

*М. В. Кіндрачук, д-р техн. наук, проф.,
В. І. Дворук, д-р техн. наук, проф.,
Е. А. Кульгавий, канд. техн. наук., старш. наук. співроб.,
Ю. Л. Хлевна, асп.*

ПРОЦЕСИ ПРИПРАЦЮВАННЯ В ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

Національний авіаційний університет, e-mail: yuliya-khlevna@yandex.ru

Представлено короткий аналіз дослідження процесу припрацювання. Встановлено невідповідність механістичних уявлень етапу припрацювання. Представлена атомно-молекулярна модель трибологічного контакту. З допомогою рівняння переносу Больцмана отримано експоненціальний вираз для припрацювання. Визначені основні характеристики припрацювання.

Загальна постановка проблеми та аналіз не вирішених проблем. Кожна трибологічна система може знаходитись в одному з трьох станів: еволюційному – на етапі припрацювання, стаціонарному – режимі нормальної роботи та аномальному – стан відмов [1].

Початкова якість поверхні, отримана при обробці деталей машин, має характеристики, як правило, відмінні від характеристик робочого стану, який формується у процесі експлуатації. Тому на початку роботи машин виникають процеси трансформації і переходу від вихідного стану якості поверхні до експлуатаційного – стаціонарного стану, тобто відбуваються зміни геометрії та фізико-хіміко-механічних властивостей тонких поверхневих шарів, в контакті формуються структури дисипативного типу. Перехід від початкового стану до робочого називається припрацюванням, яке відбувається в період початкового зношування [2].

Для досягнення необхідного ефекту вузли тертя, в початковий період піддають спеціально обраному режиму роботи, за якого в найкоротший термін досягається необхідна якість.

В основі даного періоду роботи лежать складні механічні, фізичні та хімічні явища. До кінця цього процесу основні параметри якості поверхні, наприклад шорсткість, мікротвердість, величина залишкових напружень, структура граничного шару металу та інші, взаємо-

пов'язано набувають значення, що відповідають даним умовам зношування або експлуатації. Комплексно параметри якості поверхні в період нормального зносу самопідтримуються [3]. Тобто процес припрацювання багато в чому визначає загальну довговічність деталей.

Досвід експлуатації показує, що процес припрацювання можна оптимізувати через комбінацію ступінчастості або безперервності припрацювання, а також стадіями (холодна обкатка, гаряча обкатка на холостому ході і під навантаженням, експлуатаційна обкатка). Якщо врахувати, що зазначені фактори можуть перебувати в самих різноманітних поєднаннях, то стане зрозумілим, наскільки складними є дослідження процесів припрацювання поверхонь тертя трибовузлів.

Велика кількість досліджень, присвячених даному питанню різних агрегатів, свідчить про те, що ця технологічна операція відіграє важливу роль у підвищенні надійності та поліпшенні економічних показників в експлуатації, як при виготовленні нових деталей так при ремонті.

У більшості робіт автори ставлять за мету розробити методику оптимального проведення припрацювання. Але немає досконало визначених закономірностей впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на цей процес.

Критерій, за яким оптимізується методика, є якість припрацювання поверхонь, що труться при їх мінімальному початковому зносі. Також дуже часто в якості критерію оптимізації є економічний ефект від зниження витрат на припрацювання [4]. Наприклад витрати на припрацювання двигуна визначаються в основному тривалістю процесу припрацювання і кількістю витрачених матеріалів (палива, змащувальних рідин тощо).

Метою припрацювання є отримання поверхні тертя з такими фактичними площами контактів, які здатні витримати експлуатаційні навантаження. Тобто взаємна трибообробка вузлів тертя до сталого зносу. Реалізація даної мети можлива при визначенні механізму припрацювання трибологічних систем (ТС). Наприклад, після проведення припрацювання двигун буде підготовлений до віддачі 100 % номінальної потужності. У разі відмови від припрацювання і повного навантаження двигуна після заводського складання, вже після 100 год роботи знос циліндрів досягає значень, еквівалентних 10–20 тис. км пробігу автомобіля [5].

Однак шляхи реалізації цієї мети достатньо не розроблені. В більшості робіт розглядається механістичний підхід до обкатки ТС. Але стійка робота визначається станом поверхневих шарів пари тертя, утворених в період припрацювання.

Мета роботи – аналіз механізму припрацювання, з урахуванням як механістичного, так і атомно-молекулярного підходу вивчення трибосистем.

Аналіз механістичних уявлень процесу припрацювання. Еволюційний етап ділиться на дві фази: 1) інтенсивне припрацювання на макрорівні; 2) на мікрорівні. На початковому етапі важливу роль відіграють шорсткість, пластична деформація, навантаження системи [6].

Пластична деформація поверхневих шарів елементів трибосистем викликає непоправні пошкодження. Пошкодження окремих структурних складових (переважно твердих фаз), розташованих на окремих ділянках пар тертя; пошкодження на більшій частині поверхні тертя. На самій поверхні знаходиться активний поверхневий шар, далі йде підповерхневий шар. Товщина активного шару становить від часток мікрона до десятків мікрон, а підповерхневого – до кількох міліметрів. Шари представляють єдиний ансамбль фрикційної взаємодії контактуючих тіл. Незалежно від режимів тертя і матеріалів активний поверхневий шар бере участь у фізико-хімічних трибореакціях. В ряді випадків забезпечує граничний режим мащення [7].

Якщо пластична деформація протікає в тонких поверхневих легко рухливих шарах, то робота сполученої пари проходить без задирів. Цьому сприяють спеціально нанесені покриття з м'яких металів, з шарів твердих мастил, полімерні покриття або використання самозмашувальних сплавів, композиційних матеріалів. Особливості роботи самозмашувальних матеріалів передбачають взаємодію м'яких фаз і твердої матриці в процесі пружної і пластичної деформацій. При використанні гетерогенних сплавів з м'якою фазою в процесі припрацювання найбільш інтенсивно, ніж у стаціонарний період, відбувається видавлювання цієї фази внаслідок відмінності меж текучості складових і різного ступеня пластичної деформації при напругах вище межі плинності матриці і м'якої фази. Утворені за рахунок перенесення металу з

м'якої фази тонкі захисні плівки здатні створювати своєрідну зміцнену зону на сполучених поверхнях.

Однією з основних умов завершення процесу припрацювання прийнято вважати перехід вихідної технологічної шорсткості до експлуатаційної. Експериментальні дослідження [2; 8] показали, що після закінчення припрацювання на поверхні тертя формується шорсткість, яка не залежить від вихідної, отриманої при механічній обробці, а залежить тільки від умов зношування.

Є роботи [2; 9], де досліджується тільки шорсткість, що утворюється в процесі припрацювання, і підтверджується правомірність використання терміну «рівноважна шорсткість».

Значення рівноважної шорсткості залежить від навантаження, прикладеного до вузла тертя, швидкості ковзання і властивостей матеріалів пари тертя [9]. Поверхня змінює свою шорсткість до досягнення мінімуму коефіцієнта тертя, що відповідає мінімальній енергії тертя. Вихідна шорсткість в основному впливає на час припрацювання [10]. Закономірності утворення і розрахункові характеристики рівноважної шорсткості представлені у працях І.В. Крагельського та ін.

Дослідження зміни мікротвердості в процесі припрацювання [9] показали, що період припрацювання закінчується після досягнення поверхнею тертя певної міри наклепу.

Припрацювання трибологічної системи при дотриманні режимів, які наближаються до критичних (за І.І.Карасиком на «межі заїдання») відбувається із зниженням в часі показників Зоммерфельда і коефіцієнта тертя на залежності Герсі-Штрібека. При цьому діапазон регулювання навантаження та швидкості не виходить за межі напіврідинного мащення. Залежно від типу пари тертя несуча здатність істотно відрізняється. Так, було встановлено, що при закінченні припрацювання рівень несучої здатності алюмінієвих сплавів, які містять більше 9 % олова, значно перевершує максимальні навантаження до заїдання свинцевих бронз марок БрСЗО [11].

Приприпрацювання ТС визначається ступенем її завершеності на кожному навантажувально-швидкісному режимі та після його закінчення. Повнота проходження процесу визначається навантажувальною здатністю трибосистем, енергетичними показниками (ККД передач, зниженням витрати палива, втрат на тертя тощо), стабілізацією інтенсивності зношування, фрикційною теплостійкістю та ін.

Зміна властивостей деформованих поверхонь обумовлена самою природою тертя, особливостями перетворення механічної енергії в теплову. Процес пристосування пар тертя в період припрацювання є енергетичним, оскільки він протікає з поглинанням або виділенням енергії контактуючими поверхнями [6].

Атомно-молекулярний підхід до процесу припрацювання. З позиції термодинаміки, на еволюційному етапі атоми, що знаходяться на межі розділу двох фаз, є «особливими» як за положенням в несиметричному силовому полі, так і за своїм енергетичним станом. Дійсно, створення нової поверхні вимагає витрат роботи щодо розриву зв'язків, значна частина якої накопичується у вигляді надлишкової потенційної енергії на міжфазній границі [1].

Водночас, як показав М.А. Буше, здійснюється самоорганізація трибологічної системи в результаті структурної пристосовності при терті. У формуванні потоків речовини основну роль відіграють процеси переносу і самоорганізації, які призводять до утворення в контакті трибологічних структур дисипативного типу. Механізм утворення цих структур визначається організуючою дією нерівноважних станів на потоки речовини [1]. Формування потоків речовини в трибологічному контакті визначається явищами переносу на атомному рівні.

При координаційному числі кристалічної ґратки рівної восьми, поверхневі атоми мають від семи до одного зв'язку з внутрішніми атомами твердого тіла і від одного до семи вільних зв'язків, енергія яких формує надлишкову поверхневу енергію твердих тіл. В контакті, між атомом однієї поверхні і атомами контртіла можуть утворитися від одного до семи зв'язків. Якщо кількість зв'язків з атомами контртіла перевищує кількість внутрішніх зв'язків, то при відносному русі твердих тіл, атом переноситься на іншу поверхню. При терті відбувається безперервне перенесення атомів між поверхнями, ці активні атоми вступають у хімічний зв'язок з атомами контртіла і мастила. Міжатомний зв'язок розглядається не в сенсі реального фізичного об'єкта, а як результат динамічного перерозподілу густини ймовірності електронних станів, внаслідок якого, виникають електричні сили тяжіння, відштовхування або нейтральний стан.

На еволюційному етапі переважає прагнення вільної енергії до мінімуму. У контакті відбувається агрегація частинок, які переносяться, внутрішні потоки речовини спрямовані на формування трибостру-

ктури і збільшення її об'єму, а потік речовини із системи зменшується, поки не досягне стаціонарного рівня. У стаціонарному стані трибоструктура флюктує біля середнього значення. Протягом однієї флюктуації частина речовини виходить із системи у вигляді продуктів зношування, а потім трибоструктура відновлюється.

Отже, в процесі припрацювання формуються трибологічні структури, потім процес флюктується в стаціонарному режимі з постійними середнім і дисперсією, надмірний ріст обмежений ентропією, а нижній рівень – вільною енергією [1]. Формули для швидкості зносу $i_t = dl/dt$ та зносу $I(t)$, як функції часу t , мають вигляд:

$$i_t(t) = (i_0 - \langle i_t \rangle) \exp(-t/T) + \langle i_t \rangle \quad (1)$$

$$I(t) = (i_0 - \langle i_t \rangle) T [1 - \exp(-t/T)] + \langle i_t \rangle t \quad (2)$$

де i_0 та $\langle i_t \rangle$ – початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зносу; T – час релаксації припрацювання; $I(t)$ – знос.

Замінивши у формулах (1) і (2) час t на шлях тертя l , отримаємо формулу для інтенсивності зносу il і зносу $I(l)$ по шляху тертя. Експоненти в лівій частині описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації T , а внесок припрацювання у знос – функціонал $I_0 = (i_0 - \langle i_t \rangle) T [1 - \exp(-t/T)]$. На еволюційному етапі припрацювання трибосистеми переходять зі стану, що задається технологією в стан, що визначається самим процесом.

Висновки. При традиційному механістичному підході, механізм припрацювання визначають деформації та руйнування поверхневих шарів контактуючих твердих тіл. Це не відповідає реальним умовам трибологічного контакту в антифрикційних системах. В експлуатації всі види руйнування поверхні, поява металевих частинок в продуктах зношування розглядаються як ознаки відмов.

Продукти зношування складаються з нанорозмірних частинок, кінцевих продуктів фізико-хімічних перетворень: окислів, сульфідів, фосфатів, коксів та інших.

Запропонований механізм припрацювання, в якому основну роль відіграє синтез, в процесі якого формуються молекули, кластери, нанорозмірні частинки.

В нерівноважних умовах трибологічного контакту, в процесі обміну з навколишнім середовищем, речовиною, енергією, частин-

ки формуються в структури дисипативного типу, які визначають рівень трибологічних процесів.

Застосувавши рівняння переносу Больцмана, отримано аналітичний вираз для еволюційного процесу припрацювання експоненціального типу. Основними характеристиками припрацювання є час припрацювання та зношування від початкового етапу.

Управління рівнем характеристик, можливе з допомогою зовнішніх факторів (збільшення навантаження в процесі) та внутрішніх (структурою твердих тіл та мастила)

Список літератури

1. *Кульгавый Э. А.* Триботехнические характеристики и их применение // Проблемы трибологии. – Вып. №3. – 2003. – С. 51–61.
2. *Костецкий Б.И.* Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колисниченко. – Киев : ТЕХНІКА, 1969. – 214 с.
3. *Комбалов В.С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В.С. Комбалов. – М. : Наука, 1974. – 112 с.
4. *Зелинский В.В.* Новое о механизмах приработки антифрикционных подшипниковых материалов/ Современные материалы и технологии – 2002. Сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза, 2002. С. 141–144
5. *Кузьменко А.Г.* Износ узлов трения двигателей при граничной смазке (обзор) / А.Г. Кузьменко, О.П. Бабак. // Проблемы трибологии. №3 – 2007. – С. 61 – 93.
6. *Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С.* Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. –Пенза: Изд-во Пенз., 2006. –248с
7. *Панкрашев А. С.* Интенсификация процессов приработки цилиндрично-поршневой группы отремонтированных дизельных двигателей путем финишной обработки гильз цилиндров антифрикционными материалами – автореферат кандидата технических наук 05.20.03 Санкт-Петербург-Пушкин 2010, – 20с.
8. *Комбалов, В.С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В.С. Комбалов. – М. : Наука, 1974. – 112 с.
9. *Ящерицын П.И.* Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 221 с.
10. *Дроздов Ю.Н.* Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел // Трение и износ. Т.1. –1980. –N 3. С.417–424.

11. *Карасик И.Н.* Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения: Дисс. доктора техн. наук: И.Н. Карасик. М., 1983. – 450 с.

Киндрачук М.В., Дворук В.И., Кульгавый Э.А., Хлевна Ю.Л. **Процессы приработки в трибологических системах** // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.25–32.

Представлен краткий анализ исследования процесса приработки. Установлено несоответствие механистических представлений этапа приработки. Представлена атомно-молекулярная модель трибологических контакта. С помощью уравнения переноса Больцмана получено экспоненциальное выражение для приработки. Определены основные характеристики приработки.

Список лит.: 11 наим.

Kindrachuk M.V., Dvoruk V.I., Kulgaviy E.A., Khlevna Y.L. **Burnishing in tribological systems**

This paper presents a brief analysis of the research process burnishing. Discrepancy is found, mechanistic views burnishing stage. Represented by the atomic-molecular model of the tribological contact. With the help of the Boltzmann transport equation obtained by the exponential expression for the break-in. The main characteristics of the running.

Ключові слова: припрацювання, трибологічний контакт, структури дисипативного типу.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2011