процесу зміни коефіцієнта тертя, або режиму, який названо stick-slip режим. Зменшення часу запізнення релаксації напружень при збільшенні навантаження свідчить про те, що структура гелю набуває пружні властивості.

Доведено, що такі фактори, як швидкість ковзання, навантаження на трибосистему та трибологічні властивості базового мастильного середовища, значно впливають на параметр часу запізнення, в бік збільшення або зменшення. І навпаки, такі фактори, як структура сполучених матеріалів в трибосистемі, величина площ тертя та концентрація фулеренів в базовому змащувальному матеріалі, не роблять істотного впливу на значення часу запізнення деформації в структурі гелю.

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

**Постановка проблеми та її актуальність.** Використання фулеренів, як протизносних, протизадирних і антифрикційних добавок до технічних рідких мастильних матеріалів показує перспективність їх застосування. Існує напрямок, де фулерени, у вигляді нанопорошків, безпосередньо вводяться в мастильний матеріал і напрямок, де використовується попереднє диспергування фулеренів в розчинниках, наприклад, рослинних оліях, а потім введення таких композицій в технічні оливи. На думку авторів роботи [1], таке використання фулеренів дає кращий позитивний ефект, ніж додавання фулеренів у вигляді нанопорошків в мастильні матеріали.

Наявність в змащувальному матеріалі дисперсної фази в вигляді кластерів і міцел, які утворюються навколо молекул фулерену, створюють на поверхні тертя «зшиті» структури, які сприймають і релаксують напруження на плямах фактичного контакту. Управління процесом створення таких структур дає можливість розробляти «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.

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

**Аналіз останніх публікацій по даній проблемі.** Роботи [2-4] присвячені фулеренам, як добавкам до мастильних матеріалів. Автори відзначають, що використання фулеренів знижує коефіцієнт тертя і підвищує зносостійкість сполучень. В роботі [4] відзначається, що концентрація фулеренової добавки повинна бути в межах 0,5...2,0% мас. В роботі [5] наведено результат використання фулерену  $C_{60}$ . Автори відзначають позитивний ефект, проте роблять висновок, що

механізм взаємодії 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.

Загальна структурна особливість рідких мастильних матеріалів при наявності в них фулеренів полягає в тому, що в об'ємі рідини утворюються кластери та міцели. На підставі висновків роботи [6] можна стверджувати, що в'язку рідину можливо розглядати як суцільне дисперсійне середовище, а кластери та міцели – як дисперсійну фазу. Молекули фулеренів взаємодіючи між собою та молекулами олеїнової кислоти рослинної олії 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 [6].

Автор роботи [7] 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 [8] 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 [6] агрегати дисперсної фази, об'єднані зовнішніми силами (в нашому випадку електростатичними) в суцільну сітку (каркас) на поверхні тертя, набувають 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 [6], окремі агрегати (в нашому випадку молекули фуллеренів) можуть утворювати обертальний рух між поверхнями тертя. При виникненні такого механізму взаємодії, в'язкість рідини поступово зменшується [6].

У роботі [9] представлені теоретичні дослідження зміни структурної в'язкості мастильних плівок на поверхні тертя з фулереновими композиціями в полі дії електростатичних сил поверхні тертя і базового мастильного матеріалу. Теоретичним шляхом встановлено, що для тонкої масляної плівки [10], що знаходиться в полі дії електростатичних сил поверхні тертя, необхідно розглядати структурну динамічну в'язкість мастильного матеріалу, яка у поверхні тертя має структуру гелю, а в міру зменшення електростатичних сил від поверхні тертя - структура гелю переходить в структуру золю. Показано, що величина структурної в'язкості розглянутих агрегатів порівнянна з в'язкістю полімерів або бітумів. При цьому, в'язкість структури гелю на чотири порядки вище в'язкості структури золю. Збільшення концентрації фулеренів призводить до збільшення динамічної в'язкості агрегатів.

У роботі [11] 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. 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. Показано, що рушійною силою переходу є швидкість роботи дисипації в трибосистемі, яку можна назвати енергією накачування.

Викладений вище матеріал дає змогу зробити висновок, що при дослідженні фізичних властивостей структур, які сформовані на поверхні тертя, потрібно визначити критерії переходу таких структур від властивостей пружного тіла до в'язких, та навпаки, від в'язких властивостей до пружних. Важливим явищем при цьому є залишкові деформації в структурі плівок, які можна визначити за допомогою параметру – часу запізнення в релаксації напружень, що враховує інерційні властивості структури.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є виконати теоретичні дослідження зміни часу запізнення в 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.** При визначенні величин часу запізнення в релаксації напружень 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 електростатичного поля поверхні тертя приймаємо за структуру золю [12]. В такій структурі напруження сприймаються в'язким рідким середовищем і передається 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 гелю [13], 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 [12]. В такій структурі напруження сприймаються пружними елементами агрегатів і передаються у в'язке рідке середовище, рис.1,б.

Дослідження структурної в'язкості різних рідин за допомогою реологічних рівнянь [13] дозволяє стверджувати про необхідність використання такого показника, як час запізнення в релаксації напружень структурою мастильної плівки, яка сформована на поверхні тертя електростатичним полем. У роботі [12] під часом запізнення релаксації напружень розуміється період часу від початку зняття зовнішнього впливу до моменту припинення деформації в структурі. Якщо тривалість дії деформацій незначна, то структура поводить себе як тверде пружне тіло і не залишає деформацій після зняття напруження. Якщо тривалість дії деформацій велика, то матеріал поводить себе як в'язка ньютонівська рідина з залишковими деформаціями.

На підставі представлених схем реологічних моделей золя і гелю з використанням методичного підходу, який викладено в роботі [12], можна записати вираз для реологічних рівнянь. Реологічні рівняння для структури золя запишемо у вигляді диференційного рівняння другого порядку:

$$\sigma_{\text{фпк}} + \dot{\sigma}_{\text{фпк}} \cdot T_{\text{рел,з}} = 2\mu_3(\dot{\epsilon}_3 + \epsilon_3 \cdot T_{\text{зап,з}}), \quad (1)$$

де  $\sigma_{\text{фпк}}$  – напруження на плямах фактичного контакту, Па;  $\dot{\sigma}_{\text{фпк}}$  – швидкість зміни напруження на плямах фактичного контакту, Па/с;  $T_{\text{рел,з}}$  – час релаксації напруження в структурі золя, с;  $\mu_3$  – динамічна структурна в'язкість золя, Па·с;  $\dot{\epsilon}_3$  та  $\epsilon_3$  – швидкість та прискорення деформації в структурі золя, 1/с і 1/с<sup>2</sup>;  $T_{\text{зап,з}}$  – час запізнення деформації в структурі золя, с.

Реологічне рівняння для структури гелю запишемо у вигляді:

$$\sigma_{\text{фпк}} + \dot{\sigma}_{\text{фпк}} \cdot T_{\text{рел,г}} = 2\mu_r(\dot{\epsilon}_r + \epsilon_r \cdot T_{\text{зап,г}}) \quad (2)$$

де  $T_{\text{рел,г}}$  – час релаксації напружень в структурі гелю, с;  $\mu_r$  – динамічна структурна в'язкість струк-

тури гелю, Па·с;  $\dot{\epsilon}_r$  та  $\epsilon_r$  – швидкість та прискорення деформації в структурі гелю, 1/с і 1/с<sup>2</sup>;  $T_{\text{рел,г}}$  – час запізнення деформації в структурі гелю, с.

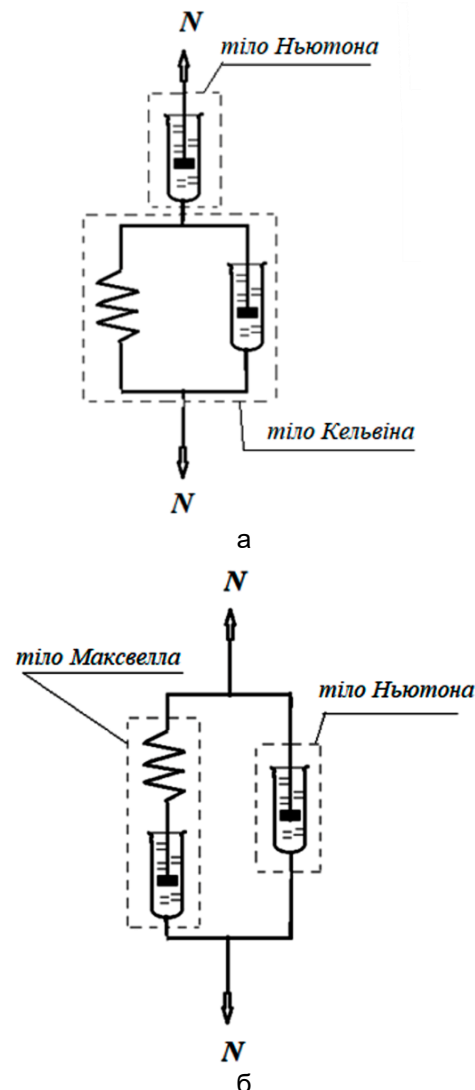


Рис 1. Схема моделі в'язко-пружного золя (а) і пружно-в'язкого гелю (б):  $N$  - навантаження,  $N$

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

Важливою характеристикою в процесі релаксації напружень є величина часу запізнення  $T_{\text{зап}}$ , яка входить в реологічні рівняння (1) та (2).

Згідно рішень диференційних рівнянь (1) і (2), які наведено в роботі [13], можна записати вирази для визначення часу запізнення:

- для структури золю:

$$T_{\text{зап,з}} = \frac{\mu_3}{G_{\text{пр,з}}}, \text{ с}, \quad (3)$$

- для структури гелю:

$$T_{\text{зап,г}} = \frac{T_{\text{рел,г}} \cdot k_{\text{р,ел}} \cdot \mu_{\text{р}}}{\mu_{\text{г}}}, \text{ с}, \quad (4)$$

де  $\mu_{\text{г}}$  - динамічна в'язкість структури, яка сформована з тіл Кельвіна, формули для розрахунку наведено в роботі [9], розмірність Па\*с;  $G_{\text{пр,з}}$  - модуль зсуву структури золю, формули для розрахунку наведено в роботі [9], розмірність Па.

Час релаксації напруження в структурі гелю  $T_{\text{рел,г}}$ , безрозмірний коефіцієнт  $k_{\text{р,ел}}$ , який враховує концентрацію фулеренів в об'ємі рідини, динамічну в'язкість рідини  $\mu_{\text{р}}$  та динамічну в'язкість структури гелю  $\mu_{\text{г}}$ , розраховуються за формулами, які наведено в роботі [11].

Фізичний сенс величини  $T_{\text{зап}}$  - інерційні властивості структури. Малі значення часу запізнення характеризують відсутність затримок в релаксації напружень в структурі матеріалу та залишкових деформацій. Великі значення часу запізнення характеризують наявність затримок і наявність залишкових деформацій в матеріалі після зняття напружень.

Величина часу запізнення доповнює фізичну величину часу релаксації, яку наведено в роботі [11]. Різниця між вказаними фізичними величинами полягає в підтвердженні залишкових деформацій в структурах, що досліджуються. За допомогою фізичної величини часу запізнення можна пояснити наявність або відсутність коливального режиму коефіцієнта тертя, або режиму, який названо stick-slip режим.

**Результати досліджень.** Для моделювання було обрано трибосистему: рухомий трибоелемент сталь 40X (HRC 52); нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (HB 100); площа тертя рухомого трибоелементу  $F_{\text{тр,р}} = 0,0003 \text{ м}^2$ , нерухомого  $F_{\text{тр,н}} = 0,00015 \text{ м}^2$ ; навантаження на трибосистему 1000 Н; базове мастильне середовище - моторна олива М-10Г2к; схема спряження «кільце-кільце». Концентрація фулеренів в мастильному середовищі варіювалася від 0,5 до 1,5 г/кг базової оливи з попереднім диспергуванням в рослинної ріпакової олії [1].

Характер зміни представлених залежностей дозволяє зробити наступні висновки.

Залежності зміни часу запізнення  $T_{\text{зап}}$ , який характеризує інерційні властивості структури, представлені на рис.2 та рис. 3. З аналізу залежностей випливає, що інерційні властивості структури золю на сім порядків більше, ніж у структурі гелю. Це свідчить про те, що золь має велику інерцію в релаксації напружень і здатний зберігати залишкові деформації. І навпаки, мастильна плівка, що складається зі структури гелю, має мінімальну інерцію в поширенні напружень і не накопичує залишкових деформацій.

Даний параметр побічно підтверджує, що мастильна плівка, яка має структура гелю, має

властивості твердого пружного тіла. При цьому, пружні властивості структур золю і гелю збільшуються зі збільшенням швидкості ковзання, тобто інерційність зменшується.

Вплив концентрації фулеренів на інерційні властивості структур незначний, а зі збільшенням швидкості ковзання зовсім зникає.

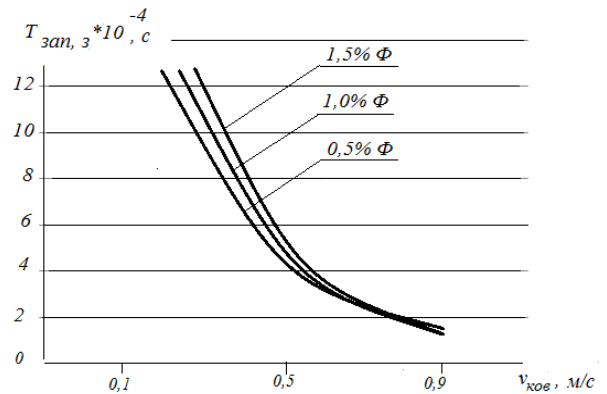


Рис.2. Залежності зміни часу запізнення структури золю від швидкості ковзання і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

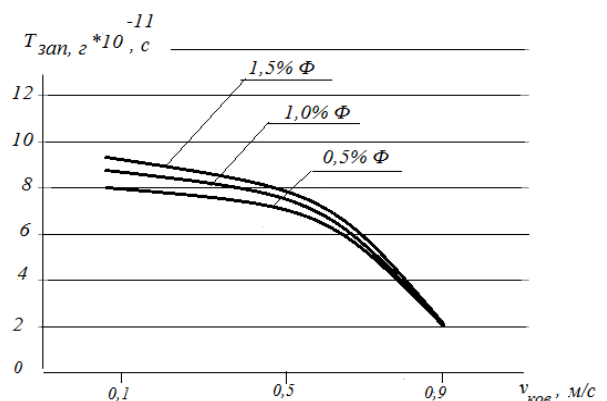


Рис.3. Залежності зміни часу запізнення структури гелю від швидкості ковзання і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

Залежності зміни часу запізнення в структурі гелю від навантаження і концентрації фулеренів наведено рис. 4. Як випливає з представлених залежностей збільшення навантаження значно зменшує час запізнення деформацій в структурі гелю. Таке зниження  $T_{\text{зап,г}}$  можна пояснити видавлюванням в'язкої рідини під навантаженням і тим самим, зменшення її змісту в структурі гелю. Зменшення часу запізнення релаксації напружень при збільшенні навантаження свідчить про те, що структура гелю набуває пружних властивостей. Концентрація фулеренів в базовому змащувальному матеріалі не робить істотного впливу на величину часу запізнення деформації в структурі гелю.

Моделювання характеру зміни параметру часу запізнення в релаксації напружень при зміні трибологічних властивостей базового мастильного середовища і концентрації фулеренів в цьому середовищі, наведено на рис. 5.

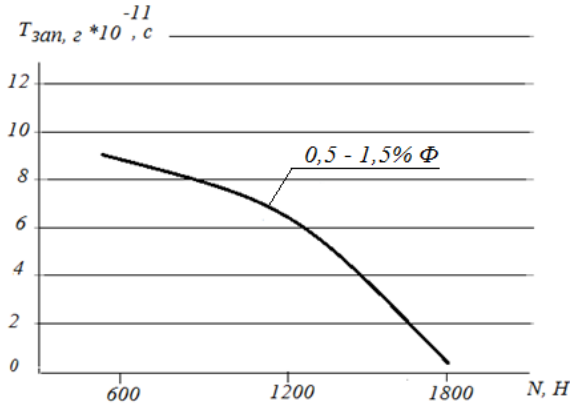


Рис.4. Залежності зміни часу запізнення в структурі гелю від навантаження і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

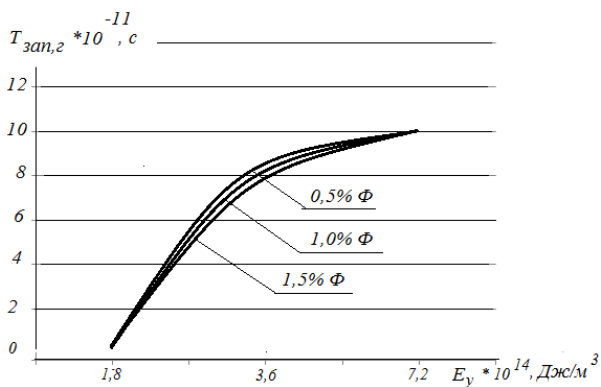


Рис.5. Залежності зміни часу запізнення в структурі гелю від трибологічних властивостей мастильного середовища і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

При моделюванні використовувалися наступні мастильні середовища: гідравлічна олива МГП-10,  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>; моторна олива М-10Г2к,  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>; трансмісійна олива VALVOLINEGL-5,  $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>. Визначення трибологічних властивостей мастильних середовищ у вигляді параметра  $E_y$  – питомої роботи зношування, представлено в роботі [14]. Конструкція трибосистеми аналогічна представленій вище.

Як впливає з представлених залежностей збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища, збільшує величину часу запізнення в поширенні деформацій в структурі гелю на поверхні тертя. 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 оливах, 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. Це свідчить про появу залишкових деформацій в структурі плівки - гелю, що притаманне в'язким середовищам.

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

1. Рухомий трибоелемент – сталь 40Х (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – сталь 40Х (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 40Х (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 40Х (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє 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 моторну оливу М-10Г2к ( $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>),

навантаження на трибосистему  $N = 1000$  Н, швидкість ковзання  $v_{\text{ков}} = 0,5$  м/с. Концентрація фулеренів варіювалася в межах від 0,5% до 1,5%.

Результати моделювання характеру зміни часу запізнення в релаксації напружень в структурі гелю від внутрішнього тертя структури матеріалів трибоелементів і концентрації фулеренів в мастильному середовищі ( $\Phi$ ), які наведено на рис. 6, дозволяють зробити висновок, що зміна матеріалів трибоелементів не робить істотного впливу на значення часу запізнення.

Моделювання характеру зміни параметра часу запізнення в релаксації напружень при зміні коефіцієнта форми трибосистеми і концентрації фулеренів в цьому середовищі, наведено на рис. 7.

При моделюванні було обрано наступну трибосистему: рухомий трибоелемент сталь 40Х (HRC 52); нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (HB 100); площа тертя рухомого трибоелементу  $F_{\text{тр,р}} = 0,0003$  м<sup>2</sup>. Варіювалася величина площі тертя нерухомого трибоелементу, яка становила:  $F_{\text{тр,н}} = 0,000060$  м<sup>2</sup>, коефіцієнт форми трибосистеми  $K\phi = 1,5$  м<sup>-1</sup>;  $F_{\text{тр,н}} = 0,00015$  м<sup>2</sup>,  $K\phi = 8$  м<sup>-1</sup>;  $F_{\text{тр,н}} = 0,00024$  м<sup>2</sup>,  $K\phi = 16$  м<sup>-1</sup>.

Навантаження на трибосистему 1000 Н; швидкість ковзання 0,5 м/с; базове мастильне середовище – моторна олива М-10Г2к; схема спряження «кільце-кільце».

Результати моделювання характеру зміни часу запізнення в релаксації напружень в структурі гелю від величини площі тертя нерухомого трибоелемента (величини коефіцієнту форми  $K\phi$  трибосистеми) і концентрації фулеренів в мастильному середовищі ( $\Phi$ ), які наведено на рис. 7, дозволяють зробити висновок, що зміна площі тертя нерухомого трибоелемента не робить істотного впливу на значення часу запізнення.

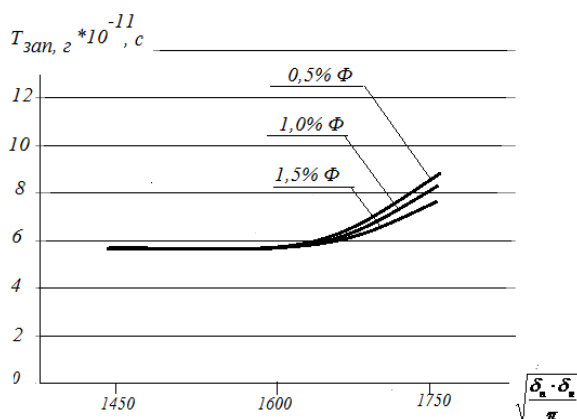


Рис.6. Залежності зміни часу запізнення в релаксації напружень в структурі гелю від внутрішнього тертя структури матеріалів трибоелементів і концентрації фулеренів в мастильному середовищі ( $\Phi$ )

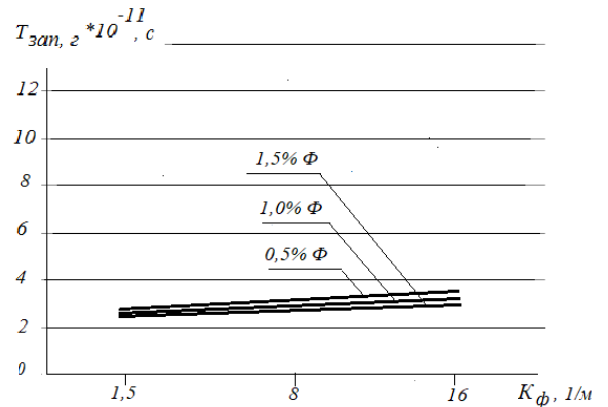


Рис.7. Залежності зміни часу запізнення в релаксації напружень в структурі гелю від коефіцієнта форми трибосистеми і концентрації фулеренів ( $\Phi$ )

**Висновки.** Теоретичним шляхом отримані залежності зміни часу запізнення в релаксації напружень в структурі мастильної плівки на поверхні тертя, які дозволяють стверджувати, що фізична величина  $T_{\text{зап}}$  враховує інерційні властивості структури. Малі значення часу запізнення характеризують відсутність затримок в релаксації напружень в структурі матеріалу та залишкових деформаціях. Великі значення часу запізнення характеризують наявність затримок і наявність залишкових деформацій в матеріалі після зняття напружень.

Величина часу запізнення доповнює фізичну величину часу релаксації. Різниця між вказаними фізичними величинами полягає в підтвердженні залишкових деформацій в структурах, що досліджуються. За допомогою фізичної величини часу запізнення можна пояснити наявність або відсутність ковального режиму зміни коефіцієнта тертя, або режиму, який названо stick-slip режим. Зменшення часу запізнення релаксації напружень при збільшенні навантаження свідчить про те, що структура гелю набуває пружні властивості.

Доведено, що такі фактори, як швидкість ковзання, навантаження на трибосистему та трибологічні властивості базового мастильного середовища значно впливають на параметр часу запізнення. І навпаки, такі фактори, як структура сполучених матеріалів в трибосистемі, величина площі тертя та концентрація фулеренів в базовому змащувальному матеріалі не роблять істотного впливу на значення часу запізнення деформації в структурі гелю.

#### 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. Kravtsov, B. M. Tsymbal // *FRICITION AND WEAR*, 2020, - Vol. 41, - No. 6, - C. 704- 710. DOI: 10.3103/S1068366620060197

2. 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>

3. 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)

4. 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>

5. 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>

6. 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.

7. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: 1981.

8. Tadros Th. F. // *Coll. And Surf. A.* – 1986. – № 18. – p. 137.

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. Войтов В.А., Кравцов А.Г., Войтов А.В. Моделирование процесса релаксации напружений в мастильной плівці на поверхні тертя при наявності фуллеренів в мастильному матеріалі // *Проблеми тертя та зношування*. 2021,

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

13. 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.

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

3. L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J. L. Hutchison, R. Tenne 1999. Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. *Wear*, 225–229 (2), pp. 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)

4. F.A. Yunusov, A.D. Breki, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, 2020. The influence of nanoadditives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>

5. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, Kwang-Ryeol Lee, Aiyang Wang, 2019. Insights into friction dependence of carbon nano particles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface. *Carbon* 150, pp. 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>

6. Matviyenko V.N., Ye.A. Kirsanov, 2011. Vyazkost' i struktura dispersnykh system. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*, 52(4) pp. 243 – 276.

7. Bibik E.E. 1981. Reologiya dispersnykh system. –L.

8. Tadros Th. F. 1986. *Coll. And Surf. A.* 18, p. 137.

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. Vojtov V.A., Kravtsov A.H., Vojtov A.V. 2021. Modelyuvannya protsesu relaksatsiyi napruzen' v mastyl'noy plivtsi na poverni tertya pry nayavnosti fulereniv v mastyl'nomu materiali. *Problemy tertya ta znoshuvannya*, 1(90) pp. 20-29.

12. Reyner M. 1965. *Reologiya. Perv. s angl. pod red. E.I. Grigolyuka*, p. 223.

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

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 задержки в релаксации напряжений структурой смазочной пленки на поверхности трения с фуллереновыми композициями****А.Г.Кравцов**

В работе представлены теоретические исследования изменения времени запаздывания в 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 сделать вывод о необходимости использования такого показателя, как время запаздывания.

Теоретическим путем получены зависимости изменения величин времени запаздывания в релаксации напряжений в структуре смазочной пленки на поверхности трения, которые позволяют утверждать, что физическая величина  $T_{\text{зап}}$  учитывает инерционные свойства структуры. Малые значения времени запаздывания характеризуют отсутствие задержек в релаксации напряжений в структуре материала и остаточных деформациях. Большие значения времени запаздывания характеризуют наличие задержек и наличие остаточных деформаций в материале после снятия напряжений.

Показано, что величина времени запаздывания дополняет физическую величину времени релаксации. Разница между указанными физическими величинами состоит в подтверждении остаточных деформаций в исследуемых структурах. С помощью физической величины времени запаздывания можно объяснить наличие или отсутствие колебательного процесса изменения коэффициента трения, или режима, который назван stick-slip режим. Уменьшение времени запаздывания в релаксации напряжений при увеличении нагрузки свидетельствует о том, что структура геля приобретает упругие свойства.

Доказано, что такие факторы, как скорость скольжения, нагрузка на трибосистему и трибологические свойства базовой смазочной среды оказывают значительное влияние на параметр времени запаздывания, в сторону увеличения или уменьшения. И наоборот, такие факторы, как структура совместимых материалов в трибосистеме, величина площадей трения и концентрация фуллеренов в базовом смазочном материале, не оказывают существенного влияния на значение времени запаздывания деформаций в структуре геля.

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

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

The paper presents theoretical studies of the change in the delay time in stress relaxation 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 fluids using rheological equations allows us to conclude that it is necessary to use such an indicator as the lag time.

The dependences of the change in the values of the delay time in the relaxation of stresses in the structure of the lubricating film on the friction surface were obtained theoretically, which make it possible to assert that the physical quantity  $T_{\text{lag}}$  takes into account the inertial properties of the structure. Small values of the delay time characterize the absence of delays in the relaxation of stresses in the structure of the material and residual deformations. Large values of the lag time characterize the presence of delays and the presence of permanent deformations in the material after stress relief.

It is shown that the value of the delay time complements the physical value of the relaxation time. The difference between the indicated physical quantities is in the confirmation of permanent deformations in the structures under study. The physical value of the delay time can explain the presence or absence of an oscillatory process of changing the friction coefficient, or a mode that called stick-slip. A decrease in the delay time in stress relaxation with increasing load indicates that the gel structure acquires elastic properties.

It has been proven that factors such as sliding speed, load on the tribosystem and tribological properties of the base lubricating medium have a significant effect on the lag time parameter, in the direction of increasing or decreasing. Conversely, factors such as the structure of compatible materials in the tribosystem, the magnitude of the friction areas and the concentration of fullerenes in the base lubricant do not significantly affect the value of the deformation lag time in the gel structure.

**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 the delay time in stress relaxation by the structure of a lubricating film on a friction surface with fullerene compositions. *Engineering of nature management*, (2(20)), pp. 64 - 71.

Подано до редакції / Received: 06.04.2021