

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14721

Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. О МІКОСЯНЧИК., О. Є. ЯКОБЧУК, А. М. ХІМКО

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В УМОВАХ МАСЛЯНОГО ГОЛОДУВАННЯ ТРИБОКОНТАКТУ

*Проаналізована кінетика зміни триботехнічних властивостей літєвих мастил в умовах масляного голодування. Встановлено зниження несучої здатності граничних шарів та їх антифрикційних властивостей з підвищенням контактного навантаження з 250 до 700 МПа, що обумовлено зростанням градієнту швидкості зсуву, підвищення якого призводить до інтенсифікації прояву перших ознак схоплювання в триботехнічному контакті. Визначено взаємозв'язок між ступенем порушення самоорганізації дисипативних структур і питомою роботою тертя.*

**Ключові слова:** літєве мастило, товщина мастильного шару, коефіцієнт тертя, питома робота тертя.

**Вступ.** Руйнування граничних мастильних шарів при терті відбувається при критичному тиску в контакті. Управління процесами поверхневої активності контактних поверхонь в процесі їх активації при терті, застосування мастильного матеріалу з поверхнево-активними речовинами, протизношувальними і протизадирними присадками, антифрикційними добавками може забезпечити значне підвищення критичного тиску і початкової температури руйнування граничного шару і вторинних структур, що сприятиме подовженню терміну експлуатації пар тертя.

**Вплив граничних змащувальних шарів на триботехнічні властивості контакту.** У роботах [1; 2] досліджено, що існує оптимальний діапазон прояву ефективних мастильних властивостей при формуванні плівки мастильним матеріалом на контактних поверхнях, який залежить від зовнішніх факторів і міцності зчеплення плівки по відношенню до поверхні. Дослідження структуризації граничних плівок мастильного матеріалу показали, що на швидкість протікання окислювальних реакцій і полімеризаційних процесів істотно впливає поверхня елементів трибоспряжень, яка є складовою частиною системи тертя [3; 4]. Процесу структуризації мастильного матеріалу сприяє також введення в нього присадок, що підвищують протизношувальні властивості мастильних матеріалів, що зумовлено утворенням полімолекулярних мезоморфних епітропно-рідкокристалічних структур [5; 6].

На природу сформованих граничних плівок мастильного матеріалу істотний вплив також надають умови роботи триботехнічних елементів. В роботі [7] встановлено закономірності формування на контактних поверхнях граничних шарів фізичної природи, які характеризуються ідентичністю реологічних властивостей з об'ємною рідкою фазою мастильного матеріалу в умовах кочення з проковзуванням 3%. Однак, при збільшенні ступеня проковзування з 10 до 40% створюються передумови для формування на поверхнях тертя хемосорбційних плівок.

В роботі [8] проаналізовані трибологічні властивості сухого, рідинного та граничного режимів мащення. Показано, що при сухому терті з ростом частоти зовнішнього періодичного впливу в залежності координати нижнього блоку тертя від часу зменшується кількість гармонік, поки при перевищенні граничної

частоти не настає повне прилипання поверхонь, після чого вони рухаються як єдине ціле. У гідродинамічному випадку проаналізовані характеристики пари тертя з мастильним матеріалом, що характеризується властивостями ньютонівської рідини, а також псевдопластичних і ділатантних неньютонівських рідин. Встановлено, що псевдопластичні рідини і гранична плівка мастильного матеріалу в широкому діапазоні параметрів призводять до переривчастого режиму тертя, який є однією з основних причин руйнування деталей.

Між реологічними (зокрема в'язкістю  $\nu$ ) і рідкокристалічними (товщиною граничного шару і ступенем орієнтаційної впорядкованості молекул  $d_s \Delta n_{cp}$ ) характеристиками моторної оливи існує кореляційна залежність, яка визначається експериментальним шляхом. Залежність  $\nu = f(d_s \Delta n_{cp})$  лінійна для діапазону швидкостей зсуву  $\gamma$  (100, 150  $s^{-1}$ ). При збільшенні швидкостей зсуву запропонована залежність в'язкості носить експоненціальний характер. Збільшення швидкості зсуву призводить до зниження рідкокристалічних характеристик мастильного матеріалу і, як наслідок, до зниження в'язкості оливи в граничному змащувальному шарі. Це пояснюється «зрізанням» структурованих молекулярних шарів при підвищенні частоти обертання колінчастого валу, що призводить до зменшення несучої здатності масляної плівки [9].

Удосконалення контрольно-вимірювальних приладів забезпечує реальну можливість вперше досліджувати трибологічні процеси утворення дисипативних структур при терті на атомарному і молекулярному рівнях. Зокрема, комплекс SFA дозволяє вимірювати товщину плівки до 0,1 нм і фіксувати вкрай малі поверхневі сили [10]. Значні переваги даного комплексу дозволяють використовувати його в якості основного інструменту при дослідженні реологічних, мастильних і антифрикційних властивостей трибоконтракту на нанорівні.

Таким чином, виникає необхідність в розробці принципово нових методик оцінки кінетики зміни триботехнічних характеристик мастильних матеріалів. Впровадження автоматизованих методів і засобів контролю триботехнічних параметрів і випробування контактних поверхонь в реальному масштабі часу в режимах, максимально наближених до експлуатаційних, є складовою частиною завдання щодо підвищення точності і достовірності при використанні отриманих експериментальних результатів в реальних вузлах тертя.

**Мета дослідження** – встановлення закономірностей кінетики зміни триботехнічних характеристик контакту в умовах роботи трибосистеми в режимі масляного голодування.

**Методика визначення триботехнічних параметрів контакту.** Експерименти проводилися на установці СМЦ-2 з реєстрацією показників трибоконтракту в режимі *online*. Момент тертя, частота обертів роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в змащувальному шарі в контакті записуються і обробляються на ПК (програмне забезпечення ProfiLab) в реальному масштабі часу з графічним зображенням їх змін.

Розроблена програма прийому даних по RS-232 каналу приймає коди сигналів для обчислення товщини мастильного шару, крутного моменту, частоти обертання зразків, об'ємної температури оливи. Прийняті коди надходять на програмний блок фільтрації і нормування, призначений для блокування помилково прийнятих сигналів, згладжування і перетворення кодів в реальні фізичні величини (рис. 1).

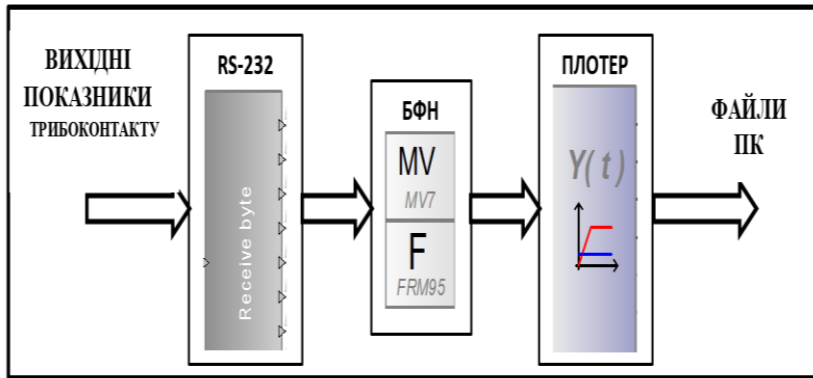


Рис. 1. Функціональна схема підпрограми «ПРИЙОМ»: RS-232 – послідовний канал прийому даних; БФН – програмний блок фільтрації і нормування вхідних сигналів; плотер – графічне представлення фізичних величин вхідних сигналів.

Досліджувані нестационарні умови тертя включають циклічність проведення експериментів в режимі запуск (4 с) – стаціонарна робота (7с) – гальмування (3 с) – зупинка (3 с). Відтворювався режим кочення з проковзуванням 20%.

Контактне напруження по Герцу становило 250, 400, 550 і 700 МПа. В перші 300 циклів напрацювання забезпечувався гідро- або еластогідродинамічний режим мащення, подальші дослідження проходили в умовах масляного голодування.

Досліджувані зразки виготовлені зі сталі 30ХГСА (HRC 35). Змазування поверхонь здійснювалося літєвими мастилами на синтетичній основі Aero Shell Grease 33 і Ера ВНІНП - 286М.

**Результати досліджень.** В роботі представлені і проаналізовані результати досліджень тільки після 300 циклу напрацювання, при переході трибосистеми в режим масляного голодування. З підвищенням  $\sigma_{max}$  з 250 до 700 МПа істотно знижується несуча здатність мастильного граничного шару, товщина якого зменшується в 15 і 3,5 раз при змазуванні поверхонь мастилами ВНІНП – 286М і Aero Shell Grease 33 відповідно (рис. 2). Зниження товщини мастильного шару

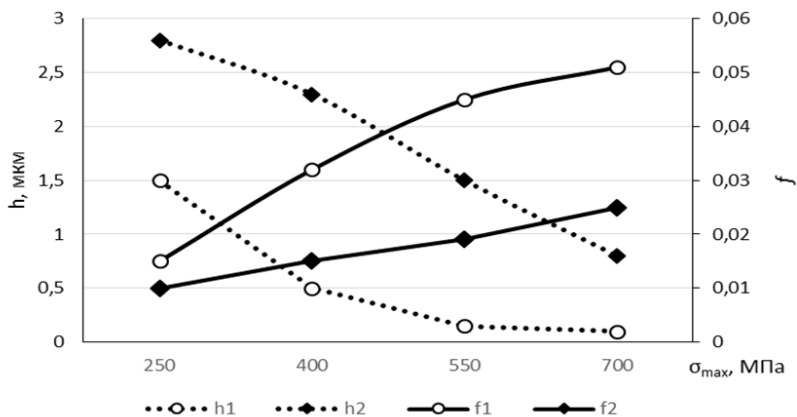


Рис. 2. Вплив контактної навантаження на товщину граничних мастильних шарів ( $h$ ) та коефіцієнт тертя ( $f$ ) в умовах масляного голодування:

1 – мастило Ера ВНІНП-286М; 2 – мастило Aero Shell Grease 33.

обумовлює, насамперед, кореляційне зменшення антифрикційних властивостей досліджуваних мастильних матеріалів. У досліджуваному діапазоні навантажень коефіцієнт тертя підвищується в 3,4 і 2,5 разів для мастил Ера ВНІІП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно.

Перш за все, це забезпечується за рахунок локального руйнування структурованих граничних мастильних шарів, зменшення ефективної в'язкості мастила і проявом гідродинамічних ефектів при механічному і термічному плавленні плівки у фрикційному контакті [11].

Механічна деструкція граничних шарів відбувається внаслідок різкого підвищення градієнта швидкості зсуву мастильної плівки ( $\gamma$ ), який представляє відношення швидкості ковзання в контакті до товщини мастильної плівки. Якщо для мастила Ера ВНІІП-286М з підвищенням навантаження з 250 до 700 МПа градієнт швидкості зсуву мастильних шарів збільшується в 20 разів, то для мастила Aero Shell Grease 33 даний параметр збільшується в 3,5 разів (рис. 3).

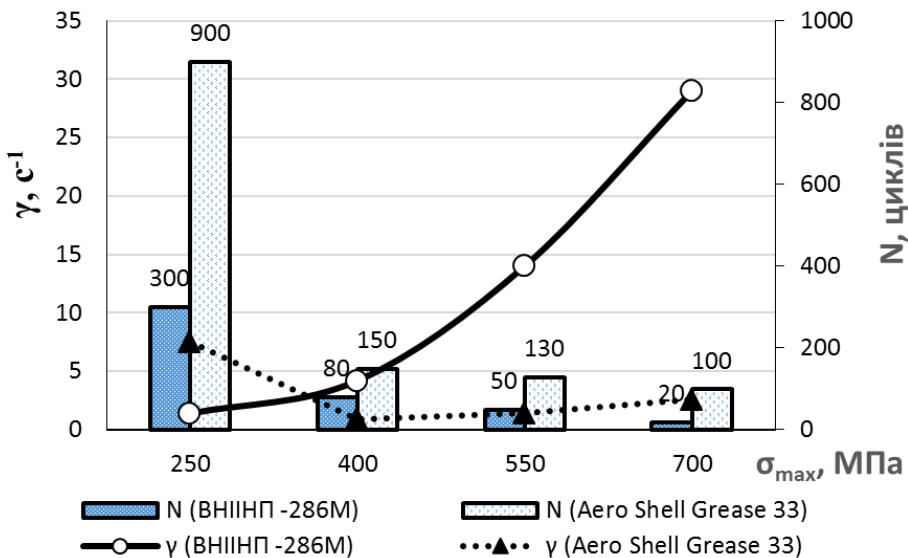


Рис. 3. Зміна градієнта швидкості зсуву мастильних шарів ( $\gamma$ ) і кількості циклів напруцювання до прояву ознак схоплювання ( $N$ ) в діапазоні 250 – 700 МПа.

Отже, мастило Aero Shell Grease 33 характеризується більш ефективними змащувальними властивостями, а його синтетичні компоненти за реологічними характеристикам є більш стабільними до збільшення градієнта швидкості зсуву, в порівнянні з компонентами мастила Ера ВНІІП-286М. Стійкість мастильної плівки до механічної деструкції внаслідок збільшення градієнта швидкості зсуву є визначальним фактором, що забезпечує нормальну працездатність пар тертя в критичних умовах. На рис. 3 вказано кількість циклів напруцювання трибоелементів в умовах масляного голодування до прояву перших ознак схоплювання, які проявлялися візуально на доріжці тертя, при цьому спостерігалось підвищення шуму і зупинка машини тертя. Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням навантаження різко скорочується період напруцювання трибосистеми – в досліджуваному діапазоні контактних навантажень працездатність пар тертя знижується в 15 і 9 разів відповідно при змазуванні контактних поверхонь Ера ВНІІП-286М і Aero Shell Grease 33.

Руйнування мастильної плівки при терті є одним з провідних факторів, що обумовлює інтенсифікацію енергетичних процесів, що відбуваються в зоні контакту. Перш за все, це проявляється в порушенні структурної пристосованості контактних поверхонь і мастильного матеріалу в критичних умовах тертя, руйнуванням раніше утворених метастабільних структур. Перехід трибосистеми в термодинамічно нестійкий стан характеризується, перш за все, різкою активацією металу внаслідок концентрації напружень на локальних ділянках фрикційного контакту в місцях руйнування плівки мастильного матеріалу, що проявляється в підвищенні питомої роботи тертя.

При  $\sigma_{max}$  250 МПа, згідно з розрахунковою залежністю оцінки режиму мащення  $\lambda = h / \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ , в контакті реалізується еластогідродинамічний ( $\lambda = 3,13$ ) і гідродинамічний ( $\lambda = 5,83$ ) режими мащення при використанні мастил Ера ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно. Отже, контактні поверхні розділені достатнім шаром мастильного матеріалу, що забезпечує локалізацію дотичних напружень зсуву в тонкому граничному шарі мастила, що сприяє зменшенню як зовнішніх силових впливів, так і поверхневої деформації тонких шарів металу. Показники питомої роботи тертя ( $A_{тр}$ ) складають, в середньому, 3200 і 1000 Дж/мм<sup>2</sup> при змазуванні пар тертя Ера ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно.

З підвищенням  $\sigma_{max}$  до 700 МПа внаслідок різкого зменшення товщини мастильної плівки умови роботи трибосистеми відповідають напівсухому ( $\lambda = 0,21$ ) і граничному ( $\lambda = 1,67$ ) режимам мащення при дослідженні Ера ВНІНП - 286М і Aero Shell Grease 33 відповідно. В таких умовах тертя інтенсифікуються механохімічні процеси в тонких поверхневих шарах металу, підвищується ступінь їх деформаційних змін. Зазначені процеси характеризуються нерівноважними кінетичними переходами трибосистеми, порушенням самоорганізації дисипативних структур, що призводить до збільшення питомої роботи тертя. При змащенні сталі мастилом Ера ВНІНП-286М  $A_{тр}$  підвищується в 3 рази при збільшенні  $\sigma_{max}$  з 250 до 700 МПа і становить 10000 Дж/мм<sup>2</sup> (рис. 4). Застосування синтетичного мастила Aero Shell Grease 33 сприяє зниженню питомої роботи тертя, в середньому, в 2 - 3 рази.

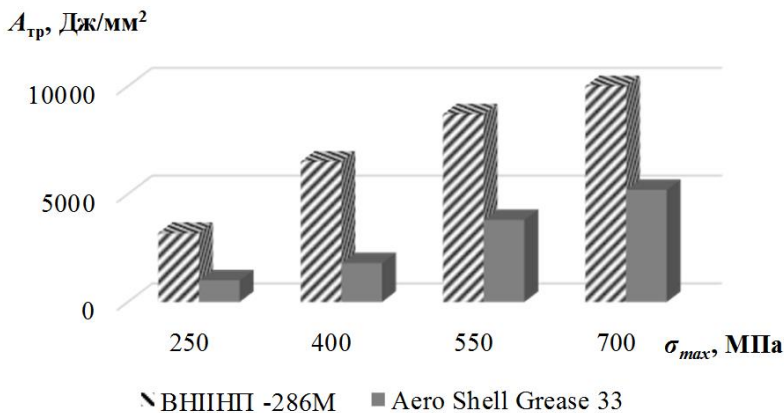


Рис. 4. Зміна питомої роботи тертя в контакті в умовах підвищення контактного навантаження

Саме стабільність дисипативних структур при їх самоорганізації в динамічних умовах навантаження є визначальним фактором працездатності трибосисте-

ми. Товщина мастильної плівки на рівні 1,5 – 3 мкм, що забезпечує еласто- і гідродинамічні режими мастильної дії, високі антифрикційні властивості ( $f$  в межах 0,01 – 0,015) і низька питома робота тертя ( $A_{тр}$  становить 1000 – 3200 Дж/мм<sup>2</sup>) при  $\sigma_{max}$  250 МПа забезпечують напрацювання трибосистеми в умовах масляного голодування в межах 300 – 900 циклів в залежності від типу мастильного матеріалу (рис. 3). З підвищенням  $\sigma_{max}$  до 700 МПа, спостерігається зниження товщини мастильної плівки до 0,1 – 0,8 мкм, збільшення коефіцієнта тертя до 0,03 – 0,05, підвищення питомої роботи тертя до рівня 5000 – 10000 Дж/мм<sup>2</sup>, що призводить до різкого скорочення циклів напрацювання трибосистеми – перші ознаки схоплювання, в залежності від типу мастила, проявляються на 20 – 100 циклах напрацювання.

Таким чином, тільки лише за рахунок раціонального вибору мастильного матеріалу (заміна мастила Ера ВНІНП-286М на Aero Shell Grease 33) вдалося збільшити кількість циклів напрацювання трибосистеми до прояву перших ознак схоплювання в 3 і 5 разів відповідно при  $\sigma_{max}$  250 і 700 МПа.

### Висновки.

1. Встановлено кореляційне зниження товщини граничного шару в 15 і 3,5 раз та антифрикційних властивостей в 3,4 і 2,5 разів для мастил Ера ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно з підвищенням контактного навантаження з 250 до 700 МПа.

2. Скорочення періоду циклів напрацювання пар тертя в 15 і 9 разів обумовлено збільшенням градієнту швидкості зсуву граничних плівок мастильного матеріалу в 20 та 3,5 разів відповідно при змазуванні контактних поверхонь Ера ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33.

3. Руйнування мастильної плівки є одним з провідних факторів, що обумовлює інтенсифікацію енергетичних процесів в зоні контакту та призводить до схоплювання контактних поверхонь: з підвищенням контактного навантаження до 700 МПа встановлено зменшення товщини мастильної плівки, перехід трибосистеми в напівсухий або граничний режими мащення, збільшення питомої роботи тертя, скорочення циклів напрацювання в умовах кочення з проковзуванням до прояву перших ознак схоплювання.

### Список літератури

1. Hsu S. M., Klaus E. E., Cheng H. S. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions, *Wear*, 1988, Vol. 128, № 3, P. 307-323.
2. Matveevsky R. M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact, *Wear*, 1992, Vol. 155, P. 1-5.
3. Lenahan P. M., Curry S. E. First observation of the (29) Si hyperfine spectra of silicon dangling bond centers in silicon nitride, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, Vol. 56, № 157, P. 207.
4. Warren O. L., Graham J. F., Norton P. R. [et al.] Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate, *Tribology Letters*, 1998, Vol. 4, P. 189-198.
5. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем, Минск: Беларус. навука, 2011, 380 с.
6. Буяновский И. А., Игнатъева З. В., Левченко В. А. [и др.] Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел, *Трение и износ*, 2008, Т. 29, № 4, С. 375-381.
7. Mikosyanchyk O., Mnatsakanov R., Zaporozhets A., Kostynik R. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, 4/1 (82), P. 24-31.

8. Ляшенко Я. А. Трибологические свойства режимов сухого, жидкостного и граничного трения / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 5. – С. 115-121.
9. Сагин С. В Исследование корреляционной взаимосвязи жидко-кристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей / С. В. Сагин // Судовые энергетические установки. – 2014 – № 33. – С. 67-76.
10. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours, Surface Science Reports, 1992, Vol. 14, № 3, P. 109-159.
11. Ляшенко Я. А., Хоменко А. В., Метлов Л. С. Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарногладкими твердыми поверхностями / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 120-126.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2020.

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56, E-mail: [mnatsakanov@ukr.net](mailto:mnatsakanov@ukr.net).

**Мікосянчик Оксана Олександрівна** – д. техн. наук, професор, професор кафедри цивільної та промислової безпеки, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: [oksana.mikos@ukr.net](mailto:oksana.mikos@ukr.net).

**Якобчук Олександр Євгенійович** – старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58, E-mail: [a-yak@ukr.net](mailto:a-yak@ukr.net)

**Хімко Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58, E-mail: [andreykhimko@ukr.net](mailto:andreykhimko@ukr.net)

R. G. MNATSAKANOV, O. O. MIKOSIANCHYK, O. YE. YAKOBCHUK, A. M. KHMKO

### EVALUATION OF THE LUBRICANT PARAMETERS IN THE CONDITIONS OF OIL STARVATION OF TRIBOCONTACT

The studies have been carried out to research tribotechnical properties of lithium lubricant based on a synthetic Aero Shell Grease 33 and Era VNIINP - 286M in the conditions of oil starvation under rolling with sliding. A program has been developed for receiving data via RS-232 channel. The program collects signal codes for calculating the thickness of lubricating layer, torque, speed, volumetric oil temperature, with further online conversion of signal codes into real physical quantities. A correlation has been established in terms of: reduction of the boundary layer thickness in 15 and 3.5 times and antifriction properties in 3.4 and 2.5 times for Era VNIINP-286M and Aero Shell Grease 33 lubricants respectively, with an increase in the contact load from 250 to 700 MPa. The intensification of the manifestation of the first adhesion signs in tribotechnical contact, due to the change of rheological parameters of the boundary layers of lubricants, has been analyzed. The performance of friction pairs in critical conditions depends on the resistance of the lubricating film to mechanical destruction due to the increase of the displacement velocity gradient in the investigated range of contact load. Reduction of the cycle periods of operating friction pairs in 15 and 9 times is caused by increase in displacement velocity gradient of boundary lubricant films in 20 and 3,5 times accordingly, under lubricating of contact surfaces with Era VNIINP-286M and Aero Shell Grease 33. The relationship between the degree of violation of the self-organization of dissipative structures and the specific friction work is determined. The destruction of the lubricating film is one of the leading factors that causes the intensification of energy processes in the contact zone. With the increase of the contact load up to 700 MPa, a decrease in the thickness of the lubricating film and the transition of the tribosystem to semi-dry or limited modes of lubrication is determined. Such conditions trigger the intensification of mechanical-chemical processes in the thin surface layers of the metal, and increase in the degree of their deformation changes. That leads to an increase in the specific friction work. The application of Aero Shell Grease 33 oil helps to reduce the specific friction work, on average, in 2-3 times.

**Keywords:** lithium lubricant, lubricating layer thickness, friction coefficient, specific friction work.

#### Referenses

1. Hsu S. M., Klaus E. E., Cheng H. S. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions, *Wear*, 1988, Vol. 128, № 3, P. 307-323.
2. Matveevsky R. M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact, *Wear*, 1992, Vol. 155, P. 1-5.
3. Lenahan P. M., Curry S. E. First observation of the (29) Si hyperfine spectra of silicon dangling bond centers in silicon nitride, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, Vol. 56, № 157, P. 207.
4. Warren O. L., Graham J. F., Norton P. R. [et al.] Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate, *Tribology Letters*, 1998, Vol. 4, P. 189-198.
5. Ermakov S. F. Trybolohyia zhydkokrystallicheskyykh nanomateryalov y system, Mynsk: Belarus. navuka, 2011, 380 s.
6. Bujanovskij I. A., Ignat'eva Z. V., Levchenko V. A. [i dr.] Orientacionnaja uporjado-chennost' granichnyh sloev i smazochnaja sposobnost' masel, *Trenie i iznos*, 2008, T. 29, № 4, S. 375-381.
7. Mikosyanchyk O., Mnatsakanov R., Zaporozhets A., Kostynik R. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, 4/1 (82), P. 24-31.
8. Liashenko Ya. A. Trybolohycheskye svoystva rezhymov sukhooho, zhydkostnooho y hra-nychnoho trenyia / Ya. A. Liashenko // *Zhurnal tekhnicheskoi fizyky*. – 2011. – T. 81, № 5. – S. 115-121.
9. Sagin S. V. Issledovanie korreljacionnoe vzaimosvjazi zhidko-kristallicheskij svojstv granichnyh smazochnyh sloev i reologicheskikh karakteristik motornyh masel sudovyh dizelej / S. V. Sagin // *Sudovye jenergeticheskie ustanovki*. - 2014 - № 33. - S. 67-76.
10. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours, *Surface Science Reports*, 1992, Vol. 14, № 3, P. 109-159.
11. Ljashenko Ja. A., Homenko A. V., Metlov L. S. Fenomenologicheskaja teorija plavljenja tonkoj plenki smazki mezhdum dvumja atomarnogladkimi tverdymi poverhnostjami / Ja. A. Ljashenko, A. V. Homenko, L. S. Metlov // *Zhurnal tehnichekoj fiziki*. – 2010. – T. 80, № 8. – S. 120-126.