

УДК 621.891

Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. О. МІКОСЯНЧИК, О. Є. ЯКОБЧУК, В. В. ТОКАРУК

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЛІНІЙНОГО ЗНОСУ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ

*Проаналізовано вплив контактного навантаження на триботехнічні властивості літійсвих мастил в нестационарних умовах тертя за умов припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту. Встановлено взаємозв'язок між інтенсифікацією деструкційних змін в граничному шарі мастильного матеріалу і деформаційних змін тонких поверхневих шарів металу. Дані процеси обумовлюють підвищення питомої роботи тертя трибоконтакту і збільшення зносу контактних поверхонь. Отримана емпірична залежність лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя, що враховує вплив контактного навантаження, питомої роботи тертя і товщини мастильного шару.*

**Ключові слова:** *товщина граничних шарів, коефіцієнт тертя, знос, питома робота тертя, літієве мастило*

**Вступ та постановка задач досліджень.** Руйнування граничних мастильних шарів при терті відбувається при критичному тиску в контакті. Даний процес по-різному проявляється в зоні фрикційного контакту і часто призводить до різкого зростання коефіцієнту тертя і підвищення інтенсивності зношування. Величина критичного тиску в рівній мірі залежить як від складу мастильного матеріалу, так і від фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей активованого тертя металу. Управління процесами поверхневої активності контактних поверхонь в процесі їх активації при терті, застосування мастильного матеріалу з поверхнево-активними речовинами, протизношувальними і антизадирними присадками, антифрикційними добавками може забезпечити значне підвищення критичного тиску і початкової температури руйнування граничного шару і вторинних структур, що буде сприяти подовженню терміну експлуатації пар тертя.

У роботах [1; 2] визначено, що існує оптимальний діапазон прояву ефективних змащувальних 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 реагуючої системи [3; 4].

Властивості граничних шарів мастильних матеріалів значно відрізняються від їх об'ємних характеристик, що обумовлено надмолекулярною самоорганізацією граничних плівок. Такі шари відіграють значну роль в процесах дисипації енергії в вузлах тертя, що працюють в діапазоні змішаного і граничного режимах тертя. Тип поверхні і склад матеріалу пар тертя визначають характер і інтенсивність взаємодії на межі розділу тверде тіло - рідина. Однак, 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 створюють умови роботи триботехнічних елементів, і, зокрема, кі-

нематичний фактор. 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, які представляють собою впорядковані твердокристалічні ретикулярні структури шаруватого типу.

Удосконалення контрольно-вимірвальних приладів і стрімкий розвиток обчислювальної техніки забезпечують реальну можливість вперше досліджувати трибологічні процеси утворення дисипативних структур при терті на атомарному і молекулярному рівнях. Наприклад, комплекс SFA дозволяє вимірювати товщину плівки до 0,1 нм і фіксувати вкрай малі поверхневі сили [8; 9]. Значні переваги даного комплексу дозволяють використовувати його в якості основного інструменту при дослідженні реологічних, мастильних і антифрикційних властивостей трибоконтакту на нанорівні [10].

Таким чином, виникає необхідність в розробці принципово нових методик оцінки кінетики зміни триботехнічних характеристик мастильних матеріалів і вторинних структур в процесі контактної взаємодії. 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.

**Метою досліджень** було встановлення впливу контактного навантаження на триботехнічні властивості літєвих мастил в нестационарних умовах тертя в умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту.

**Методика проведення експерименту.** Експерименти проводилися на установці СМЦ-2 з реєстрацією показників трибоконтакту в режимі online. Момент тертя, частота обертання роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в змащувальному шарі в контакті записуються і обробляються на ПК в реальному масштабі часу з графічним зображенням їх змін.

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

Контактне навантаження по Герцу становило 250, 400, 550 і 700 МПа. Перші 300 циклів роботи пар тертя здійснювалися шляхом занурення нижнього ролика в ванночку з мастилом і періодичного намазування мастила на ролик. Це сприяло достатній подачі мастила в зону контакту і не допускало переходу трибосистеми в граничний режим мащення. Подальші дослідження проходили в умовах, при яких подача мастильного матеріалу припинялася. З 300 циклу напрацювання ванночка забиралася, мастило видалялося з контактних поверхонь (примусово витиралося). Таким чином, триботехнічні властивості мастила в створених експериментальних умовах масляного голодування обумовлені мастильними, антифрикційними і протизношувальними властивостями граничних плівок, сформованих в процесі тертя на активованих поверхнях металу.

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

### Результати досліджень та їх обговорення.

У даній роботі представлені і проаналізовані результати досліджень тільки після 300 циклу напрацювання, при переході трибосистеми в режим масляного голодування. З підвищенням  $\sigma_{\max}$  с 250 до 700 МПа істотно знижується несуча здатність мастильного граничного шару, товщина якого зменшується в 15 і 3,5 разів при змащуванні поверхонь мастилами ВНІНП – 286М і Aero Shell Grease 33 відповідно (рис. 1).

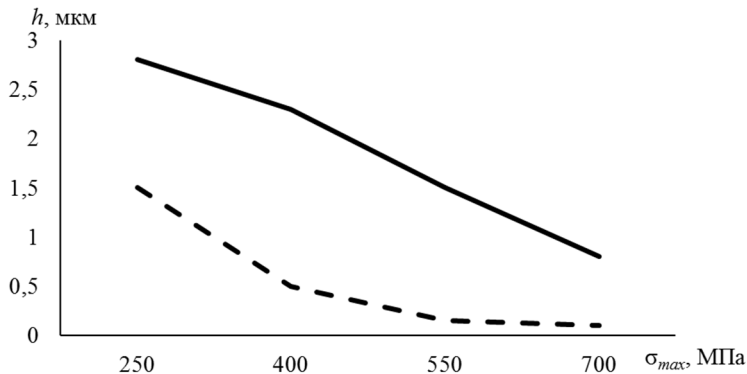


Рис. 1. Вплив контактної навантаження на товщину граничних мастильних шарів:  
 - - - - - ВНІНП -286М ————— Aero Shell Grease 33

Мастило Aero Shell Grease 33 характеризується більш ефективними змащувальними властивостями, в порівнянні з досліджуваним мастилом Ера ВНІНП-286М. Особливо це проявляється при навантаженнях, що перевищують 400 МПа. Якщо при  $\sigma_{\max}$  250 МПа товщина граничних плівок, сформованих компонентами синтетичного мастила Aero Shell Grease 33, в 1,9 разів перевищує товщину граничних плівок мастила ВНІНП-286М, то при  $\sigma_{\max}$  550 – 700 МПа цей показник збільшується в 8 – 10 разів.

Зниження товщини мастильного шару обумовлює, насамперед, кореляційне зменшення антифрикційних властивостей досліджуваних мастильних матеріалів. Однак, зміни коефіцієнта тертя з підвищенням навантаження не настільки істотні. У досліджуваному діапазоні навантажень коефіцієнт тертя знижується в 3,4 і 2,5 разів для мастил ВНІНП-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 в фрикційному контакті [11].

Механічна деструкція граничних шарів відбувається внаслідок різкого підвищення градієнта швидкості зсуву мастильної плівки ( $\gamma$ ), який, згідно з [12], представляє відношення швидкості ковзання в контакт до товщини мастильної плівки. Якщо при змащуванні пар тертя ВНІНП-286М з підвищенням навантаження з 250 до 700 МПа градієнт швидкості зсуву мастильних шарів збільшується в 20 разів, то при використанні Aero Shell Grease 33 даний параметр збільшується в 3,5 разів (табл. 1).

Таблиця 1

**Зміна градієнта швидкості зсуву мастильних шарів і кількість циклів  
напрацювання пар тертя до прояву ознак схоплювання**

Мастильний матеріал	Контактне навантаження, МПа			
	250	400	550	700
	Градiєнт швидкості зсуву мастильної плівки, с <sup>-1</sup>			
Ера ВНІНП-286М	1,4 · 10 <sup>5</sup>	4,2 · 10 <sup>5</sup>	1,4 · 10 <sup>6</sup>	2,9 · 10 <sup>6</sup>
Aero Shell Grease 33	7,5 · 10 <sup>5</sup>	9,1 · 10 <sup>4</sup>	1,4 · 10 <sup>5</sup>	2,6 · 10 <sup>5</sup>
	Кількість циклів напрацювання пар тертя до схоплювання			
Ера ВНІНП-286М	300	80	50	20
Aero Shell Grease 33	900	150	130	100

Отже, мастило Aero Shell Grease 33 характеризується більш ефективними змащувальними властивостями, а її синтетичні компоненти за реологічними характеристикам є більш стабільними до збільшення градієнта швидкості зсуву, в порівнянні з компонентами мастила ВНІНП-286М. Стійкість мастильної плівки до механічної деструкції внаслідок збільшення градієнта швидкості зсуву є визначальним фактором, що забезпечує нормальну працездатність пар тертя в критичних умовах. У таблиці зазначена кількість циклів напрацювання 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 напрацювання трибосистеми – в досліджуваному діапазоні контактних навантажень працездатність пар тертя знижується в 15 і 9 разів відповідно при змащуванні контактних поверхонь ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33.

Руйнування мастильної плівки при терті є одним з провідних чинників, що обумовлюють 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 екрануючої плівки мастильного матеріалу, що проявляється в підвищенні питомої роботи тертя.

При  $\sigma_{\max}$  250 МПа, згідно розрахункової залежності 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 мастильної дії при використанні мастил 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. Це, насамперед, сприяє зменшенню як зовнішніх силових впливів, так і поверхневої деформації тонких шарів металу. Показники питомої роботи тертя ( $A_{mp}$ ) становлять, в середньому, 3200 і 1000 Дж/мм<sup>2</sup> при змащуванні пар тертя 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 ВНІНП – 286М і Aero Shell Grease 33 відповідно. За таких умов тертя інтенсифікуються механо-хімічні 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 змащуванні сталі мастилом 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. 2). Застосування синтетичного мастила Aero Shell Grease 33 сприяє зниженню питомої роботи тертя, в середньому, в 2 – 3 рази, в порівнянні з ВНІНП-286М.

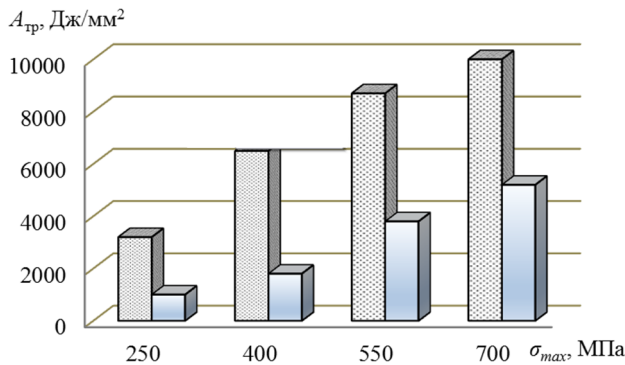




Рис. 2. Зміна питомої роботи тертя в контактї в умовах підвищення контактного навантаження:  – ВНІНП - 286М;  – Aero Shell Grease 33

Саме стабільність дисипативних структур при їх самоорганізації в динамічних умовах навантаження є визначальним фактором працездатності трибосистеми. Товщина мастильної плівки на рівні 1,5 – 3 мкм обумовлює реалізацію еласто- і гідродинамічних режимів мащення, прояв ефективних антифрикційних властивостей ( $f$  в межах 0,01 – 0,015) та низьку питому роботу тертя ( $A_{тр}$  становить 1000 – 3200 Дж/мм<sup>2</sup>) при  $\sigma_{max}$  250 МПа. Зазначені процеси сприяють напрацюванню трибосистеми в умовах масляного голодування в межах 300 – 900 циклів в залежності від типу мастильного матеріалу (табл. 1). 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 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.

Крім розглянутих вище змащувальних і антифрикційних властивостей мастила Aero Shell Grease 33, даний мастильний матеріал характеризується більш ефективними протизношувальними властивостями, в порівнянні з мастилом ВНІНП-286М аналогічного експлуатаційного призначення. Експериментально встановлено зниження загального лінійного зносу випереджаючої і відстаючої поверхонь в 1,3 і 1,7 разів при  $\sigma_{max}$  250 і 700 МПа відповідно при змащуванні пар тертя мастилом Aero Shell Grease 33, в порівнянні з ВНІНП-286М (рис. 3).

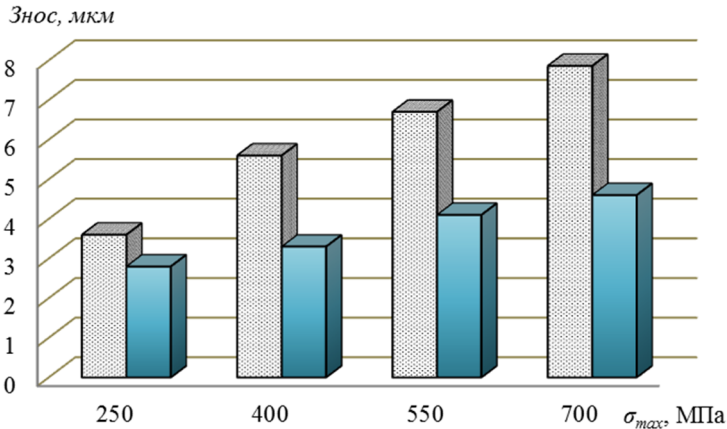




Рис. 3. Загальний лінійний знос випереджаючої і відстаючої поверхонь в нестационарних умовах тертя:  – ВНІІП - 286М;  – Aero Shell Grease 33

Аналіз експериментальних даних триботехнічних характеристик досліджуваних мастил показав найбільший вплив на знос таких параметрів, як контактне навантаження ( $\sigma_{max}$ ), питома робота тертя ( $A_{mp}$ ) і товщина мастильного шару ( $h$ ). На підставі цього отримана емпірична залежність лінійного зносу пар тертя ( $L_{lin}$ ) від зазначених параметрів:

$$L_{lin} = \frac{\sigma_{max}^{0,1} \cdot A_{тр}^{0,1}}{h^{0,2}} \quad (1)$$

Отримані розрахункові значення  $L_{lin}$  за формулою (1) характеризуються високим рівнем збіжності з вимірюваними показниками лінійного зносу з використанням методу штучних баз (прилад ПМТ-3) – відхилення експериментальних значень зносу пар тертя і одержаних за формулою (1) становлять до 5%, що свідчить про якісну апроксимацію запропонованої залежності оцінки лінійного зносу контактних поверхонь в критичних умовах роботи.

### Висновки:

1. Запропоновано емпіричну залежність прогнозування максимального лінійного зносу контактних поверхонь в критичних умовах тертя від контактного навантаження, питомої роботи тертя і товщини мастильного шару.

2. Проведена якісна і кількісна оцінка процесу переходу роботи трибосистеми в режим масляного голодування, який характеризується інтенсифікацією деструкційних змін в граничному шарі мастильного матеріалу і деформаційних змін тонких поверхневих шарів металу, що призводять до підвищення питомої роботи тертя трибоконтакту і збільшення зносу контактних поверхонь.

### Список літератури

1. Hsu S. M. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions / S. M. Hsu, E. E. Klaus, H. S. Cheng // Wear. – 1988. – Vol. 128, № 3. – P. 307-323.
2. Matveevsky R. M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact / R. M. Matveevsky // 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 / P. M. Lenahan, S. E. Curry // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 56, № 157. – P. 207.
4. Warren O. L. Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate / O.L. Warren, J.F. Graham, P.R. Norton [et al.] // Tribology Letters. – 1998. – Vol. 4. – P. 189-198.

5. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем / С.Ф. Ермаков. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 380 с.

6. Буяновский И. А. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И.А. Буяновский, З.В. Игнатьева, В.А. Левченко [и др.] // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 4. – С. 375-381.

7. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

8. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours / J. Israelachvili // Surface Science Reports. – 1992. – Vol. 14, № 3. – P. 109-159.

9. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces, 3-rd ed. / J. N. Israelachvili – USA: Academic Press, 2011. – 674 p.

10. Yoshizawa H. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules / H. Yoshizawa, J. Israelachvili // J. Physical Chemistry. – 1993. – Vol. 97, № 43. – P. 11300-11313.

11. Ляшенко Я. А. 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.

12. Порохов В. С. Трибологические методы испытания масел и присадок / В.С. Порохов. – М.: Машиностроение, 1983. – 183 с.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2018

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – д. техн. наук, професор, професор кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 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, доцент, професор кафедри цивільної та промислової безпеки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 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 технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58, E-mail: [ayak@ukr.net](mailto:ayak@ukr.net)

**Токарук Віталій Володимирович** – старший викладач кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56

---

*R.G.MNATSAKANOV, O.A. MIKOSIANCHYK, O. Ye. YAKOBCHUK, V.V. TOKARUK*

### **FORECASTING OF THE MAXIMUM LINEAR WEAR OF CONTACT SURFACES IN EXTREME FRICTION CONDITIONS**

The influence of the contact voltage on the tribotechnical properties of lithium lubrications under unsteady friction conditions at the termination of the supply of lubricant to the contact zone is analyzed. The interrelation between the intensification of destructive changes in the boundary layer of a lubricant and deformation changes of thin surface metal layers is established. These processes cause an increase in the energy density of the tribocontact and an increase in the wear of the contact surfaces. An empirical dependence of the linear wear of the contact surfaces under extreme friction conditions is obtained, taking into account the influence of the contact load, the specific work of friction and the thickness of the lubricant layer. The studies were conducted on samples of steel 30XГСА (HRC 35) under conditions of lubrication of the surface with lithium greases based on Aero Shell Grease 33 and Epa BHHHHI - 286M. Aero Shell Grease 33 is characterized by more efficient lubricating properties, and its synthetic components with rheological characteristics are more stable to an increase in the shear rate gradient, compared to the components of Epa BHHHHI -286M lubricant. The destruction of a lubricating film under friction is one of the leading factors determining the intensification of the energy processes occurring in the contact zone. First of all, this is manifested in the violation of the structural adaptability of the contact surfaces and the lubricant in critical conditions of friction, the destruction of previously formed metastable structures. The transition of the tribosystem to the thermodynamically unstable state is characterized, first of all, by a sharp activation of the metal due to the concentration of stresses in the local areas of the frictional contact at the places of destruction, which shields the lubricant film, manifested in an increase in the specific work of friction. It was established experimentally that the lubricant Aero Shell Grease 33 is characterized by more effective anti-wear properties, compared to the lubricant Epa BHHHHI-286M of similar operational purpose.

**Keywords:** boundary layer thickness, friction coefficient, wear, specific friction work, lithium lubricant

### **References**

1. Hsu S. M. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions / S. M. Hsu, E. E. Klaus, H. S. Cheng // *Wear.* – 1988. – Vol. 128, № 3. – P. 307-323.
2. Matveevsky R. M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact / R. M. Matveevsky // *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 / P. M. Lenahan, S. E. Curry // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – Vol. 56, № 157. – P. 207.
4. Warren O. L. Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate / O.L. Warren, J.F. Graham, P.R. Norton [et al.] // *Tribology Letters.* – 1998. – Vol. 4. – P. 189-198.
5. Ermakov S. F. Tribologija zhidkokristallicheskih nanomaterialov i sistem / S.F. Ermakov. – Minsk: Belarus. navuka, 2011. – 380 s.
6. Bujanovskij I. A. Orientation ordering of boundary layers and lubricity of oils / Ignatieva Z.V., Levchenko V.A., Matveenکو V.N. // *enie i iznos.* – 2008. – T. 29, № 4. – S. 375-381.
7. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.
8. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours / J. Israelachvili // *Surface Science Reports.* – 1992. – Vol. 14, № 3. – P. 109-159.



---

9. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces, 3-rd ed. / J. N. Israelachvili – USA: Academic Press, 2011. – 674 p.

10. Yoshizawa H. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules / H. Yoshizawa, J. Israelachvili // J. Physical Chemistry. – 1993. – Vol. 97, № 43. – P. 11300-11313.

11. Ljashenko Ja. A. Fenomenologicheskaja teorija plavljenija tonkoj plenki smazki mezhdvu dvumja atomarnogladkimi tverdymi poverhnostjami / Ja.A. Ljashenko, A.V. Homenko, L.S. Metlov // Zhurnal tehniczeskoj fiziki. – 2010. – T. 80, № 8. – S. 120-126.

12. Porohov V. S. Tribologicheskie metody ispytanija masel i prisadok / V.S. Porohov. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 183 s.