

Лекція 10

РЕЖИМИ МАЩЕННЯ

План

- 10.1. Загальні характеристики режимів мащення.
- 10.2. Гідродинамічний режим мащення.
- 10.3. Еластогідродинамічний режим мащення.
- 10.4. Режим змішаного мащення.
- 10.5. Граничний режим мащення.

10.1. Загальні характеристики режимів мащення

Крива Штрибека і режими мащення. Трібологічні процеси, тобто процеси контакту, тертя і зношування, як правило, пов'язані з безпосередніми фізичними взаємодіями між здійснюючими відносний рух поверхнями. На всі ці процеси впливає мастильний матеріал, призначення якого полягає в поділі рухомих відносно одна одної поверхонь плівкою матеріалу, здатного піддаватися зсуву з малим опором і без будь-яких ушкоджень поверхонь.

Товщина і характер змащувального шару визначає вид мащення і тим самим, тертя. У залежності від товщини плівки мащення (від десятих часток міліметра до декількох нанометрів), розподілу висот нерівностей у плівці мащення і ступеня геометричного прилягання можна виявити різні режими мащення, що зручно обговорити, розглядаючи криву Штрибека. У період з 1900 –1902 р. Г. Штрибек провів численні експерименти з тертям підшипників ковзання і кочення. Він виміряв коефіцієнт тертя в залежності від навантаження N , швидкості V і температури T . Щоб виключити вплив на результати залежності в'язкості від температури, Штрибек перерахував і виміряв коефіцієнт тертя у функції навантаження і швидкості при постійній об'ємній температурі оливи 25 °С. Точні виміри Штрибека послужили основою для теоретичних досліджень гідродинамічних підшипників Зомерфельда, Гюмбеля та їхніх послідовників.

Тепер загальновизнано, що крива Штрибека являє собою загальну характеристику змазаних поверхонь, що рухаються, у залежності від в'язкості оливи η , швидкості V і нормального навантаження N (або тиску p). На рис. 10.1 показана крива Штрибека в спрощеному вигляді як функція параметру $\eta \cdot V/N$. Цей параметр пов'язаний з величиною, зворотною числу Зомерфельда S_0 .

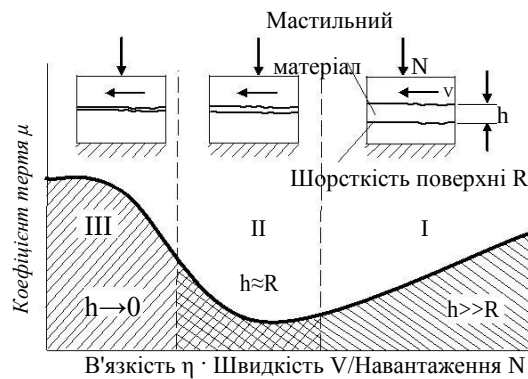


Рис. 10.1. Крива Штрибека і режими мащення

У залежності від форми поверхонь тертя, матеріалів, робочих умов і проміжку h між поверхнями можна виділити три головних режими мащення:

- I. Гідродинамічне мащення (або еласто-гідродинамічне (ЕГД) мащення).
- II. Змішане мащення.
- III. Граничне мащення.

У режимі I тверді поверхні розділені безперервною плівкою рідини, товщина якої набагато більше рівня шорсткості поверхонь R_a . Опір руху обумовлений внутрішнім тертям рідини. У цьому режимі трибологічна поведінка системи визначаються реологією рідини і може бути розрахована або оцінена методами механіки рідин. Якщо розглянута система складається з погано прилягаючих зосереджених контактів, то варто також враховувати пружну деформацію (Герца) поверхонь і залежність в'язкості рідини від тиску. У результаті одержуємо режим пружнодинамічного мащення. Оскільки в режимі I немає прямих фізичних контактних взаємодій між поверхнями, то процеси зношування відсутні (крім поверхневого утомного зношування, кавітаційного зношування, рідинної ерозії або абразивного зношування через наявність в рідині абразивних часток).

Якщо в умовах гідродинамічного або ЕГД – мащення знижується в'язкість рідини або швидкість, чи зростає навантаження, то плівка рідини стає "тоншою" і зазор між поверхнями зменшується. Коли з'являються перші контактні взаємодії нерівностей, виникає режим II – часткове ЕГД–мащення, або змішане мащення. У цьому режимі навантаження сприймається частково плівкою рідини, частково контактуючими нерівностями поверхонь. Отже, у цьому режимі опір тертя складається в основному з опору зсуву плівки мащення і частково з взаємодій нерівностей. У режимі II у принципі можливі всі механізми зношування.

Якщо умови роботи системи в режимі II на рис. 10.1 зрушуються вліво по кривій Штрибека, то кількість взаємодій нерівностей у межах площі контакту зростає, а товщина плівки зменшується до декількох мономолекулярних шарів і менше. У III режимі граничного мащення об'ємні реологічні властивості речовини мащення стають менш важливими, а навантаження майже цілком сприймається деформацією нерівностей. Очевидно, що в режимі III фізико-хімічні взаємодії на поверхнях розподілу тверде тіло – рідина – тверде тіло визначають характер тертя і зношування в системі.

10.2. Гідродинамічний режим мащення

Гідродинамічний режим мащення - це вид змащувальної дії, при якому здійснюється повне розділення поверхонь тертя мастильним матеріалом в результаті тиску, самозбудженого в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують змащувальний шар.

Гідродинамічне мащення має місце в радіальних і упорних підшипниках ковзання різноманітного призначення, в циліндро-поршневій групі двигунів внутрішнього згорання в швидкохідних навантажених, гарно припрацьованих зубчатих передачах та інших вузлах тертя.

Трибологічна поведінка гідродинамічної системи в основному визначається двома такими особливостями:

– опір руху задається "внутрішнім тертям" рідини, тобто опором зрушенню або "в'язкістю" рідкої плівки;

– зношування виключається, якщо форма поверхонь така, що приводить до повного поділу поверхонь.

Опір руху при гідродинамічному мащенні системи визначається дотичними напруженнями в рідині, що рухається. Щоб одержати міру опору зрушенню або в'язкості рідини, розглянемо систему з двох плоских і твердих поверхонь, зображену схематично на рис. 10.2. Нижня поверхня нерухома, а верхня рухається паралельно їй зі швидкістю V_0 . Оскільки молекули рідини прилипають до поверхонь при не занадто великих швидкостях, рідина має ламінарний профіль швидкостей $V = V_0$ на верхній площині і $V = 0$ – на нижній. Сила F , необхідна для підтримки руху верхньої поверхні, пропорційна площі поверхонь A і V_0/z , де z – відстань між пластинами. Отже, дотичне напруження F/A пропорційне зміні деформації зрушення V_0/z :

$$F/A = \eta(V_0/z), \quad (10.1)$$

або в більш загальному вигляді:

$$\tau = \eta \left(\frac{dV}{dz} \right). \quad (10.2)$$

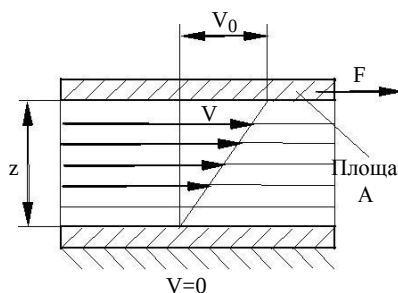


Рис. 10.2. Тертя між двома паралельними пластинами розділеними рідиною

Коефіцієнт пропорційності η називається коефіцієнтом динамічної в'язкості рідини, що підкорюється закону пропорційності між дотичним

напруженням і швидкістю зміни деформації зрушення $\frac{dV}{dz}$, відносяться до

класу ньютонівських рідин.

Щодо другої особливості, то для утворення несучого тиску необхідна звужуюча клиноподібна плівка, як це показав Рейнольдс у 1886 р. Фізична картина процесів, що приводять до утворення тиску в плівці рідини, що звужується, може бути побудована шляхом аналізу простої опори ковзання, схематично зображеної на рис. 10.3.

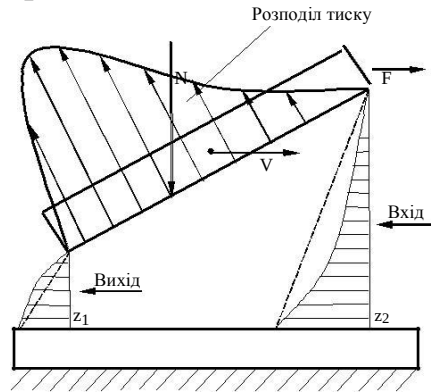


Рис. 10.3. Тертя між двома паралельними пластинами при гідродинамічному режимі мащення

Вхідний зазор z_2 більше вихідного зазору z_1 . Весь зазор заповнений в'язкою нестисливою рідиною. Припустимо, що первісно розподіл швидкості на вході може бути лінійним (рис. 10.2). Оскільки $z_2 > z_1$, то потік на вході перевищував би потік на виході, що суперечило б умові нерозривності плинності. Це автоматично призводить до розподілу тиску, що протидіє вхідному потоку. У результаті профілі швидкості змінюються: на вході профіль увігнутий; на виході опуклий, як показано схематично на рис. 4.3. Площа під кожною кривою профілю швидкості уздовж залишається та ж сама, і умова нерозривності плинності виконується. Якщо поверхні цілком розділені, відносний рух відбувається усередині плівки рідини.

Розглянемо розв'язання рівняння Рейнольдса для простого випадку мащення системи циліндр – площина (рис. 10.4), щоб показати зміст цього рівняння і одержати вихідні дані для вивчення режиму пружногідродинамічного мащення. Одновимірне рівняння Рейнольдса для стаціонарного руху таке:

$$\frac{dP}{dx} = 6\eta V \frac{h - \bar{h}}{\bar{h}^3}, \quad (10.3)$$

де V – швидкість поверхні;

η – динамічна в'язкість;

h – товщина плівки на вході $\bar{h}$ – товщина плівки на виході, коли $dp/dx = 0$.

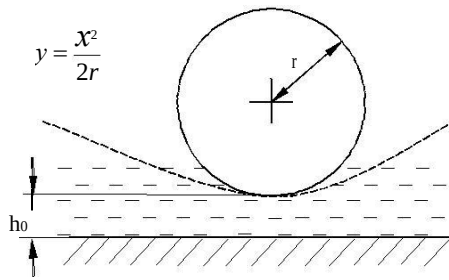


Рис. 10.4. Система "циліндр – площина" в середовищі рідини

В околі мінімального зазору кола радіусом r можна апроксимувати рівнянням параболи $y = x^2/2r$. Використовуючи це рівняння товщини плівки і граничну умову для $p(x)$, інтегруємо рівняння Рейнольдса. У літературі описані різні граничні умови для $p(x)$:

- умова Зомерфельда $p = 0$ при $x = +\infty$;
- умова Зомерфельда $p = 0$ при $x \geq 0$;
- умова Рейнольдса $p = 0$, коли $dp/dx = 0$ при $x > 0$.

Інтегрування рівняння Рейнольдса з застосуванням умови Зомерфельда дає такий розподіл тиску:

$$p = 2hV(x/h^2). \quad (10.4)$$

Тепер, використовуючи умову Зомерфельда, можна легко розрахувати повну несучу здатність N/L на одиниці довжини циліндра L :

$$\frac{N}{L} = \int_0^{\infty} p dx = 2 \left[\frac{pVr}{n_0} \right]_0^{\infty}. \quad (10.5)$$

Застосовуючи умову Рейнольдса, одержуємо:

$$\frac{N}{L} = 2,45 \left[\frac{pVr}{n_0} \right]_0^{\infty}. \quad (10.6)$$

Перетворюючи ці вирази у формули, що пов'язують мінімальну товщину плівки з робочими параметрами: навантаженням N і швидкістю V , в'язкістю η , радіусом циліндра r і довжиною L , одержимо:

$$h_0 r = 2 \left[\frac{pVr}{N} \right], \quad (10.7)$$

для умови Зомерфельда і для умови Рейнольдса:

$$h_0 r = 2,45 \left[\frac{pVr}{N} \right]. \quad (10.8)$$

Ці результати показують, що в системі "циліндр – площина" товщина плівки мащення зменшується зі зменшенням в'язкості η , зменшенням швидкості V і збільшенням нормального навантаження N . Після вивчення зв'язку між товщиною плівки мащення і параметрами системи, що впливають на неї, розглянемо питання про тертя. Як зазначалося вище, силу тертя можна знайти, інтегруючи діючі на поверхню циліндра дотичні напруження і додаючи до результату всі гідродинамічні сили, що діють у напрямку руху. У

результаті розрахунків із застосуванням умови Рейнольдса одержимо формулу для коефіцієнта тертя:

$$\mu = \frac{F}{N} = 0,76 \left(\frac{\eta V L}{N} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10.9)$$

Цікаво порівняти результати для системи "циліндр–площина" і для радіального підшипника, практично найбільш важливої механічної системи гідродинамічного мащення. На рис. 3.5 схематично показаний працюючий радіальний підшипник. Оскільки в будь-якому радіальному підшипнику існує природний мастильний клин внаслідок особливостей зазору, то при досить високих швидкостях у мастильній рідині розвивається тиск, що підтримує вал і цілком відокремлює його від втулки підшипника. Тертя зручно описати в залежності від робочих змінних і параметрів підшипника, об'єднаних у "число Зомерфельда" (іноді називане "числом Гюмбеля"). Число Зомерфельда визначається у вигляді:

$$S_0 = \frac{p \psi_r^2}{\eta \omega}, \quad (10.10)$$

де $p = N/2rL$ – навантаження, поділене на площу проекції підшипника;

$\psi_r = C_r / r$ – відношення радіального зазору до радіуса вала;

η – динамічна в'язкість;

$\omega = V / r$ – кутова швидкість.

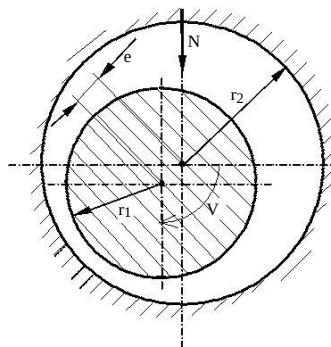


Рис. 10.5. Схематичне зображення геометрії радіального підшипника: N – навантаження; V – швидкість ковзання; e – ексцентриситет; r_1 – радіус вала; r_2 – радіус втулки; $C_r = r_1 - r_2$ – радіальний зазор

Згідно з Фогельполем, коефіцієнт тертя можна виразити приблизно у такому вигляді:

$$\mu = \frac{3\psi_r}{S_0} \text{ при } S_0 < 1; \quad (10.11)$$

$$\mu = \frac{3\psi_r}{\sqrt{2} S_0} \text{ при } S_0 > 1, \quad (10.12)$$

звідки випливає, що:

$$\mu \cong \frac{\eta VL}{N} \text{ при } S_0 < 1; \quad (10.13)$$

$$\mu \cong \left(\frac{\eta VL}{N} \right)^{1/2} > \quad \text{при } S_0 > 1.$$

У зв'язку з цим варто нагадати, що параметр $\eta V / N$ використаний як абсциса кривої Штрибека на рис. 10.1.

10.3. Еласто-гідродинамічний режим мащення.

Гідродинамічний режим мащення розглядався в основному для систем з високим "геометричним приляганням", наприклад для, опор ковзання зі самовстановлюваними вкладишами. Поверхні цих систем вважаються абсолютно твердими в процесі роботи. При поганому геометричному приляганні, наприклад, у випадках зосереджених контактів Герца, варто враховувати вплив пружної деформації поверхонь. Необхідно також мати на увазі вплив тиску на в'язкість рідини, оскільки в змазаних контактах Герца є високі тиски. Усе це приводить до поняття еласто-гідродинамічного (ЕГД) режиму мащення.

У якості вихідної розглянемо мастильну систему "циліндр–площина", пружнодеформованого під дією навантаження (рис. 10.6).

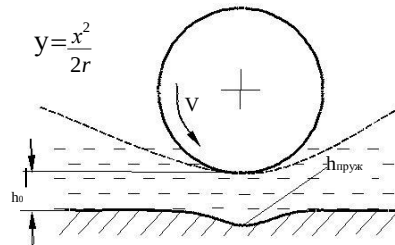


Рис. 10.6 Пружнодинамічний контакт циліндра з площиною

Задачу визначають такі рівняння:

1. Гідродинамічне рівняння.

Як показано вище, одномірне рівняння Рейнольдса в інтегральній формі має вигляд:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h - \bar{h}}{\bar{h}^3}. \quad (10.15)$$

Це рівняння було розв'язане для гідродинамічного режиму мащення. Однак, отриманий розв'язок рішення незастосовний в ЕГД-режимі, оскільки профіль плівки h і в'язкість η залежать від тиску p , тобто:

$$h = h(p) \text{ і } \eta_0 = \eta(p). \quad (4.16)$$

2. Рівняння пружності.

Профіль плівки $h(x)$ задається виразом:

$$h = h_0 + \frac{\zeta^2}{2r} + h_{np}, \quad (10.17)$$

застосувавши рішення задачі Бусинеска для h_{np} , одержимо:

$$h(\zeta) = h_0 + \frac{\zeta^2}{2r} - \frac{2}{\pi E} \int_{s_1}^{s_2} p(\zeta) \ln(\zeta - S) dS + const, \quad (10.18)$$

де

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 - \nu_2}{E_2} \right); \quad (10.19)$$

ν_1, ν_2 – відповідно модулі

()

де r – приведений радіус кривизни тіл; E_1, E_2 і пружності і коефіцієнти Пуассона тіл тертя.

3. Співвідношення між в'язкістю і тиском.

Вважаючи рідину нестисливою, а процес ізотермічним, доповнимо задачу загальноприйнятим співвідношенням між в'язкістю і тиском в експонентній формі:

$$\eta(p) = \eta_0 e^{ap}, \quad (10.20)$$

де η_0 – в'язкість при атмосферному тиску і температурі T_0 ;

a – п'єзоефективний коефіцієнт в'язкості.

Обґрунтованість експонентної залежності підтверджується значним збільшенням в'язкості зі збільшенням тиску. Наприклад, при тиску за Герцу 1 ГН/м^2 в'язкість мінеральної оливи зростає в 10 разів у порівнянні з її значенням при атмосферному тиску.

Розв'язання задачі ЕГД-режиму полягає у відшуванні функцій $p(x)$, $h(x)$ ітераційним методом. У спрощеному описі ітераційний метод полягає в такому. Задаючи початковий розподіл товщини плівки, що підставляється в рівняння Рейнольдса, знаходять розподіл тиску. Він у свою чергу підставляється в рівняння пружності, що дозволяє оцінити пружні переміщення, які порівнюються з початковим розподілом товщини плівки. Ітерації продовжують до досягнення достатнього ступеня збігу двох послідовних розподілів товщини плівки.

Вплив викликаних тертям температур на в'язкість оливи призводить до зниження товщини плівки. Отже, в ЕГД-режимі не можна знехтувати впливом шорсткості поверхні і можливістю контактів нерівностей. Урахування цих явищ призводить до поняття часткового ЕГД-режиму або змішаного режиму мащення.

10.4. Режим змішаного мащення

Якщо режим гідродинамічного мащення стає неможливим, поява граничного мащення часто супроводжується змішаним режимом мащення,

коли виникає частковий контакт виступаючих вершин мікронерівностей при наявності відносно великої кількості в западинах. В цих умовах одні ділянки поверхні контактуючих тіл розділені гідродинамічним шаром, а другі граничним. При змішаному мащенні велике значення мають як об'ємна характеристика змащувального матеріалу – його в'язкість, так і здатність змащувального матеріалу утворювати на поверхнях тертя міцні граничні шари. Звичайно, чим вище доля гідродинамічного режиму мащення, тим коефіцієнт тертя при змішаному мащенні нижче.

Просте і витончене пояснення режиму змішаного мащення засноване на припущенні, що повне прикладене навантаження сприймається частково гідродинамічною дією плівки рідини і частково контактами нерівностей. Отже, повна сила тертя складається з в'язкого тертя рідини і тертя в контактах нерівностей.

Якщо кількість змащувального матеріалу така, що окрім витрати на утворення граничної плівки мається його надмірна кількість, котра у вигляді рідини частково заповнює западини, то вони служать резервуаром для відновлення зношувальної граничної плівки. Зі збільшенням кількості оливи до необхідного для утворення гідродинамічного ефекту на мікроклінах шорсткості сполучених тіл граничне мащення переходить в режим змішаного мащення. Цей режим поза залежністю від швидкості і в'язкості властивий усякій трібосистемі при наявності достатньої кількості змащувального матеріалу.

Процеси, що виникають при змішаному мащенні, дуже складні, так як усі види тертя побічно впливають один на одного, приймаючи участь у створенні підйомної сили, а деякі з них впливають безпосередньо, наприклад, еласто-гідродинамічні плівки.

Змішаний стан гідродинамічного і граничного мащення можливий в двох варіантах:

1. Якщо тертьові поверхні не мають відхилень від заданої геометрії внаслідок перекосів, деформацій, хвилястості і т. п. і контактують по усій номінальній площині. Тоді контакт між поверхнями здійснюється по вершинам нерівностей (звичайно більш-менш рівномірно розподілених по площині), що виступають з оливного шару.

2. Якщо тертьові поверхні мають відхилення від заданої геометричної форми, в результаті чого граничне мащення зосереджене на порівняно великих виступаючих ділянках поверхні. Ці ділянки сприймають основне навантаження і внаслідок цього вони пружно деформовані та термічно напружені. В той же час на іншій частині поверхні може мати місто гідродинамічне мащення.

В обох випадках доля гідродинамічного мащення збільшується в результаті припрацьовування, яке відбувається при ковзанні поверхонь.

10.5. Граничний режим мащення

Якщо оливна плівка на тертьових поверхнях достатньо товста, так що

розділенні нею поверхні, по суті, не торкаються одна одну, то коефіцієнт тертя відповідає умовам гідродинамічного режиму мащення і залежить в основному від в'язкості. В цих умовах специфічна природа поверхонь твердих тіл не виявляється і закон Амонтона не діє. По мірі збільшення навантаження і зменшення в'язкості або зниження відносної швидкості руху плівка між двома поверхнями стає тоншою і контакт між ними збільшується. При цьому товщина плівки може зменшитись до такої величини, коли закони гідродинаміки не діють і впливом поверхневих або граничних сил вже неможливо зневажати. При подальшому зменшенні товщини плівки настає момент, коли поверхні тертьових деталей приходять до зіткнення.

Між гідродинамічним і граничним режимами мащення нема різкого переходу, але існує проміжний перехід, в якому проявляються обидва вида мащення. Цю зону звичайно звать режимом змішаного мащення.

При змінюванні товщини плівки по мірі переходу від одного режиму мащення до другого помітні змінення зазнає коефіцієнт тертя. Він збільшується від дуже низьких значень, відповідних гідродинамічному режиму тертя, до певної величини, звичайно менших ніж коефіцієнт тертя не змащених поверхонь. Такий тип мащення, де важливу роль відіграє природа поверхневого шару, знаходиться в лівій частині діаграми Штрибека і зветься граничним мащенням.

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 4348/3 і ДСТУ 2823-94 під граничним мащенням розуміється такий вид мащення, якому не можуть бути приписані об'ємні властивості в'язкості мастильного матеріалу і який визначається властивостями граничних шарів, що виникають при взаємодії поверхонь тертя і змащувального матеріалу в результаті фізичної адсорбції або хімічної реакції.

При граничному режимі мащення характеристики тертя і зношування визначаються властивостями матеріалу контактуючих тіл і змащувальними властивостями оливи. Можливість реалізації граничного мащення залежить також від шорсткості тертьових поверхонь і характеризується питомою товщиною λ змащувальної плівки, яка уявляє собою відношення товщини плівки оливи h між тертьовими поверхнями до суми середніх квадратичних значень висот мікроступів шорсткості на цих поверхнях σ :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (10.21)$$

При гідродинамічному режимі $\lambda > 4$ при еластогідродинамічному $\lambda = 1 \dots 4$, при граничному $\lambda < 1$ і при $1 < \lambda < 3$ – режим змішаного мащення.

Можливі дві межі граничного мащення: одна з них відповідає переходу від тертя незмащених поверхонь до тертя зі змащуванням; другий – переходу від граничного режиму до еласто-гідродинамічного.

Механізм дії граничних мащень визначається створенням між тертьовими поверхнями плівки, здатної зменшувати число прямих взаємодій твердих тіл з малим опором зсуву. Найкраще ця задача вирішується за допомогою проміжної плівки з довгих молекулярних ланцюгів.

При граничному мащенні поверхні сполучених тіл розділені шаром мастильного матеріалу товщиною до 0,1мкм. Коефіцієнт тертя при цьому залежить від наявності в оливі поверхнево-активних речовин та їхньої ефективності. За наявності таких плівок сила тертя знижується у порівнянні з тертям без оливи у кілька разів, а зношування тертьових поверхонь зменшується у сотні разів.

Щоб зрозуміти механізми граничного мащення, варто розглянути фізико-хімічні процеси утворення проміжної плівки. Взаємодії тверде тіло-мастильний матеріал, що призводять до появи захисної граничної плівки, можуть бути представлені трьома механізмами. Розрізняють плівки фізичного (адсорбція), хімічного (хемосорбція) походження та граничні плівки, які утворюються в процесі хімічної реакції між твердими поверхнями та молекулами оливи.

Фізична адсорбція. Утворення адсорбційних граничних плівок обумовлено наявністю у мастильних матеріалах полярних атомних груп, які утримуються на поверхні вандерваальсівськими поверхневими силами.

Перш за все, до полярних груп, що входять до складу молекул вуглеводнів та їхніх похідних, які є в оливах, належать: карбоксильна група COOH , гідроксильна група OH та карбонільна група CO . Всі вони разом з атомами C та H містять атоми кисню. До полярних сполук відносять також різноманітні ефіри, смоли, жирні кислоти. У той же час чисто вуглеводневі групи, у тому числі метиленові CH_2 й метилени CH_3 , полярно інертні.

Полярно-активні вуглеводні мастильного матеріалу розташовані перпендикулярно до твердої поверхні і повернуті до неї полярними групами, маючи зчеплення на одному кінці (рис 10.7). Цими кінцями з електричним зарядом може бути активна карбоксильна група (радикал) COOH (рис. 10.7, а) і гідроксильна OH (рис. 10.7, б), які мають сильне притягання до металу.

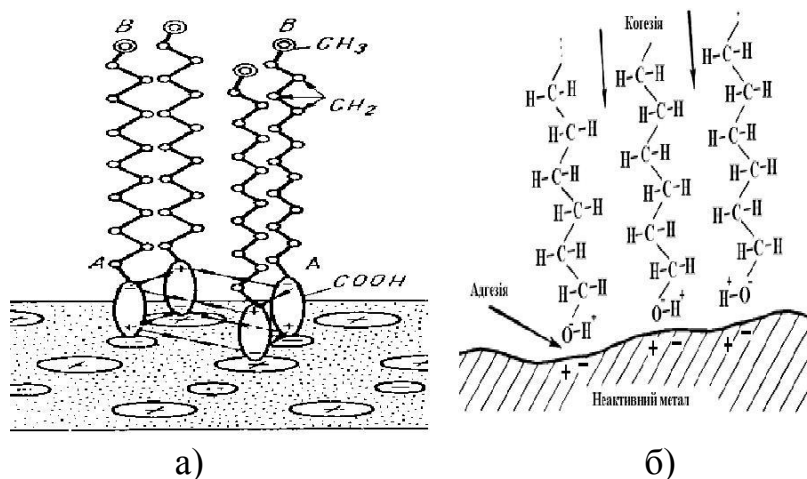


Рис. 10.7. Схеми зображення фізичної адсорбції полярно активними групами: а) – карбоксильною COOH ; б) – гідроксильною OH

В процесі адсорбції довгомірні молекули гранично щільно зближуються, розташовуючись у вигляді частоколу. Така будова забезпечує достатню міцність плівки за рахунок сил молекулярної взаємодії (когезії). Адсорбційні

шари, сформовані з вертикально-орієнтованих молекул, маючи високий опір стисненню, здатні витримувати високі навантаження. При збільшенні довжини ланцюга молекули набувають здатності вигинатися у тангенціальному напрямі і ковзати одна по одній, знижуючи тертя.

Ефективність зниження тертя шарами адсорбованих молекул з однаковою довжиною ланцюга зменшуються в ряду: жирні кислоти, ефіри жирних кислот, спирти вуглеводні. Здатність знижувати тертя у ненасичених жирних кислот виражена в меншій мірі, ніж у насичених жирних кислот з такою ж кількістю атомів вуглецю. Це пояснюється їх менш ефективною довжиною ланцюга і просторовим фактором.

Орієнтація одних і тих же молекул змащувального матеріалу на поверхнях різних металів може значно різнитися – в межах від різко вираженої до майже повної відсутності. Це залежить від активності (величини силового поля) поверхні активного металу і покриваючої її плівки окислів. Окисна плівка екранує силове поле металевої поверхні, але може сама мати таке поле, що забезпечує адсорбцію на ній молекул із оточуючого середовища.

Адсорбційні граничні плівки чутливі до температури, оскільки теплота викликає десорбцію, порушення орієнтації та плавлення плівки. Тому такі плівки можуть бути застосовані при низьких температурах і в умовах незначного тепловиділення під час тертя, тобто, при незначних навантаженнях та швидкостях ковзання

Хімічна адсорбція (хемосорбція) у системі з граничним мащенням виникає, коли молекули оливи утримуються на тертьових поверхнях хімічними зв'язками, тобто, короткодіючими поверхневими силами. При хімічній адсорбції полярні кінці молекул, зв'язуючись з поверхнею тіла, утворюють на ній моношар, схожий за хімічним з'єднанням (рис. 10.8.).

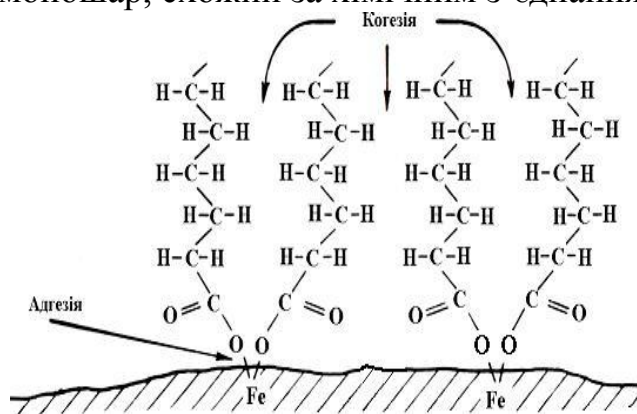


Рис. 10.8. Схематичне зображення хімічної адсорбції

Активний зв'язок між кінцями молекул оливи і поверхнею металів призводить до проходження хімічних реакцій з утворенням мильної плівки. При цьому розвивається хімічна реакція без виведення атома металу з решітки його структури. У випадку жирних кислот адсорбована плівка перетворюється в мило металу поверхні. В цьому випадку змащувальна плівка часто характеризується більш високою стійкістю до зсуву, чим

адсорбована плівка. Ефект зниження тертя металевими милами зберігається впритул до температури плавлення, але різко знижується після її досягнення.

Так, жирні кислоти, вступаючи в реакцію з оксидом металу, утворюють граничні плівки металевого мила, які здатні витримувати без руйнування значні деформації. Ці металеві мила мають не тільки бажані властивості міцності на зріз, але і значно більш високі температури плавлення, ніж первісна жирна кислота. Наприклад, температура плавлення стеаринової кислоти 69°C , а її сталевих мил 120°C .

Хемосорбція найбільш ефективно проходить на хімічно активних металах (Cd, Zn, Mg, Pb і ін.)

Хімічно адсорбовані плівки мають ефективну змащувальну здатність аж до температури плавлення, незалежно від того, утворені вони в місці реагуючій поверхні або нанесені напилюванням на не реагуючу поверхню. Вони забезпечують змащування при помірних навантаженнях, температурах та швидкостях ковзання і виявляються непридатними у важких робочих умовах із-за порушення орієнтації, розм'якшення або плавлення плівки при спільному впливі робочих перемінних і енергії, що підводиться.

Хімічна реакція. Більш стійкими, ніж будь-яка фізично чи хімічно адсорбована плівка, є граничні плівки, які виникають в результаті хімічних реакцій між твердими поверхнями та молекулами оливи, тобто, коли є обмін валентними електронами, та утворюється нова хімічна речовина (рис. 10.9).

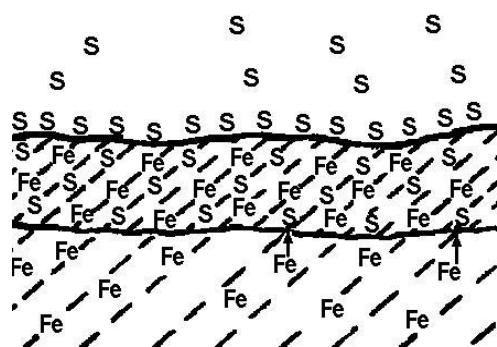


Рис. 10.9 Схема граничної плівки, утвореної хімічною реакцією

Такі граничні плівки не мають межі по товщині (обумовленої дифузійними процесами у кристалічні ґрати), характеризуються високими енергіями активації та зв'язку і незворотні.

Так, присутність у мастильних матеріалах сірки, фосфору і хлору, зумовлюють утворення на поверхні металу нових хімічних речовин — сульфідів, фосфатів та хлоридів цих металів. Вони утворюють на поверхні розділу плівки солей металів з малою міцністю на зріз, але високою температурою плавлення, такі, як сульфід, хлорид, або фосфід. Ці плівки більш стійкі, ніж будь-яка фізичне або хімічно адсорбована плівка. Граничні плівки, що залежать від хімічної реакції, придатні для високих навантажень, високих температур і високих швидкостей ковзання і обмежені в застосуванні хімічно активними металами. Такі умови звичайно називають такими, що "призводять до задиру", але найбільшу небезпеку серед них

представляють високі температури. Хоча протизадирні присадки функціонують за рахунок реакції з поверхнями, вони не повинні бути занадто активними, оскільки в протилежному випадку механохімічне зношування може досягти досить високих інтенсивностей.

Як уже відзначалося одним з важливих факторів, які здійснюють вплив на весь комплекс службових властивостей трібосистеми, що визначає антифрикційні властивості трібосполучень, є температура, що розвивається при терті, яка викликає нагрівання тонких поверхневих шарів сполучених тіл і поділяючого їхнього мастильного шару. Блоком була запропонована гіпотеза про сталість критичної температури, при якій відбувається руйнування граничного мастильного шару для даної комбінації матеріалів поверхонь тертя і хімічно неактивного мастильного матеріалу. Встановлено, що поділ поверхонь тертя граничними орієнтованими шарами поверхнево-активними речовинами забезпечується в умовах граничного мащення до моменту їхньої дезорієнтації і десорбції при досягненні визначених, для даного сполучення матеріалів і мастильного матеріалу, температур. Найбільше яскраво це показано в роботах Боудена і Тейбора температурним методом оцінки мастильної здатності олій.

Щоб описати походження різних граничних плівок, використовуємо якісну діаграму, представлену на рис. 10.10.

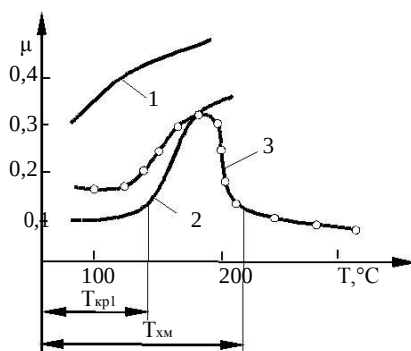


Рис. 10.10. Характерні залежності коефіцієнта тертя μ від температури T :
1 – неполярна базова олива; 2 – олива з поверхнево-активною присадкою;
3 – олива з хімічно-активною присадкою

На цій діаграмі представлені графіки залежності коефіцієнта тертя μ від температури T . Крива 1 побудована для системи де мащення відбувається неполярною базовою олією. Вона показує, що тертя первісне відносно високе і підвищується з ростом температури, оскільки слабкі адсорбційні зв'язки розриваються. Крива 2 відноситься до олив і пластичних мастильних матеріалів із природними або введеними поверхнево-активними присадками. Цей мастильний матеріал реагує з поверхнею металу, утворюючи металеве мило, що легко зрушуються на площі фактичного контакту. Критерієм руйнування мастильного шару є критична температура (перший перехідний процес), $T_{\text{кр}1}$ яка характеризує дезорієнтацію, десорбцію адсорбованих молекул поверхнево-активних речовин. $T_{\text{кр}1}$ визначається по різкому зростанню тертя і підвищенню зносу адгезійного типу. Крива 3 характерна

для олив і пластичних мастильних матеріалів з хімічно активними присадками, для яких виявлені додаткові критерії: температура хімічної модифікації поверхонь тертя (другий перехідний процес), при перевищенні якої встановлюється порівняно низький коефіцієнт тертя і припинюється його стрибкоподібна зміна в результаті утворення на поверхні тертя модифікованого шару, утвореного хімічною реакцією продуктів розкладання присадок з матеріалом поверхні $T_{\text{хм}}$. При цьому знос здобуває корозійно-механічний характер і локалізується в модифікованому шарі. Подальше підвищення температури контакту може призвести до третього перехідного процесу – критичній температурі хімічно модифікованого шару $T_{\text{кр2}}$, при якій буде відбуватися руйнування цього шару в результаті його розкладання. Усі три зазначені температури мають фізичне обґрунтування.

Виходячи з молекулярно-механічної теорії, сила тертя F в граничному режимі при постійному навантаженні трібосистеми може бути виражена трьохчленною залежністю:

$$F = \alpha S \tau_{\alpha} + \beta S \tau_{\beta} + \gamma S \tau_{\gamma}, \quad (10.22)$$

де S – номінальна площа контакту;

α , β , γ – долі реальних площин контакту, на яких реалізується зсув виступів поверхонь;

τ_{α} , τ_{β} , τ_{γ} – межі міцності при зсуві відповідно твердого тіла, мастила в мономолекулярному і в полімолекулярному шарах.

З існуючих режимів мащення граничний режим найбільш жорсткий. Він характеризується високими показниками зносу і коефіцієнтом тертя. Як правило, цей режим реалізується в трібосполученнях важконавантажених зубчатих передач, циліндропоршневій групі двигунів у зоні верхньої мертвої точки, в напрямних металорізних верстатів (відомий ефект ковзання з стрибками), також найбільш виразно цей режим виявляється в період пуску і зупинки трібосистеми.