

Воронін С.В.

Українська державна академія
залізничного транспорту,
м. Харків, Україна
E-mail: voronin.sergey@inbox.ru

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ НЕМАТИЧНОГО ГРАНИЧНОГО ШАРУ

УДК 621.89.012

Наведена методика розрахунку несучої здатності та питомої сили і коефіцієнту тертя в нематичному шарі граничної плівки на поверхнях тертя. Встановлено, що основними факторами які впливають на несучу здатність нематичного шару є дипольний момент молекул, їх розміри та взаємне розташування в шарі. На силу та коефіцієнт тертя в нематичному шарі також суттєво впливає напруженість силового поля поверхні, яке перешкоджає повороту молекул під дією на них тангенціального зовнішнього навантаження.

Ключові слова: гранична плівка, нематичний шар, несуча здатність, питома сила, коефіцієнт тертя.

Вступ

Серед широкого спектру функціональних присадок, які сьогодні додаються до рідких змащувальних матеріалів, можна виділити специфічний клас речовин, що здатні утворювати у неполярних вуглеводневих розчинах рідкокристалічні фази у вигляді зародків нанометрових розмірів [1]. Наявність у маселі середовищі таких присадок приводить в процесі змащування вузлів тертя до утворення на поверхнях полімолекулярних граничних плівок, що мають пошарову будову, кожен шар якої є твердим або рідким молекулярним кристалом, а ступінь його впорядкованості залежить від відстані до поверхні тертя [2]. Перше уявлення про кристалічну будову граничної молекулярної плівки наведено в монографії А.С. Ахматова [3]. В цій роботі була запропонована гіпотеза про формування плівки з пакетів (груп), які уявляють собою набір впорядкованих димерів молекул жирних кислот або інших поверхнево-активних речовин (ПАР), що застосовуються в якості присадок. Такі пакети, згідно існуючих уявлень, повинні формувати на поверхнях тертя полімолекулярну плівку, саме це підтвердилося в подальшому рентгенографічними дослідженнями [3]. Не зважаючи на тривалий час з моменту проведення таких досліджень, уявлення про структуру та властивості полімолекулярних плівок залишаються практично не змінними. Згідно цих уявлень, механізм формування плівки складається з двох етапів, а саме: першого – утворення моношару з поодиноких молекул ПАР та другого – утворення шарів димерів ПАР на моношарі. Таке уявлення є ідеалізованим та має ряд суттєвих обмежень, наприклад, щодо механічних властивостей граничної плівки в нормальному напрямку, які є незмінними по товщині і визначаються як сума властивостей молекул в плівці. Тобто деформація граничної плівки під дією зовнішнього нормального навантаження складається з деформацій самих молекул [3]. Звичайно, що для деформації ланцюгів окремих молекул потрібно прикласти суттєве навантаження, тому це ствердження є справедливим лише для моношару, як твердого молекулярного кристалу, а властивості полімолекулярного шару слід розглядати з позицій сил та енергії міжмолекулярної взаємодії, в першу чергу слід враховувати орієнтаційну взаємодію між «жорсткими» диполями ПАР. Орієнтаційна взаємодія між диполями була врахована в роботах [4, 5] при розкритті фізичних основ формування полімолекулярних плівок на поверхнях тертя, однак в цих роботах не вивчалися питання з встановлення зв'язку між величиною силового поля поверхні тертя та ступенем впорядкованості молекул в плівці. Залишаються відкритими питання фазових переходів в граничній плівці та їх зв'язку із несучою здатністю та силами тертя. З робіт по вивченню твердих та рідких молекулярних кристалів відомо, що ступінь впорядкованості молекул в кристалі, а також його механічні й інші властивості змінюються стрибкоподібно при фазових переходах першого або другого роду [6, 7]. Умови для фазових переходів створюються поєднанням таких головних факторів: температури, тиску, зовнішнього силового поля (наприклад, поля поверхні). Тобто гранична молекулярна плівка, яка формується під впливом силового поля на поверхні, буде мати різну ступінь впорядкованості – від максимальної для моношару, до мінімальної для ізотропної рідини. Відповідно ступеню впорядкованості будуть змінюватися властивості плівки по товщині, причому при переході від одної до іншої фази властивості будуть змінюватися стрибками [7]. Вивчення властивостей кожної окремої фази граничного шару є актуальною задачею, оскільки це надасть змогу прогнозувати трибологічні характеристики вузлів тертя, які працюють за різних навантажень та температур в присутності граничної плівки пошарової будови.

Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є визначення несучої здатності, питомої сили тертя та коефіцієнту тертя нематичного шару граничної плівки, який знаходиться під дією силового поля поверхні тертя.

При формуванні на поверхнях тертя граничної плівки рідкокристалічної пошарової будови головними задачами є теоретичне визначення несучої здатності кожного з шару, а також визначення коефіцієнту

енту тертя в ньому в залежності від зовнішнього навантаження. Це дозволить виконувати прогнози розрахунки трибологічних характеристик вузлів тертя при використанні присадок, які здатні утворювати на поверхнях рідкокристалічні фази. В роботі проводяться вказані дослідження на прикладі нематичної фази (шару), як однієї складової граничної плівки кристалічної будови.

Виклад матеріалів досліджень

В нематичному рідкому кристалі молекули мають впорядковане розташування лише в одному напрямку. Якщо молекули, з якого складається такий кристал, мають «жорсткий» електричний дипольний момент, то між ними виникають сили орієнтаційної (диполь - дипольної) Ван-дер-ваальсової взаємодії. Припустимо, що шар нематика в граничній плівці складається з молекул дипольні моменти p яких розташовані паралельно та спрямовані в одному напрямку, а центри ваги молекул зміщені на деякий кут Θ_1 , як показано на рис. 1. В залежності від величини кута Θ_1 між ними можуть виникати як сили відштовхування так й сили тяжіння. Виходячи з принципу мінімальної вільної енергії, молекули – диполі займуть таке положення, при якому сили тяжіння між ними будуть максимальні. Тоді для руйнування шару нематика слід прикласти зовнішню силу, яка б за своїм значенням була рівною сумі сил парних взаємодій молекул F_i .

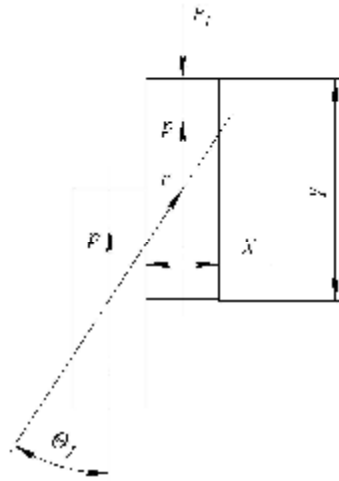


Рис. 1 – Розрахункова схема навантаження пари молекул в шарі нематика

Згідно робіт з класичної фізики [8] сила диполь - дипольної взаємодії може бути визначена як:

$$F_i = \frac{dW_i}{dr} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \times \frac{3p^2(1-3\cos^2(\Theta_1))}{r^4}, \quad (1)$$

де W_i – енергія диполь - дипольної взаємодії, Дж;

r – відстань між одноіменними зарядами диполів, м:

$$r = \frac{X}{\sin(\Theta_1)}, \quad (2)$$

ϵ , ϵ_0 – відповідно, відносна діелектрична проникність нематика та абсолютна діелектрична проникність вакууму.

Якщо відома одинична сила F_i можна знайти питому силу зв'язку молекул в нематичному шарі на один квадратний метр:

$$F_1 = F_i \times N_i, \quad (3)$$

де N_i – кількість парних взаємодій в шарі нематика, m^{-2} , яка дорівнює:

$$N_i = \frac{1}{2S_{МОЛ}} = \frac{1}{2X^2}, \quad (4)$$

де $S_{МОЛ}$ – площа поперечного перетину об'єму, що займає одна молекула, m^2 .

Підставивши (1), (2) та (4) у вираз (3), отримаємо:

$$F_1 = \frac{1}{8\pi\epsilon\epsilon_0} \times \frac{3p^2(1-3\cos^2(\Theta_1)) \times \sin^4(\Theta_1)}{X^6}. \quad (5)$$

При виконанні розрахунків питомої сили приймаємо наступні вихідні дані: $p = 10^{-29}$ Кл/м; $\epsilon = 25$; $X = 5 \cdot 10^{-10}$ м. Результати розрахунку наведені на рис. 2.

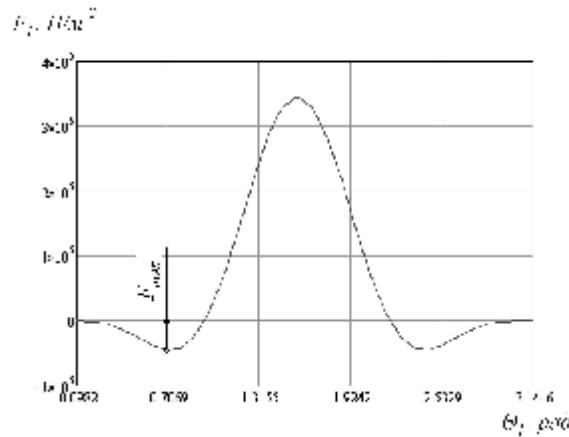


Рис. 2 – Зміна питомої сили взаємодії молекул в нематичному шарі

Згідно рис. 2 максимальна сила зв'язку молекул в нематичному шарі має місце при куті взаємного розташування молекул близьким до 45° , це є сили тяжіння, які на рисунку мають від'ємний знак. Таким чином, для руйнування нематичного шару потрібно прикласти зовнішню силу F_{\max} , яка і є граничною силою та показником несучої здатності нематика.

Для визначення сили тертя в нематичному шарі розглянемо «жорсткий» диполь, який знаходиться під дією зовнішньої тангенціальної сили F_2 та силового поля поверхні тертя напруженістю E_{\parallel} (рис. 3). Сила F_2 витрачається на подолання пари сил, момент від яких M_E прагне обернути молекулу за вектором силового поля.

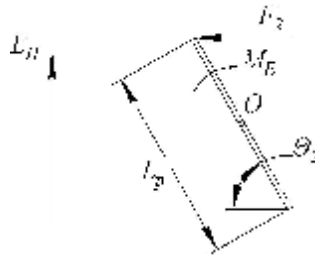


Рис. 3 – Зміна питомої сили взаємодії молекул в нематичному шарі

Величина такого моменту залежить від дипольного моменту молекули p , кута розташування вісі диполя Θ_2 відносно вектора E_{\parallel} і дорівнює:

$$M_E = pE_{\parallel}\cos(\Theta_2). \quad (6)$$

Тоді питома сила, потрібна для повороту всіх молекул нематика визначиться як:

$$F_2 = \frac{M_E \times 2N_i}{L_p} = \frac{2N_i \times pE_{\parallel}\cos(\Theta_2)}{L_p}. \quad (7)$$

Якщо не враховувати додаткові сили, що витрачаються на компенсацію дисипації енергії в нематіку, то силу F_2 можна вважати питомою силою тертя, тоді коефіцієнт тертя в нематичному граничному шарі при максимальному нормальному навантаженні можна визначити як:

$$f = \frac{F_2}{F_1} = \frac{2N_i \times pE_{\parallel}\cos(\Theta_2)}{L_p F_1}. \quad (8)$$

При розрахунку коефіцієнту тертя змінною величиною є напруженість силового поля поверхні, а кут Θ_2 приймаємо рівним нулю, плече диполя $L_p = 10^{-9}$ м. Результати розрахунків наведені на рис. 4.

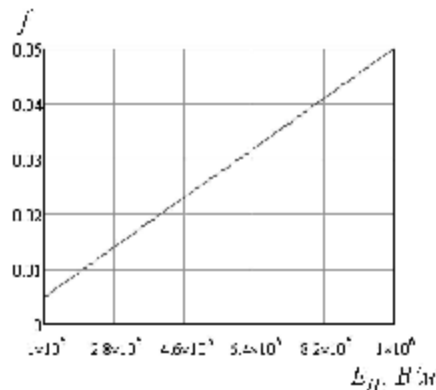


Рис. 4 – Зміна коефіцієнту тертя в нематичному шарі в залежності від величини силового поля поверхні

Згідно графіка, представленого на рис. 4, коефіцієнт тертя лінійно зростає по мірі зростання напруженості силового поля поверхні тертя. В досліджуваному діапазоні він становить від 0,005 до 0,05, тобто величина силового поля суттєво впливає на сили тертя в нематичному шарі.

Висновки

- при визначенні трибологічних характеристик вузлів тертя слід враховувати будову та властивості шарів граничної плівки, яка утворюється молекулами поверхнево-активних речовин. Такі шари мають різний ступінь впорядкованості по мірі віддалення від поверхні тертя, вони уявляють собою твердий молекулярний кристал для моношару та окремі полімолекулярні шари рідких кристалів. Кожен з таких шарів має різну за значеннями несучу здатність та коефіцієнт тертя, як наслідок, трибологічні характеристики вузла тертя залежать від того, який шар сприймає зовнішні навантаження.

- для випадку нематичного рідкокристалічного шару встановлені значення сили, потрібної для його руйнування, тобто визначена несуча здатність цього шару, яка залежить від величини дипольного моменту молекул, об'єму який вони займають в шарі та відносного їх розташування.

- питома сила та коефіцієнт тертя в нематичному шарі також залежать від перелічених факторів, крім того, одним з головних факторів є величина напруженості силового поля поверхні тертя під впливом якого знаходяться молекули нематичного шару. Тому, встановлення розподілу силового поля по товщині кристалічних шарів граничної плівки є однією з головних задач подальших досліджень з вивчення впливу властивостей рідкокристалічних речовин на трибологічні властивості вузлів тертя.

Література

1. Лысков Е.Н., Воронин С.В. Перспективы использования жидких кристаллов в качестве присадок для улучшения эксплуатационных свойств жидких смазочных сред путевых и строительных машин / Е. Н. Лысков, С. В. Воронин // – Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 91. – С. 101-109.
2. Лысков Е. Н., Воронин С.В. Влияние наноструктур присадки на трение и износ в технических системах / Е.Н. Лысков, С.В. Воронин // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 1. – Материалы VIII Международного симпозиума. – М.: РАН, 2013. – С. 143-151.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 471 с.
4. Лысков Е. Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем / Е. Н. Лысков, В. Б. Косолапов, С. В. Воронин, . – Харьков, ЭДЭНА, 2009. – 274 с.
5. Лысков С.М., Воронин С.В. Взаємодія молекул ПАР моторних олів в адсорбційному шарі на поверхнях тертя двигунів внутрішнього згорання / С.М. Лысков, С.В. Воронин, Г.М. Афанасов // Вісник НТУ "ХП". – Тематичний випуск «Автомобіле- і тракторобудування»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2005. – Вип. 13. – С. 75-79.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – 584 с.
7. Жидкие кристаллы / Под ред. С. И. Жданова. – М.: Химия, 1979. – 328 с.
8. Физическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т.І. – С. 703.

Поступила в редакцію 25.11.2013

Voronin S.V. Evaluation of bearing capacity and friction coefficient of the nematic boundary layer.

Among the wide range of functional additives that are added to the liquid lubricants there is a specific class of substances that can form in nonpolar hydrocarbon solutions of liquid crystal phase as embryos nanometer dimensions. The presence of lubricant additives such environments results in the process of greasing friction units to form on the surface polymolecular boundary films with layered structure, each layer of which is a solid or liquid molecular crystals, and its degree of order depends on the distance to the surface friction.

Limiting molecular film which is influenced by the force field friction surface has a different degree of ordering of molecules - the maximum for monolayer, the minimum for the isotropic liquid. Accordingly, the degree of order to vary the properties of the film on its thickness, and the transition from one phase to the other properties will vary jumps. Studying the properties of each individual phase boundary layer is the actual problem, as it will allow to predict the tribological properties of friction units working under different loads and temperatures in the presence of the boundary film layered structure.

The paper describes the method of calculation of the bearing capacity and specific strength and coefficient of friction in the boundary layer of the nematic film that forms on the surfaces of friction. It was established that the main factors that affect the carrying capacity of nematic layer is the dipole moment of the molecules, their size and relative positions in the layer. In force and friction coefficient in nematic layer also significantly affects the surface tension force field that prevents rotation of the molecules under the action of tangential external load.

Keywords: boundary film, nematic layer, bearing capacity, relative strength, coefficient of friction.

References

1. Lysikov E.N., Voronin S.V. Perspektivy ispol'zovaniya gidkih kristalov v kachestve prisadok dlya ulutcheniya ekspluatatsionnykh svoystv gidkih smazochnykh sred putevykh i stroitel'nykh mashin, Zbirnyk naukovykh prac' UkrDAZT. Kharkiv, 2008. Vyp. 91. pp.101-109.
2. Lysikov E.N., Voronin S.V. Vliyanie nanostruktur prisadki na trenie i iznos v tehnikeskikh sistemakh, Phundamental'nye i prikladnye problemy nauki. Tom 1. Materialy VIII Megdunarodnogo simpoziuma. M.: RAN, 2013. pp.143-151.
3. Ahmatov A.S. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. M. Phizmatgiz, 1963. 471 p.
4. Lysikov E.N., Kosolapov V.B., Voronin S.V. Nadmolekulyarnie strukturi gidkih smazochnykh sred i ih vliyanie na iznos tehnikeskikh sistem. Kharkov, EDENA, 2009. 274 p.
5. Lysikov E.N., Voronin S.V., Aphanasov G.M. Vzayemodiya molekul PAR motornykh oliv v adsorbtsionnomu shari na poverhnyakh tertya dviguniv vnutrishn'ogo zgorannya, Visnyk NTU "HPI". Tematichniy vypusk «Avtomobile- i tractorobuduvannya» zb. nauk. prats'. Kharkiv NTU «HPI», 2005. Vyp. 13. pp. 75–79.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. Statisticheskaya fizika. Ch.1. M., Nauka, 1976. 584 p.
7. Gidkie cristally, pod red. S.I. Gdanova. M.: Himiya, 1979. 328 p.
8. Phizicheskaya entsiklopediya. M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. T.I. pp.703.