

Лекція 6

ВИДИ ТЕРТЯ

План

- 6.1. Загальні аспекти. Класифікація видів тертя
- 6.2. Тертя без змащувального матеріалу
- 6.3. Тертя при граничному змащуванні
- 6.4. Тертя при рідинному змащуванні
- 6.5. Тертя при напіврідинному змащуванні
- 6.6. Режими тертя в підшипниках ковзання
- 6.7. Особливості тертя кочення
- 6.8. Ефект аномально низького тертя

6.1. Загальні аспекти. Класифікація видів тертя

Тертя виникає, коли два тіла, які переміщуються одне відносно одного, дотикаються своїми зовнішніми поверхнями (зовнішнє тертя), або коли елементи структури тіла (атоми, молекули) переміщуються одне відносно одного (внутрішнє тертя). Внутрішнє тертя може мати місце в рідинах, газах, твердих тілах.

Зовнішнє тертя завжди виникає при відносному русі тіл, що контактують і механічно взаємодіють. Основна характеристика сили тертя – реакція, яка перешкоджає взаємному переміщенню.

У природі спостерігаються різні види взаємодії тіл. Деякі з них, наприклад, тяжіння, електромагнетизм описуються фундаментальними законами фізики.

Тертя – результат різних видів складної взаємодії, за якої проходять механічні, фізико-хімічні, електричні та інші процеси. Їх співвідношення може бути різним залежно від характеру навантаження, властивостей матеріалів і середовищ.

Умови зовнішнього тертя різноманітні. Однак це не означає, що для визначення процесів тертя не можна отримати задовільні закономірності. В першу чергу, це стосується до таких умов, де співвідношення різних видів взаємодії має цілком визначений характер, що дозволяє встановити закономірності тертя, виходячи із загальних законів руху, збереження енергії, мінімальних принципів і т.д. Яскравим прикладом є процес тертя і зношування, типові для нормальної роботи машин.

Зовнішнє тертя в машинах, механізмах, приладах і установках – широко розповсюджене явище. Шкідливі прояви зовнішнього тертя проявляються у втратах потужності, зношуванні й пошкодженості поверхонь контакту. Корисне тертя використовується у фрикційних пристроях при передаванні руху, зусиль і роботі виконавчих органів машин.

Зовнішнє тертя є одним із основних процесів при технологічній обробці металів (різання, шліфування, тиском). Його також використовують, наприклад, при зварюванні металів (зварювання тертям, холодне зварювання зсувом).

Класифікацію основних видів тертя в машинах можна провести за

ознаками, наведеними в таблиці 6.1.

За характером відносного руху розрізняють тертя ковзання і тертя кочення. Іноді обидва види тертя проявляються сумісно, коли кочення супроводжується просковзуванням, наприклад, у зубчастих або зубчасто-гвинтових передачах або між колесами і рейками.

Залежно від того, чи є відносне переміщення дотичних пар макро- або мікросміщенням, розрізняють силу тертя руху, неповну силу тертя спокою, найбільшу силу тертя спокою. Сила може виступати в узагальненому понятті й виступати як момент сил.

Сила тертя руху – сила опору при відносному переміщенні одного тіла по поверхні другого під дією зовнішньої сили, направленої тангенціально до загальної межі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила граничного опору відносно переміщення дотичних тіл без порушення зв'язку між ними за відсутності зміщення на контакті. Якщо прикладена до одного із тіл паралельно площині дотику сила перевищує хоча б на нескінченно малу величину силу тертя спокою, то порушується рівновага.

Неповна сила тертя спокою – сила опору, направлена протилежно до зусилля зсуву, за відсутності зміщення на контакті. Вона змінюється від нуля (за відсутності сил, що прагнуть порушити відносний спокій тіл у площині їх дотику) до найбільшого значення, коли вона переходить у силу тертя спокою.

Деформація тіл, в першу чергу нерівностей їх поверхонь, під дією зусилля зсуву і протилежної йому неповної сили тертя спокою викликає попереднє зміщення тіл, що передуює їх відносному переміщенню. Попереднє зміщення мале за величиною і пропорційне прикладеній силі зсуву. Воно частково зворотне, тобто після зняття сили зсуву відбувається частково зворотнє зміщення. На ділянках фактичного контакту попереднє зміщення дорівнює нулю.

Залежно від наявності змащувального матеріалу розрізняють такі види тертя: тертя без змащувального матеріалу і тертя зі змащувальним матеріалом.

Таблиця 6.1

Класифікація видів тертя

Ознака класифікації	Вид тертя
Наявність відносного руху	Тертя спокою, тертя руху
Характер відносного руху	Тертя ковзання; тертя кочення; тертя кочення з ковзанням (просковзування)
Наявність змащувального матеріалу (мастила)	Тертя без змащувального матеріалу (сухе); тертя зі змащувальним матеріалом (рідинне, граничне)
Умова контактування з контртілом	У вузлах і з'єднаннях машин; при контакті виконавчих органів машин з робочим середовищем
Показники надійності і довговічності	Нормальні процеси тертя; патологічні процеси тертя
Область службового використання	Тертя антифрикційних з'єднань; тертя фрикційних пар

У загальному під тертям розуміють комплекс явищ у зоні контакту поверхонь двох тіл, які переміщуються одне відносно другого, в результаті чого в цій зоні виникають контактні сили. Тертя, як вказувалось вище, є наслідком сил когезії й адгезії.

Багаточисельність явищ тертя в машинах не вичерпується перерахованими видами. Аналіз обширного матеріалу, отриманого в лабораторних умовах, і позитивного досвіду практики дозволяє виділити із усієї різновидності явищ тертя дві різко виражені області нормального і патологічного процесів тертя.

Залежність коефіцієнтів тертя від навантаження завжди містить таку ділянку, коли значення коефіцієнта тертя приблизно постійні (стабільні) і мінімальні в порівнянні зі значеннями коефіцієнтів тертя поза цією ділянкою. Назвемо цю ділянку стабільною.

Аналогічна ділянка зберігається і при залежності коефіцієнтів тертя від швидкості ковзання v . Таким чином, може бути виділена стабільна область залежності коефіцієнтів тертя від умов навантаження (тиску і швидкості ковзання).

За нормальної експлуатації машин, вузли тертя працюють виключно в стабільній області, хоча, як показує практика, ймовірність порушення нормальних умов тертя досить велика. У цих випадках спостерігаються переходи до аварійних процесів (схоплення I і II роду, мікрорізання, зминання і т.п.). Стабільна область завжди пов'язана з певним видом трансформувannya та руйнування (зношування) поверхонь тертя. Цей вид трансформувannya визначається динамічною рівновагою і встановленням вторинних структур. У звичайних умовах експлуатації машин – це механічний процес окисного зношування.

В стабільній області умов має місце приблизна лінійна залежність між тангенціальною і нормальною реакцією. Коефіцієнт пропорційності в основному визначається механічними параметрами основного матеріалу: розсіювання (дисперсія) коефіцієнта пропорційності – значенням $E_{\text{вн}}$ енергії поглинання, що залежить від механохімічних характеристик поверхневих шарів і складу середовища. В цій області закономірно отримання емпіричних залежностей типу закону Амонтона-Кулона.

Існування стабільної області нормального тертя висуває одну з найважливіших і необхідних для практики завдань теоретичних і експериментальних досліджень. Це завдання полягає в розмежуванні умов нормального і патологічного тертя, що відповідає різним областям механічних впливів (P, V) при заданих параметрах тертя (характеристиках матеріалів, середовища); у встановленні нормального коефіцієнта тертя і його розсіювання в нормальній області; в керуванні процесами тертя і зношування за допомогою оптимального вибору характеристик матеріалів і середовищ з метою розширення діапазону механічних навантажень, за якої відбувається

зношування вторинних структур і мінімізація сили тертя й швидкості зношування.

6.2. Тертя без змащувального матеріалу

Тертя без змащувального матеріалу за відсутності забруднень між поверхнями, що труться, спостерігається в гальмах, фрикційних передачах, вузлах машин текстильної, харчової, хімічної промисловостей, де змащувальний матеріал, щоб уникнути псування продукції або з міркувань безпеки недопустимий, а також у вузлах машин, які працюють в умовах високих температур, коли будь-який змащувальний матеріал не придатний.

Тертя згідно з однією з теорій, має молекулярно-механічну природу. На площадках фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного притягання, які проявляються на відстанях, які в десятки разів перевищують міжатомну відстань у кристалічних ґратках, і збільшуються з підвищенням температури. Молекулярні сили за наявності або відсутності проміжного в'язкого прошарку (вологи, забруднення, мастильного матеріалу і т.п.) викликають на тій чи іншій кількості ділянок адгезію. Вона можлива між металами і плівками окислів. Адгезія може бути зумовлена одночасно і дією електростатичних сил. Сили адгезії як молекулярні сили прямо пропорційні площі фактичного контакту. Прикладений тиск впливає на ці сили посередньо, через площу фактичного контакту.

Молекулярні сили як сили, перпендикулярні поверхні, здавалося б, не повинні виконувати роботу при відносному тангенціальному переміщенні поверхонь. Те саме стосується і сил адгезії, якщо зв'язок, що утворився між тілами, руйнується в місцях з'єднання. Насправді ж, відносно зміщення поверхонь за наявності взаємного притягання й адгезії супроводжується деформацією зсуву, що внаслідок неідеальної пружності матеріалу вимагає витрати енергії в необерненій формі. Зрозуміло, що потрібно прикласти більшу тангенціальну силу, якщо зв'язок між тілами порушується не в місці з'єднання, а на деякій глибині від поверхні.

Сильнішим проявом молекулярних сил є схоплювання поверхонь. Сили тертя у цьому випадку залежать від довжини зон схоплення й опору їх роз'єднанню.

Сила тертя F зумовлена механічною і молекулярною взаємодією:

$$F = a \cdot S_{\phi} + b \cdot P, \quad (6.1)$$

де a – середня інтенсивність молекулярної складової сили тертя; S_{ϕ} – фактична площа контакту; b – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя; P – сила тиску.

Коефіцієнт тертя f – це відношення сили тертя до сили тиску. На основі формули (6.1) отримаємо

$$f = \frac{a \cdot S_{\phi}}{b \cdot P} + b. \quad (6.2)$$

Двочленні вирази видів (6.1) і (6.2) для сил тертя і коефіцієнта тертя дійсні для тертя зі змащувальним матеріалом і без нього.

Багато дослідників (Хольм, Стренг, Л'юїс та ін.) вважають, що складова сили тертя, зумовлена пластичною деформацією (механічною взаємодією) поверхонь, інколи надто незначна (усього кілька процентів від сумарної сили тертя). Тертя металічних поверхонь у вакуумі супроводжується великим коефіцієнтом тертя (більше одиниці). Якщо ж у вакуумну камеру подати повітря, то за дуже короткий проміжок часу коефіцієнт тертя зменшується в кілька разів. За цей час кисень не в стані утворити плівку окислу, щоб загладити найменші нерівності поверхні тертя або перешкодити їх взаємному проникненню.

На основі цього можна зробити висновок, що молекулярна складова сили тертя є причиною високого значення останньої у вакуумі. Зауважимо, що при терті кочення молекулярна складова порівняно мало впливає на тертя.

Статична сила тертя залежно від тривалості нерухомого контакту збільшується до деякої границі. Сила тертя при русі залежить від швидкості ковзання поверхні, причому, залежно від тиску, твердості спряжених тіл, коефіцієнт тертя може монотонно збільшуватися, зменшуватися, переходити через максимум або мінімум.

Тертя без мастила супроводжується стрибкоподібним ковзанням поверхонь, з чим пов'язані, наприклад, вібрація автомобіля при вмиканні зчеплення, "шарпання" при гальмуванні, "виск" гальмів, вібрація різців при різанні й порушення роботи деталей, які рухаються з малою швидкістю. Серед способів боротьби зі "стрибками" при терті можна назвати: збільшення жорсткості технічної системи, підвищення швидкості ковзання, підбір матеріалів пар тертя, для яких коефіцієнт тертя незначно зростає з тривалістю нерухомого контакту і при збільшенні швидкості через мінімум не проходить.

Плівки окислів, волога і забруднення на металічних поверхнях впливають на коефіцієнт тертя з двох причин. Сили молекулярного притягання між ними можуть бути в сотню разів менші, ніж у випадку взаємодії металу на чистому контакті. Крім того, міцність окислів взагалі менша міцності основного металу, тому опір "проорюванню" і зрізуванню частинок при переміщенні, поряд з силами молекулярної взаємодії, значно зменшуються і коефіцієнт тертя падає. Товсті плівки окислів мають меншу твердість. Наявність їх призводить до підвищення площі фактичного контакту, причому, якщо це підвищення буде протікати швидше, ніж зменшення механічної складової сили тертя, то проходить збільшення сили тертя.

Особливо слід зупинитися на терті металевих поверхонь за високих температур, тобто вище температури розкладу мінеральних мастил, або температур плавлення чи розкладу твердих змащувальних матеріалів. На поверхнях тертя навіть в умовах високого розрідження створюється окисна плівка. Властивості цієї плівки відносно рівномірності покриття, щільності й міцності зв'язку з основою, а також інтенсивність її утворення залежать від складу сплаву. Плівка, за відповідного складу, зменшує силу тертя й інтенсивність зношування і захищає поверхні від корозії та безпосереднього контакту. В розрідженій атмосфері захисна дія плівки зменшується.

6.3. Тертя при граничному змащуванні

При граничному змащуванні поверхні спряжених тіл розділені шаром змащувального матеріалу дуже малої товщини (від товщини однієї молекули до 0,1 мкм). Наявність граничного шару чи граничної плівки зменшує силу тертя в порівнянні з тертям без мастила в 2...10 і зношування спряжених поверхонь у сотні разів.

Усі мастила здатні адсорбуватися на металевій поверхні. Міцність адсорбованої плівки залежить від наявності в ній активних молекул, їх якості й кількості. Хоча мінеральні змащувальні масла є механічною сумішшю неактивних вуглеводів, вони, за винятком надто чистих масел, які не були в роботі, завжди мають включення органічних кислот, смол та інших поверхнево-активних речовин. Жирні кислоти входять до складу масел рослинно-тваринного походження, а також до складу пластичних мастильних матеріалів. Тому майже всі змащувальні масла утворюють на металічних поверхнях граничну фазу кристалічної структури товщиною до 0,1 мкм, що має більш або менш міцний зв'язок з поверхневою та поздовжньою когезією. За наявності відносно товстого маслянистого прошарку між поверхнями тертя перехід від орієнтованої структури масла до неорієнтованої здійснюється стрибком.

Молекули змащувального матеріалу орієнтуються перпендикулярно до твердої поверхні, що дозволяє уявити граничну плівку у вигляді ворсу (рис. 6.1).

При взаємному переміщенні поверхонь тертя “ворсинки” немов згинаються в протилежні боки. Насправді ж відбувається зсув із перекосом квазікристалічної структури плівки.

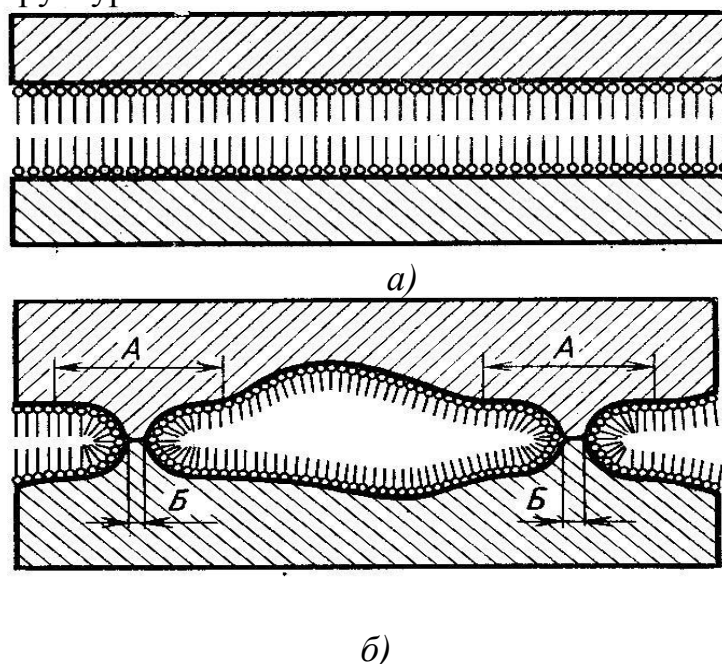


Рисунок 6.1 Схеми ковзання тіл при граничному зношуванні: а – змащування ідеальних поверхонь; б – контактування реальних поверхонь; А – ділянки, які сприймають навантаження; Б – ділянки безпосереднього контакту або онтактування при твердих плівках

Опір її ковзанню в такому стані трохи підвищений. На відновлення орієнтації молекул у попереднє положення перпендикулярно поверхні тіл потрібно деякий проміжок часу, інколи дуже тривалий.

Змащувальний матеріал у граничному шарі анізотропний, в тангенціальному напрямку молекулярні шари легко згинаються і при товщині шару більше деякої критичної величини ковзають один по одному. По нормалі до твердої поверхні плівка має високий опір стисненню. Її несуча здатність обчислюється десятками тисяч кілограмів на 1 см^2 . Деформація стиску плівки дуже висока.

Механізм тертя при граничному змащуванні проявляються у такому вигляді. Під навантаженням проходять пружна і пластична деформації на площинах контакту, під якими треба розуміти ділянки найближчого прилягання поверхонь, які покриті граничною плівкою мастила, аж до мономолекулярного шару. На площинах контакту може виникнути взаємне втілення поверхні без порушення цілісності плівки мастила. Опір руху тіл при ковзанні складається з опору зсуву граничного шару і опору “проорюванню” поверхонь об’ємами, які втілилися. Крім того, на площадках контакту, які піддаються найбільш значній пластичній деформації, і в точках з високими місцевими температурами може виникнути руйнування змащувальної плівки з настанням адгезії оголених поверхонь і навіть схоплення металів на мікроділянках Б (рис. 6.1). Це викликає додатковий опір руху.

Завдяки рухомості молекул змащувального матеріалу на поверхні тертя проходить з великою швидкістю адсорбція, що надає мастильній плівці властивостей “самозаліковуватися” при місцевих її пошкодженнях. Ця здатність відіграє важливу роль у попередженні лавинного процесу схоплювання.

Гранична плівка, яка не відновлюється, в міру зростання шляху тертя зношується, мастило з плівки адсорбується на продукти зношування і виноситься з поверхні тертя. Проходить сублімація плівки як твердого тіла і видалення мастила в атмосферу. Окислення плівки сприяє дезорієнтації структури і руйнуванню її.

В’язкість мастила не впливає на процес граничного змащування. Мастила з однаковою в’язкістю, але різних марок, мають різноманітну змащувальну дію. Для оцінювання поведінки мастил при граничному змащуванні ще в 1903 році було введено поняття маслянистості й запропоновано різноманітні формулювання цього поняття. Маслянистість – це комплекс властивостей, які забезпечують ефективне граничне змащування. Маслянистість оцінюється в основному за коефіцієнтом тертя: чим він менший, тим вища маслянистість. Робляться спроби кількісно оцінити її. Маслянистість характеризує дію змащувального матеріалу при застосуванні до даного сполучення матеріалів, що труться.

В 1969 році Б.В. Дерягін, Н.М. Снідковський і А.Б. Ляшенко висунули гіпотезу, що молекули змащувального матеріалу в граничному шарі згруповані в домени. Домен олеїнової кислоти в граничному шарі містить близько 1400 молекул. Домени формуються електромагнітними силами і ніби копіюють кристалічну будову

підкладки. Встановлено, що граничні шари мають властивості напівпровідникового елемента.

Додавання в граничні шари мастила і водяних розчинів поверхнево-активних речовин збільшує товщину граничного шару і сприяє зменшенню зношування (до двох разів).

При терті з граничним змащуванням зношування деталей машин велике. Через хвилястість і шорсткість поверхонь їх контактування відбувається на дуже малих ділянках тертя. Контактні тиски мають високі значення, і тонка гранична плівка мастила не оберігає поверхні від пластичної деформації, що неминуче призводить до зношування деталей. Це є дуже серйозним недоліком граничного змащування.

Ефективність змащування, крім фактора адсорбції, залежить від хімічної взаємодії мастила і металу: жирні кислоти, вступаючи в реакцію з поверхнею металу, утворюють мило, тобто металічні солі жирних кислот, здатні внаслідок властивої їм високої когезії витримувати без руйнування значні деформації. Хімічним явищам належить важлива роль організації змащувальної дії. Це підтверджує обставина, що інертні метали і скло погано змащуються.

У зв'язку з невисокою термічною стійкістю граничної плівки, яка утворюється на металевих поверхнях звичайними мінеральними мастилами, деколи вдаються до штучного підвищення її хімічної активності. Цього досягають шляхом введення в мастило спеціальних добавок (присадок), які містять органічні з'єднання сірки, фосфору, хлору, миш'яку або сполучення цих елементів. Хоча ці присадки і міцно адсорбуються на поверхнях тертя, однак у процесі тертя їм відводиться інша роль. В умовах високих температур, які досягаються на мікроконтактах, активне з'єднання присадок розкладається і, взаємодіючи з металічними поверхнями, утворює плівки сульфідів заліза, фосфору або фосфату заліза, хлористого заліза й окислених хлоридів і т.п. Утворені плівки запобігають металічному контакту, зменшують опір тертю, запобігають подальшому локальному підвищенню температури. Плівка чинить слабкий опір зрізу, спрацьовується і відновлюється заново.

Плівка, утворена на поверхні сталі хлорованими вуглеводами, працездатна до температури 300...400°C, вище якої відбувається її розплавлення і розклад. У сульфідів температура плавлення вища, і змащувальна здатність зберігається до температури 800°C. Нижче критичної температури плівки поводять себе як тверді змащувальні матеріали.

Очевидно, дія присадок неефективна, якщо матеріал не вступає в реакцію з активною частиною присадки. Наприклад, платина і срібло не вступають у реакцію з сіркою.

Деякі тверді тіла можуть виробляти змащувальну дію, організовуючи і підтримуючи режими тертя при граничному змащуванні. З викладеного раніше випливає, що гранична плівка повинна мати високий опір стисканню і низький опір зрізуванню. Виходячи з таких вимог, до твердих змащувальних матеріалів можна віднести деякі тіла шаруватої і пластинчастої структури, м'які метали і тонкі плівки пластичних матеріалів. З матеріалів шаруватої структури

властивості, необхідні для змащування металевих поверхонь, мають графіт, молібденіт (дисульфід молібдену MoS_2), сульфід срібла, пористий свинець, дисульфід вольфраму та інші.

Окрім тіл із шаруватою структурою всі тверді змащувальні матеріали утворюють граничний шар з необхідними якостями для опору стискуванню і зсуву (зрізування), але який не має суворо орієнтованої структури. Твердими мастилами можуть бути також м'які метали, які мають низький опір зрізуванню в корисному діапазоні температур. Для змащування використовують тверді плівки свинцю, олова й індію.

Механізм дії тонких металічних плівок, нанесених на тверду основу, за Ф.П.Боуденом такий: навантаження сприймається через плівку, яка має достатню міцність проти витискування, оберігає поверхні, що труться, від безпосереднього контактування і взаємного втілення. При відносному переміщенні поверхонь відбувається зрізування в м'якому металі. Оскільки опір зрізуванню невеликий, а площа фактичного контакту завдяки твердій підкладці мала, то й опір тертю також малий. Плівка, нанесена на м'яку підкладку, що значно деформується під навантаженням, вступає в контакт зі спряженою поверхнею на більшій площині, що збільшує силу тертя. Тому нанесення плівок м'яких металів, наприклад, на олов'яний бабіт неефективне. Доцільніше застосувати їх на свинцевистій бронзі і мідних сплавах.

З м'яких металів у якості твердих мастил можна використовувати тільки ті, які не наклепуються в межах робочих температур і не утворюють крихких твердих розчинів з металами спряжених тіл. Щоб метал не наклепувався, його робоча температура повинна бути вища температури рекристалізації. В олова, свинцю, індію температура рекристалізації нижча нормальної. Водночас олово, яке добре працює як твердий змащувальний матеріал (наприклад, між чавунними поверхнями), не придатне для нанесення на свинцевисту бронзу, бо вона дифундує з поверхні мідну основу бронзи, утворюючи тверді кристали, які викришуються з робочої поверхні. Індій хоч при нагріванні і дифундує в бронзу, з'єднуючись зі свинцем, не утворює крихких з'єднань.

Нанесені тверді плівки при багаторазових взаємних переміщеннях поверхонь швидко зношуються. Внаслідок цього їх використовують в якості покриття для припрацювання, а за одноразового контактування поверхонь – при глибокій витяжці металу.

Деякі матеріали внаслідок звичайного металургійного процесу або штучного насичення містять речовини, здатні служити твердим мастилом, наприклад, на припрацьованій поверхні конструкційного чавуну графіт розмащується, утворюючи граничний шар. Такий же шар утворюється на поверхні металу з пористих антифрикційних матеріалів, насичених мінеральними маслами, графіту і дисульфиду молібдену. В ширшому понятті граничним змащувальним матеріалом служить також політетрафторетилен, коли ним насичують пористі підшипникові матеріали. У свинцевистій бронзі, на твердій мідній основі, в який вкраплений свинець, останній при ковзанні розмащується

по поверхні, покриваючи її тонкою плівкою. Ця плівка в міру зношування сплаву відновлюється. Доріжки кочення і тіла кочення підшипника, що працюють при температурах вище 300°C , покривають інколи сріблом для попередження окислення і для використання в якості змащувального матеріалу.

Помилково думати, що сила тертя збільшується за рахунок зношування. Зазвичай цього не відбувається. Якщо зі збільшенням зношування коефіцієнт тертя підвищується, то це результат вторинних явищ, викликаних зміною шорсткості поверхні.

6.4. Тертя при рідинному змащуванні

Рідинне змащування характеризується тим, що поверхні, які труться, розділені шаром рідкого змащувального матеріалу (масла), який знаходиться під тиском. Тиск змащувального матеріалу зрівноважує зовнішнє навантаження. Шар мастила називають несучим шаром. При збільшенні його товщини більше товщини граничної плівки зменшується ступінь впливу твердої поверхні на молекули мастила, які знаходяться далеко від неї. Шари, які знаходяться на відстані більше 5 мкм від поверхні, набувають можливості вільно переміщуватися один відносно другого. При рідинному змащуванні опір руху визначається внутрішнім тертям (в'язкістю) рідини і складається з опору ковзанню шарів мастила по товщині змащувального прошарку. Цей режим тертя, з властивими йому досить малими коефіцієнтами тертя, є оптимальним для вузла тертя з точки зору втрат енергії, довговічності і зносостійкості. Сили тертя при рідинному змащуванні не залежать від природи спряжених поверхонь.

Явище тертя при рідинному змащуванні відкрив у 1883 році М.П.Петров, який створив основи теорії гідродинамічного змащування.

Існує два способи створення тиску в несучому шарі. За першим способом спеціально передбачається насос, який створює гідростатичний тиск, достатній для розділення поверхонь, які труться (рис. 6.2). Витік мастила через торці підшипника компенсується відповідною подачею насоса. За другим способом тиск у змащувальному шарі розвивається автоматично. Для цього необхідні належні конструктивні заходи і підбір марки мастила залежно від швидкості ковзання.

Згідно з обома способами створення тиску в несучому шарі розрізняють гідростатичні й гідродинамічні опори ковзання. Одні й другі є опорами тертя при рідинному змащуванні. Під опорою з рідинним змащуванням розуміють гідродинамічну опору. В побуті найбільш розповсюджені гідродинамічні.

Механізм утворення тиску в несучому шарі легко пояснити на прикладі плоскої опори (рис. 6.3). Нехай пластина А-А переміщується з деякою швидкістю під кутом до нерухомої підкладки Б-Б. Проміжок між пластиною і підкладкою заповнений в'язкою рідиною. Шар рідини, яка змочує пластину А-А, силами в'язкого тертя приводить у рух суміжний з ним по висоті шар. Так рух буде передаватися від одного шару до другого, за винятком шару, який змочує нерухому підкладку Б-Б. Результаті мастило буде втягуватися в

клиновий зазор, який звужується,

в ньому буде підтримуватися тиск, який буде постійним по довжині, оскільки на вхідній і вихідній кромках мастило стикається з атмосферою, де надлишковий тиск дорівнює нулю (рис.6.3б). Графіки швидкостей руху рідин у зазорі зображено на рис. 6.3а. Несуча здатність, або вантажопідйомність змащувального шару дорівнює рівнодіючій силі тиску. Такою силою можна навантажити пластину при даних її розмірах, швидкості переміщення і в'язкості масла.

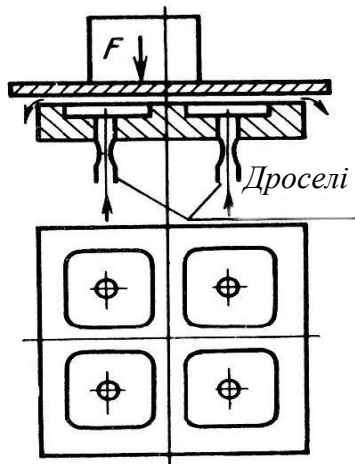


Рисунок 6.2. Схема роботи гідростатичної опори

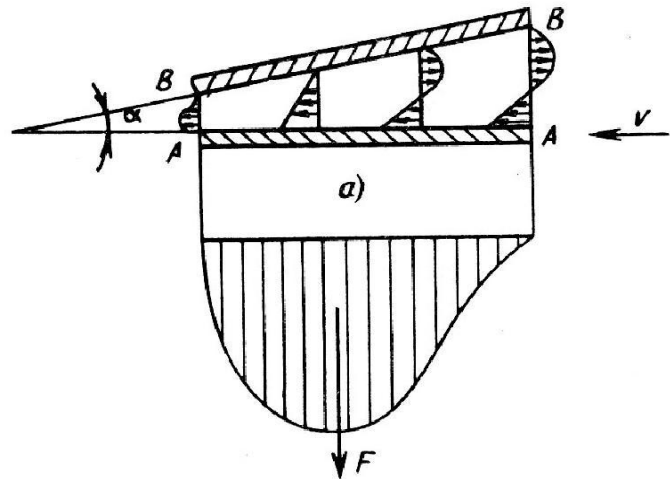


Рисунок 6.3. Схема утворення несучого шару змащування

Клиновий зазор є необхідною умовою підтримування режиму тертя при рідинному змащуванні в гідродинамічній опорі. У плоских опорах клиновий зазор створюється конструктивно, за допомогою нахилів поверхонь, як це має місце в повзунах і кільцевих опорах, чи завдяки самоустановці опорної поверхні (опорні підшипники типу підшипника Мічелла).

В опорному підшипнику ковзання діаметр отвору більший за діаметр цапфи, в результаті чого між цапфою і підшипником створюється клиновий серпоподібний зазор. При обертанні цапфи змащувальна рідина втягується силами в'язкості в зазор, який звужується, що призводить до підвищення тиску в шарі рідини. При достатній в'язкості мастильного матеріалу і швидкості на колі цапфи в шарі мастила створюється тиск, необхідний для відділення цапфи від підшипника – цапфа немов спливає на тонкому шарі мастила. Центр цапфи зміщується від початкового положення. Тиск у шарі мастила підтримується нагнітаючою дією цапфи, що обертається. Наявність підвищеного тиску в шарі мастила призводить до складної картини витікання рідини. Частина рідини, яка втягується в зазор, витискається через вихідне січення в бік, обернений напрямку обертання, і основний потік виноситься із навантаженої зони по обертанню вала, а інша частина витікає через торці підшипника.

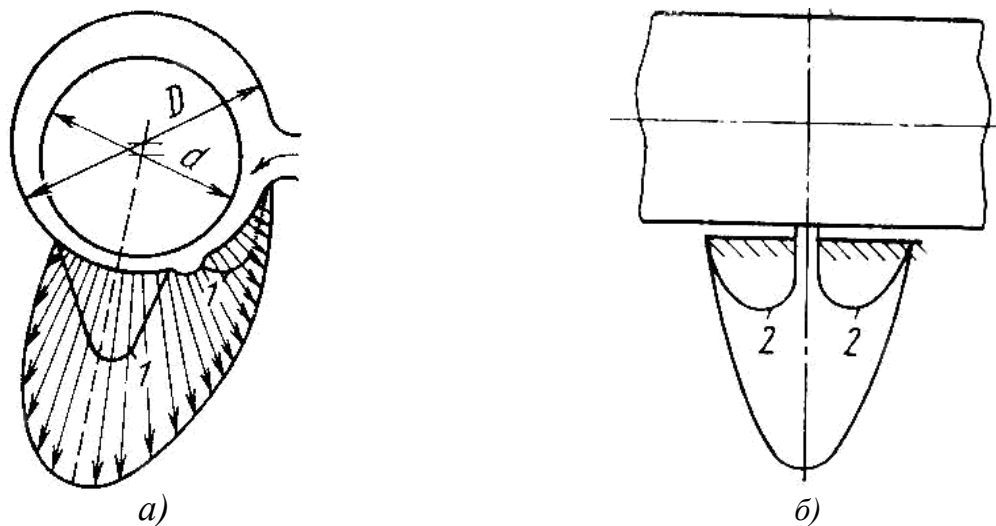


Рисунок 6.4. Розподіл тиску всередині масляного шару підшипника:
***a* – в поперечному перерізі; *б* – в поздовжньому перерізі; 1 – при поздовжній канавці;**
***2* – при кільцевій канавці**

На рис. 6.4 зображено положення цапфи в підшипнику при рідинному змащуванні й наведено графіки розподілу тиску в шарі мастила у поперечному січенні й по довжині.

Для здійснення рідинного змащування необхідно, щоб найменша товщина змащованого шару при гладких поверхнях, інших ідеальних умовах була не менше товщини, при якій проявляються об'ємні властивості рідини. Для шорстких поверхонь найменша товщина шару – мінімальна відстань між вершинами виступів нерівностей сполучених поверхонь.

Згідно з прикладною гідродинамічною теорією змащування в якості необхідної умови тертя при рідинному змащуванні мінімальний зазор між поверхнями має бути не менше суми середніх висот нерівностей поверхонь. Така концепція впливає з уяви, що виступи однієї поверхні контактують із впадинами сполученої поверхні. Тому, щоб не виникло зачеплення нерівностей, одне з тіл тертя має “спливати” не менше, ніж на суму середніх висот нерівностей. При визначенні найменшої допустимої (критичної) товщини змащувального шару враховують також ступінь деформації під навантаження, похибки виготовлення і монтажу деталей і можливість знаходження твердих домішок у мастилі.

Явище тертя при рідинному змащуванні в цілому складніше, ніж це впливає з гідродинамічної теорії, яка охоплює чисто механічний бік процесу. Молекули поверхнево-активних речовин, які утримуються в мастилі, адсорбуються на поверхні в мономолекулярний шар, на якому створюється граничний шар. До граничного шару приєднується зона мікротурбулентного руху, за якою йде ламінарний потік мастила (рис. 6.5).

Тертя при рідинному змащуванні можливе не тільки між поверхнями ковзання. При коченні, чи при коченні з ковзанням циліндричних і взагалі криволінійних поверхонь, що звужується з боку входу, в зазор втягується

змащувальна рідина, яка за деяких умов (навантаження, швидкості, пружних характеристик і геометрії поверхні) розділяє їх своїм шаром.

Пластичні змащувальні матеріали, як і рідинні, можуть забезпечити режим тертя, що виключає безпосередній контакт поверхонь і їх взаємне втілення. На відміну від мастил, які є в'язкими рідинами, пластичні мастильні матеріали володіють в'язкопластичними властивостями. Тому потік такого матеріалу має свої особливості.

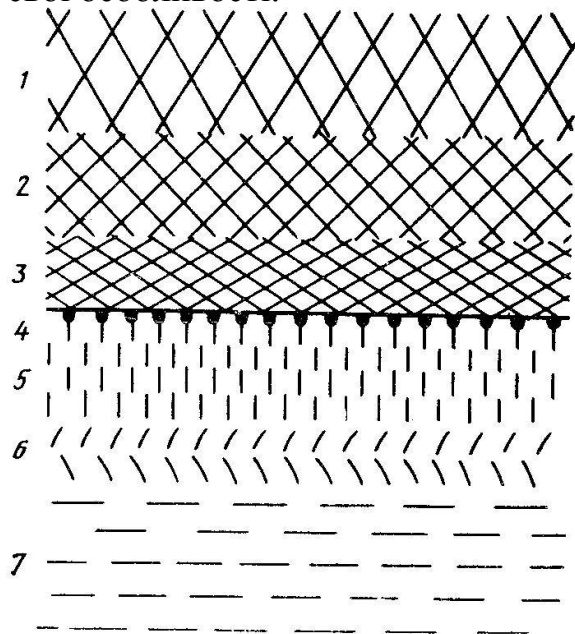


Рисунок 6.5 Схематичний розріз металічної поверхні і шару рідинного мастильного матеріалу: 1 – вихідна структура матеріалу; 2 – кристали, деформовані у напрямку обробки; 3 – подрібнені й розмащені кристали, окиси й адсорбоване масло; 4 – адсорбований моношар масла; 5 – граничний шар масла; 6 – зона мікротурбулентності; 7 – ламінарний потік

6.5. Тертя при напіврідинному змащуванні

Таке тертя має місце за наявності одночасно рідинного і граничного змащування.

Нормальне навантаження при напіврідинному змащуванні зрівноважується нормальною складовою сил взаємодії поверхонь на площадках їх контакту і силами гідродинамічного тиску в шарі мастила. Відносна доля кожної реакції залежить від навантаження, швидкості взаємного переміщення поверхонь, шорсткості, жорсткості і макрогеометрії, кількості і в'язкості мастила. Сила тертя складається з дотичної складової сил взаємодії поверхонь і опору в'язкому зсуву.

Гідродинамічна дія рідини може виникнути в двох випадках. По-перше, якщо макрогеометрія поверхонь, які контактують, така, що існує зазор, який звужується і в який мастило може затягуватися при терті, то при подачі його в достатній кількості і при відповідних параметрах режиму тертя виникає потік і створюється піднімальна сила. Але ця сила недостатня для повного сприйняття навантаження при напіврідинному змащуванні. Потік рідини обтікає ділянки взаємного контакту поверхонь.

По-друге, якщо нерівності між площадками контакту утворюють у напрямку відносного переміщення деталей місця звуження і розширення по висоті. При достатній кількості мастила між поверхнями тертя заповнені мікропорожнини звуження відіграють роль гідродинамічних мікроклинів (рис.

6.6). Гідродинамічна дія мастила на мікроклінах проявляється вже при дуже малій швидкості ковзання.

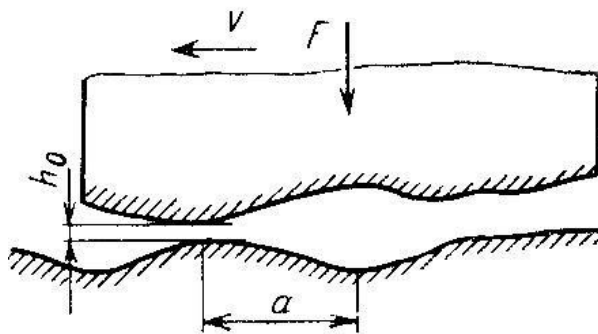


Рисунок 6.6. Схема елементарного гідродинамічного клина, створеного нерівностями поверхонь, які труться: a – довжина елементарного масляного клина; h_0 –початковий зазор між поверхнями у вершині масляного клина

Переваги змащувальних мастил перед твердими мастильними матеріалами полягає в тому, що вони можуть не тільки створювати гідродинамічний ефект за певних умов, але й служити для охолодження вузла тертя.

6.6. Режими тертя в підшипниках ковзання

Умови переходу з одного виду тертя в інший у присутності рідинного мастила розглянемо на прикладі підшипника ковзання.

Якщо кількість мастила обмежена, але достатня для утворення адсорбованого моношару і граничної плівки, то при терті первинний шар на вершинах нерівностей поверхонь швидко зношується, і тертя при граничному змащуванні перейде частково в тертя без змащувального матеріалу. Але завдяки рухомості полярно-активних молекул адсорбований моношар швидко відновлюється, внаслідок чого умови тертя покращуються. Це може призвести до коливань коефіцієнта тертя.

В результаті мастило через якийсь період спрацьовується. Якщо ж, крім витрат на утворення граничної плівки, є надлишок мастила, який достатньо заповнює впадини нерівностей, то він служить для відновлення граничної плівки, яка зношується. В цьому випадку тертя при граничному змащуванні стійке. При збільшенні подачі мастила до необхідної для створення гідродинамічного ефекту на виступах нерівностей поверхонь, чи на макрогеометричних нерівностях сполучених тіл, тертя при граничному змащуванні переходить у тертя при напіврідинному змащуванні. Останній вид тертя не залежить від швидкості ковзання поверхонь і в'язкості мастильного матеріалу.

Для прикладу розглянемо підшипник ковзання. Нехай навантаження, в'язкість мастила і геометричні параметри з'єднання зберігаються постійними. Будемо змінювати швидкість обертання цапфи. При малій швидкості ковзання поверхонь гідродинамічний ефект їх відокремлення не спостерігається, бо мастило витискується із зазора. Тертя тільки напіврідинне. При збільшенні швидкості ковзання гідродинамічні сили зростають і взаємодія поверхонь зменшується, зрештою, при деякій швидкості відбувається повне розділення поверхонь і настає режим

тертя при рідинному змащуванні. Подальше збільшення швидкості призводить до підвищення в шарі мастила, і коефіцієнт тертя збільшується. Мінімум коефіцієнта тертя відповідає початку тертя при рідинному змащуванні.

Аналогічне явище будемо спостерігати при зміні в'язкості змащувального матеріалу: при малій в'язкості мастила рідинного змащування не буде, але після досягнення згадуваного мінімуму коефіцієнта тертя збільшення в'язкості мастила підвищує опір тертю. Протилежно діє питома навантаження: при великому тиску на опору умови для рідинного змащування несприятливі, зменшення навантаження до деякої величини призводить до "спливання" цапфи: подальше зменшення навантаження супроводжується збільшенням товщини несучого шару змащувального матеріалу і опором тертю. Таким чином, режим тертя в підшипнику визначається в'язкістю, швидкістю

ковзання і тиском P , точніше, фактором $\frac{\eta \cdot v}{P}$.

Наочну уяву про умови переходу одного режиму тертя в інший дає

діаграма Герсі, в якій коефіцієнт тертя f пов'язаний з параметром $\frac{\eta \cdot v}{P}$ (рис. 6.7). Цей параметр називають характеристикою режиму підшипника. На діаграмі – лінія $a-a$, яка проходить через точку мінімуму коефіцієнта тертя. Припустимо, що підшипник працює в режимі граничного змащування і з

деяких причин підвищився тиск. Тоді значення $\frac{\eta \cdot v}{P}$ зменшується, і початкова точка на діаграмі зміститься вліво і вгору. Сила P тертя зростає, температура поверхонь і мастила знизиться, і сила тертя зростає. При граничному змащуванні з підвищенням навантаження зростає температура, і гранична плівка місцями руйнується – тертя буде проходити без змащувального матеріалу. Лінія $b-b$ відокремлює область тертя при граничному змащуванні від області поверхонь, що не змащуються. Аналогічно можна встановити нестійкість коефіцієнта тертя при зменшенні швидкості в зоні тертя при граничному змащуванні і тертя поверхонь, які не змащуються, і при падінні в'язкості мастила у випадку підвищення температури.

Якщо ж режим тертя відповідає точці, розміщеній праворуч від лінії $a-a$, то у вузькому інтервалі зміни $\frac{\eta \cdot v}{P}$ сила тертя стабільна. Наприклад, короточасне

наростання швидкості ковзання поверхонь може викликати дуже сильне тепловиділення в підшипнику, в'язкість мастила і коефіцієнта тертя зменшаться, характеристика режиму встановиться.

Фактор $\frac{\eta \cdot v}{P}$ є характеристикою режимів тертя при напіврідинному і

рідинному змащуванні. При інших видах тертя властивості в'язкості мастила можна не брати до уваги. Що стосується зміни коефіцієнту тертя при малих,

близьких до нуля значеннях характеристики режиму, то залежно від матеріалів деталей і середовища крива від точки, яка відповідає коефіцієнту тертя спокою (швидкість ковзання $=0$), може монотонно спадати або зростати і, проходячи через максимум, зменшуватися до критичного режиму (мінімального коефіцієнта тертя).

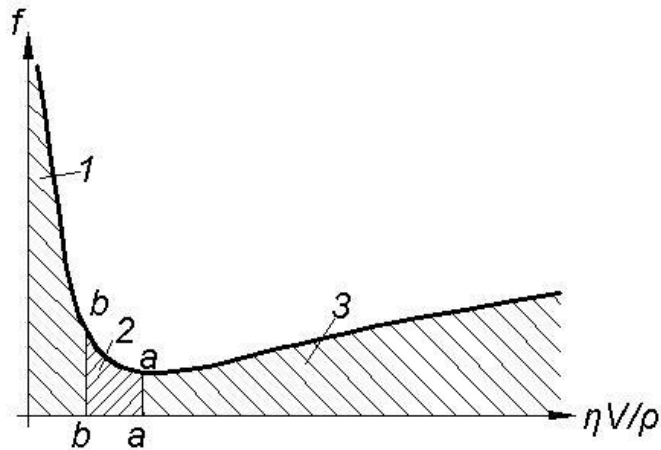


Рисунок 6.7. Діаграма режимів тертя в підшипнику ковзання: 1 – область тертя незмащених поверхонь; 2 – область тертя при граничному і напіврідинному змащуванні; 3 – область тертя при рідинному змащуванні

Діаграма Герсі придатна також для аналізу явищ тертя в підп'ятниках і парах тертя із зворотно-поступальним рухом. У цих парах, як бачимо з діаграми, протягом одного ходу можливі різноманітні режими тертя.

6.7. Особливості тертя кочення

Сила тертя кочення в десятки разів менша сили тертя ковзання. Наявність сили тертя кочення пояснювали раніше ковзанням сполучених поверхонь. Пізніше було встановлено, що воно впливає на силу тертя кочення. Опір коченню пояснюється деформаційними втратами в розміщеному нижче твердому тілі. За відсутності пластичної деформації тертя зумовлене гістерезисними втратами в твердому тілі.

Взаємне просковзування поверхонь можна уявити при розгляданні кочення кульки (рис.6.8). Коло АВ кульки переміщується посередині канавки, а коло CD торкається її країв. Як бачимо з рисунка, коло АВ проходить за один оберт кульки більшу відстань, аніж коло CD. Ця різниця й зумовлює ковзання поверхонь тертя.

Гістерезисні втрати при терті кочення пояснимо з допомогою рисунка 6.9. Ще О. Рейнольдс помітив, що коли циліндр із твердого матеріалу котиться по плоскій поверхні гуми, то при кожному оберті він проходить шлях менший, ніж довжина кола циліндра. Він припустив, що гума розтягується в точці С по-іншому, ніж у точках BD, у результаті має місце, як вже згадувалося, просковзування з відповідним розсіюванням енергії. З рис. 6.8 і 6.9 бачимо, що попереду під кулькою в точці Е утворюється

заглибина, а позаду в точці А - деформаційний матеріал повністю (при гумі), а при металах частково відновлюється під дією сил пружності або пружного гістерезису. Крім того, внаслідок залишкової пластичної деформації сили реакції позаду кульки менші, ніж сили тиску спереду неї. В результаті кулька виконує роботу деформації.

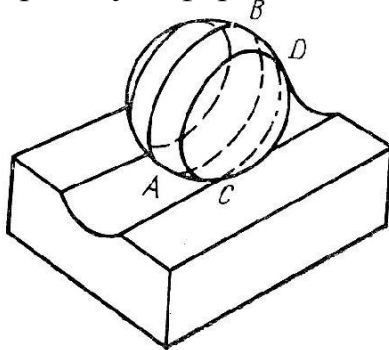


Рисунок 6.8 Кулька, яка котиться по канавці

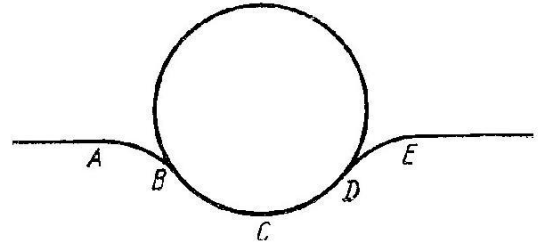


Рисунок 6.9 Кулька, яка котиться вправо по плоскій пружній основі

На поверхнях тіл кочення, як і при їх ковзанні, виникають сили зчеплення. Адгезійне зчеплення незначно впливає на сили тертя кочення (наявність граничного змащування майже не впливає на силу тертя кочення), але відіграє велику роль у зношуванні тіл кочення.

За допомогою методу радіоактивних ізотопів доведено, що при коченні кульки з сапфіру по поверхні міді відбувається деяке перенесення металу з доріжки кочення на кульку. Якщо поверхні змащені олеїною кислотою, то опір коченню кульки не змінюється, однак кількість перенесеної міді зменшується більш ніж у 4 рази.

При терті кочення у випадку твердих тіл деформації поверхонь невеликі й окисні плівки, які є на поверхнях тертя, не піддаються значному руйнуванню. Тому ковзання поверхонь проходить не по металу, а по окислах, які можуть зношуватися. Це і пояснює вплив ковзання на зношування тіл кочення.

Для припрацьованого стану поверхонь за експериментальними даними сила тертя кочення

$$F = \frac{k \cdot N^n}{D^m}, \quad (6.3)$$

де k – константа, яка залежить від матеріалу; N – навантаження на кульку; D – діаметр кульки; $n = 1,7...1,85$; $m = 1,5...1,6$.

Сила тертя підшипника кочення при високих швидкостях залежить від в'язкості мастила і може досягати значних величин. На силу тертя підшипника кочення впливає в'язкість мастила, тертя в сепараторі підшипника, розмір кульок, шорсткість поверхні та ін.

Момент тертя підшипника кочення

$$M = 0,5 \cdot F_a \cdot Q \cdot d \text{ або } M = 0,5 \cdot F_t \cdot T \cdot d, \quad (6.4)$$

де f_a і f_m – коефіцієнти тертя при радіальному й осьовому навантаженні, віднесені до діаметра вала d ; Q і T – радіальне й осьове навантаження.

Сила тертя в підшипниках кочення збільшується у випадку технологічних і монтажних похибок, підвищених швидкостей і при терті в ущільненнях. Значення коефіцієнтів тертя в різних видах підшипників кочення знаходяться в діапазоні 0,0020,008.

6.8. Ефект аномально низького тертя

Вчені А.А.Сілін, Е.А.Духовський та інші в 1969 р. відкрили явище наднизького тертя. Коефіцієнт тертя поліетилену і пропілену при терті у вакуумі під дією потоку атомів гелію (і деяких інших елементів) зменшився на два порядки. Спочатку коефіцієнт тертя дорівнював $f=0,1...0,13$, а при ввімкненні атомного пучка густиною 10^{13} атомів на 1 см^2 з енергією 2кеВ зменшився до $f = 0,0015$. Досліди проводили за нормальної температури, швидкості ковзання – 2 м/с, тиску 20...60кПа і при розрідженні в камері $655 \cdot 10^{-6} \dots 655 \cdot 10^{-4}$ Па. Після припинення опромінення коефіцієнт тертя відновлювався до початкових значень. На полістиролі й політетрафторетилені ефект аномально низького тертя не спостерігався.

Інтенсивність зношування при наднизькому терті різко зменшується. Дослідження довели, що при опроміненні тонкий поверхневий шар речовини переходить в упорядкований стан. Цей стан характеризується малою поверхневою енергією і залишається стійким за нормальної й підвищеної температур.

Ефект може проявлятися і без опромінення, якщо речовина має шарувату кристалічну структуру (наприклад, молібденіт). Орієнтація структури такої речовини при терті у вакуумі відбувається за рахунок енергії тертя. Однак цьому процесу заважають домішки, особливо молекули води. Бомбардування прискореними частинками виганяє воду, що сприяє швидшій орієнтації речовини.

Одним з напрямів, що активно розвиваються в цей час, є створення самозмащувальних матеріалів, здатних зберігати свої властивості у високому вакуумі за температур -150 до $+450^\circ\text{C}$. У космічних апаратах як самозмащувальні матеріали використовують дисульфід молібдену, однак цілком задовольнити зростаючі вимоги якості самозмащувальних матеріалів вони не можуть. Більш перспективнішим у цьому випадку є диселенід молібдену.

Автори ефекту створили новий самозмащувальний матеріал, здатний працювати у важких і екстремальних умовах. У вакуумі при високих навантаженнях він витримує як низьку температуру, так і нагрівання до 1000°C , а при опроміненні реалізує наднизьке тертя. Матеріал випробуваний у реальних конструкціях і застосовується на підприємствах у різних галузях. Джерела опромінення можуть бути портативними, а додаткові витрати енергії для їх живлення малі в порівнянні з виграшем від зменшення втрат на тертя.