

Лекція 4

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

План

- 4.1. Класичні закони тертя
- 4.2. Загальні теорії тертя
- 4.3. Структурно-енергетична теорія зовнішнього тертя
- 4.4. Забруднення поверхонь. Плівки на металічних поверхнях
- 4.5. Особливості тертя в умовах вакууму
- 4.6. Перенос металу при терті
- 4.7. Твердість металів

4.1. Класичні закони тертя

Леонардо да Вінчі (1452-1519) перший серед тих, хто розробив основні поняття тертя і чийі праці дозволили французькому вченому Амонтону провести експерименти і сформулювати перші закони тертя. Кулон продовжив роботи Амонтона. Класичні закони тертя, які впливали із цих перших досліджень, можна сформулювати так:

- 1) сила тертя пропорційна навантаженню;
- 2) коефіцієнт тертя не залежить від уявної (номінальної) площі контакту;
- 3) статичний коефіцієнт тертя вищий кінетичного;
- 4) коефіцієнт тертя не залежить від швидкості ковзання;
- 5) коефіцієнт тертя залежить від матеріалу.

Класичні закони існували без значних змін донедавна. Однак у розвитку і досягнень науки і техніки більшість із цих законів виявилися неточними. Водночас класичні закони дають на диво повну уяву про механізм сухого тертя, особливо, якщо врахувати можливості перших дослідників.

Перший закон справедливий в усіх випадках, за винятком високих тисків, за яких фактична площа контакту по величині наближається до уявної. Зазвичай його записують у вигляді

$$F = f \cdot N, \quad (4.1)$$

де F – сила тертя;

f – коефіцієнт тертя;

N – нормальне навантаження (нормальна реакція).

Формулу прийнято називати законом Кулона і можна розглядати як визначення коефіцієнта тертя.

Решта класичних законів мають певні обмеження.

Другий закон є справедливим тільки для металічних матеріалів, які мають певну границю текучості, і не може бути використаний для пружних і в'язкопружних матеріалів.

Дія третього закону теж не розповсюджується на в'язкопружні матеріали.

Фактично в наш час не існує однієї думки щодо того, чи може взагалі в'язкопружний матеріал мати коефіцієнт тертя спокою.

Четвертий закон не справедливий ні для одного матеріалу.

П'ятий закон стверджує, що коефіцієнт тертя залежить від матеріалу. Однак його можна розглядати як спостереження перших дослідників, а не як окремий закон.

4.2. Загальні теорії тертя

Нижче коротко описано деякі загальні теорії, запропоновані для пояснення природи сухого тертя.

Механічне зчеплення. В 1699 році Амонтон і де ля Гір припустили, що тертя металів можна пояснити зчепленням елементів шорстких поверхонь. Цей механізм пояснює існування тертя спокою, а також тертя руху як силу, необхідну для підйому нерівностей верхньої поверхні над нерівностями нижньої.

Молекулярне притягання. Томлінсон 1929 року і Харді 1936-го пояснили сили тертя дисипацією енергії при "вириванні" атомів одного тіла із зони притягання атомів поверхні другого тіла. Харді визначив адгезійне тертя як молекулярно-кінетичний процес руйнування зв'язків, в якому енергія витрачається на розтяг, розрив і релаксацію поверхневих і підповерхневих молекул.

В наш час механічна і молекулярна концепції зазнали значних змін: механічна – збагатилася уявою про закони пружно-пластичної деформації і руйнування, молекулярна – дослідженнями з фізики граничного шару і тонкої структури металу поверхонь, що труться.

З'явилася велика кількість так званих комбінованих теорій, основу яких складають механічна (деформаційна) уява і міркування про молекулярно-адгезійну взаємодію (розвинені в роботах І.В. Крагельського, Г.І. Єпіфанова, Г. Ернста, П. Мерченита та інших).

У роботах Б.В. Дерягіна і Є. Рабіновича висунуті теорії, в яких на першому плані стоїть атомно-молекулярна взаємодія поверхонь тертя, а механічна взаємодія враховується як результат роботи атомно-молекулярних зв'язків.

Однак велика різноманітність матеріалів, що застосовується, ускладнення умов механічного навантаження і фізико-хімічної дії середовища зробили можливим використання класичних понять про взаємодію на молекулярному рівні. Ця взаємодія стала затінятися активацією фізико-хімічних процесів, неминучих при навантаженні тертям, явищами фізичної і хімічної адсорбції, дифузії.

Природно, що при цьому і механічна взаємодія втратила своє переважаюче значення.

Електростатичні сили. Згідно з цією теорією явище стрибкоподібного руху при терті металічних поверхонь можна пояснити збудженням потоку електронів, які створюють накопичення зарядів протилежної полярності на поверхні розділення. Ці заряди утримують поверхні за рахунок електростатичного притягання.

Зварювання, зріз і проорювання. Цю теорію запропонував Ф.П. Бауден 1950 року. Високий тиск, що виникає на окремих плямах дотику, викликає місцеве

зварювання і з'єднання, які таким чином утворюються, зрізуються при наступному відносному ковзанні поверхонь. При проорюванні матриці м'якшого металу нерівностями твердішого металу виникає деформаційна складова сили – тертя. Ця теорія дає задовільне фізичне пояснення тертя металів на макроскопічному рівні, водночас як у випадку еластомірів справедливішою слід вважати теорії молекулярного притягання.

4.3. Структурно-енергетична теорія зовнішнього тертя

4.3.1 Основні положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя

В рамках уяви, яка існує з часів Ш.Кулона, тертя визначається як деяка взаємодія шорстких поверхонь. Більшість концепцій будуються на цьому визначенні. Водночас стало зрозуміло, що взаємодію поверхонь розглядають як фундаментальне явище.

Вирішення проблеми тертя, змащувальної дії і зношування на сучасному етапі розвитку виробництва неможливе без наукового підходу. Розроблення загальної, досить повної і несуперечної теорії тертя і зношування машин, що пов'язувала б параметри навантаження з усім комплексом механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалів і робочих середовищ при терті, стає однією із центральних проблем машинобудування.

Прискорений розвиток ідей теоретичної фізики про структури відкрили в останні десятиріччя великі можливості розроблення проблеми тертя, змащувальної дії і зношування з позицій термодинаміки і матеріалознавства.

Вчення про тертя і зношування виникло із потреби механіки і на початку розвивалося як розділ механіки. Це допускалося на ранніх етапах розвитку техніки (тихохідні машини, прості матеріали, сухе тертя). В подальшому загальний прогрес техніки, розширення й ускладнення умов тертя, розроблення і застосування нових матеріалів розкрили всю складність і багатогранність явищ тертя і зношування.

Встановлено, що поряд із механічними велике значення при терті мають фізичні, хімічні, механохімічні і теплові процеси. Виникла також необхідність спостерігати процеси тертя на всіх його стадіях: статичному контакті, початку руху, припрацюванні, стаціонарному режимі і при переході до пошкоджувальності. Стало зрозуміло, що сучасні завдання теорії тертя і зношування не можуть бути вирішені за допомогою моделей на основі таких спрощених видів взаємодії, як “механічна”, “молекулярна”, “адгезійна” і т.п., тим паче, що, не зважаючи на деяку різницю в їх назві, ці моделі залишаються за своєю суттю механічними.

При механічному підході, в якому силу тертя визначають тільки як опір деформування макронерівностей і переборення молекулярного притягання в точках дотику, проходить нехтування сучасною уявою про природу тертя. Отримані формальні вирази молекулярно-механічної теорії не є рівняннями руху поверхневого шару як суцільного середовища – в них відсутня швидкість.

Модель фрикційної втоми не містить важливих експериментальних

результатів з трибохімічних і теплових явищ, фазових і структурних перетворень, інших факторів, що визначають дійсні механізми руйнування. Така модель не може бути основою вибору матеріалів для зносостійких пар тертя.

Українські вчені на чолі з професором Б.І.Костецьким уперше довели, що тертя є процесом перетворення зовнішньої механічної енергії в енергію внутрішніх процесів, а закономірності цього перетворення визначаються структурним станом матеріалів системи тертя. Система тертя складається із упорядкованих певним чином і пов'язаних певним відношенням елементів, що відносяться до великого класу відкритих термодинамічних систем, тобто таких систем, які можуть обмінюватися із середовищем як енергією, так і речовиною.

В результаті великого комплексу систематичних досліджень із використанням сучасних методів експериментальної фізики професор Б.І. Костецький і його учні розробили основи структурно-енергетичної теорії тертя, змащення і зношування.

Різноманітність проявів тертя і зношування поділяють на дві чітко виражені ділянки – стаціонарний процес і процеси пошкоджуваності. Співвідношення різних видів взаємодії у стаціонарних процесах тертя мають певний характер, що дозволило встановити закономірності, виходячи із загальних законів руху, збереження енергії, мінімальних принципів тощо.

Підхід з позиції матеріалознавства до проблеми тертя зумовлений структурною чутливістю всіх параметрів тертя і зношування. Прикладом структурної чутливості кількісних показників тертя (сили і коефіцієнта тертя) є анізотропія коефіцієнта тертя і висока залежність його величини від структурного стану матеріалів у вузлах тертя.

Структурна чутливість показників зношування характеризується даними про питому роботу поверхневого руйнування при різних видах зношування (див. таблицю 4.1). Очевидно, що без притягнення структурних аспектів пояснити зміни величини питомої роботи руйнування на 5...6 порядків неможливо.

Таблиця 4.1.

Питома робота руйнування для різних видів зношування

Вид зношування і пошкодження	Питома робота зношування або пошкодження 10^{10} Дж/м³
Нормальне механохімічне зношування	1 000 000 ... 10 000 000
Механохімічна форма абразивного зношування	10 000 ... 1000 000
Фреттінг-процес	1000 ... 10 000
Схоплення II роду	100 ... 1 000
Схоплення I роду	10 ... 100
Механічна форма абразивного зношування	1 ... 10

Одну із перших спроб енергетичного підходу до тертя зробив професор Б.І.Костецький ще в 1950 р. Енергетичний підхід пов'язаний з термодинамічною природою тертя. Тобто фундаментальні принципи трибології є у відповідності з першим і другим законами термодинаміки.

У відповідності з першим законом термодинаміки робота сил тертя $A_{тер}$ в основному перетворюється в теплоту Q і частково накопичується (поглинається) матеріалами трибосистеми (ТС) - E : $A_T = Q + E$.

Насправді $A_T = Q + E_{вн} + E_n + E_{\partial} + E_c$, де $E_{вн}$ – зміна внутрішньої енергії; E_n – приріст поверхневої енергії; E_{∂} – енергія зовнішнього розсіювання (дисипація); E_c – робота, витрачена на зсув і ковзання в граничному шарі; E_{∂} і E_n – на практиці дуже малі.

Ця залежність і є основним положенням структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя, яку розробив Б.І. Костецький.

Дослідження енергетичного балансу тертя за допомогою прицевійного калориметрування дозволило встановити, що від умов тертя залежить не тільки загальна величина роботи тертя A_T , а й співвідношення між основними її складовими – кількістю енергії E , що накопичується, і кількістю виділеного тепла Q . Це співвідношення характеризує працездатність трибосистеми, визначається властивостями матеріалів пари тертя M , значеннями нормального навантаження P , швидкістю відносного переміщення V , фізико-хімічними характеристиками змащувального середовища C , часом роботи пари тертя L :

$$\frac{\Delta E}{Q} = \varphi(M; P; V; C; L). \quad (4.2)$$

Основною складовою енергетичного балансу тертя є величина енергії, яка накопичується E , що вносить вирішальний вклад у формування сил тертя, витрачається на утворення фаз і характер їх наступного руйнування. Аналіз закономірностей енергетичного балансу, суміщений з аналізом зміни структури, дозволяє зробити висновок, що всі процеси при терті є результатом двох основоположних явищ – активації (збільшення енергії матеріалів трибосистем) і пасивації (її зменшення).

У відповідності з другим законом термодинаміки ентропія (S) в закритих системах зростає. Однак у відкритих системах, за деяких умов взаємодії потоків енергії і речовини, проходять процеси упорядкування матерії, які відповідають зменшенню виробництва ентропії й утворенню самоорганізованих дисипативних структур (ДС). Утворення просторових і часових структур є загальною і фундаментальною властивістю матерії. Можливість утворення структур, що самоорганізуються в живій і неживій природі, обґрунтована теоретичною фізикою і має величезне значення в техніці.

Умови виникнення стійких, що самоорганізуються, дисипативних структур полягають у наступному:

1. Система термодинамічно відкрита, тобто вільно обмінюється енергією і речовиною з середовищем. Динамічні рівняння системи нелінійні.

2. Відхилення від рівноваги перевищують критичні величини.

3. Мікроскопічні процеси проходять кооперативно (синергетично).

Умови самоорганізації й утворення дисипативних структур виконуються для будь-якої триботехнічної системи в певних для кожного типу трибосистем, умовах активації й пасивації.

Розглядаючи основне положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя

$$A_T = Q + E, \quad (4.3)$$

треба відзначити, що робота зовнішнього тертя ніколи повністю не переходить у теплову: $A_T \cong Q$, а енергія, що поглинається, ніколи не дорівнює нулю: $E \neq 0$.

Відношення E до A_T величина непостійна і залежить від властивостей матеріалів трибосистеми й умов зовнішнього тертя:

$$\frac{\Delta E}{A_T} \neq \text{const}; \quad \frac{\Delta E}{A_T} = \varphi(P, V, C) \quad (4.4)$$

де p – тиск; v – швидкість ковзання; C – вектор параметрів тертя – властивостей матеріалів, середовища, температури і т.п.

Принципові схеми, що описують можливі енергетичні співвідношення для відповідних діапазонів зміни механічної дії – тиску і швидкості руху – зображено на рис. 5.1.

Розглянемо розвиток процесів тертя, зношування й поведінку основних складових енергетичного балансу, їх співвідношення у різних областях при зміні тиску (P). Ділянка I залежності f - p характеризує деяку перехідну область малих значень p , в якій ще немає умов для повної нормалізації процесу тертя. Значення питомого тиску ще недостатні для граничного зміщення й текстуровання необхідних для умов пристосовності матеріалу. В перехідній області сили пов'язані з наближенням окремих ділянок поверхонь на відстанях порядку міжатомних, мають найбільшу питому вагу у формуванні сил тертя.

Відношення основних складових енергетичного балансу тертя E і A_T прямують до своїх мінімальних значень $E/A_T \rightarrow \min$.

Ділянка II є загальною і найважливішою областю нормального зовнішнього тертя. Інтенсивність процесу трансформації і руйнування поверхонь контакту мінімальна. Такий режим тертя забезпечує протікання на межі розділу і в тонких поверхневих шарах суворо визначених певних механо-фізико-хімічних процесів. Пластична деформація набуває форму поверхневого текстуровання.

Відношення E/A_T має постійне і мінімальне значення $E/A_T = \min$.

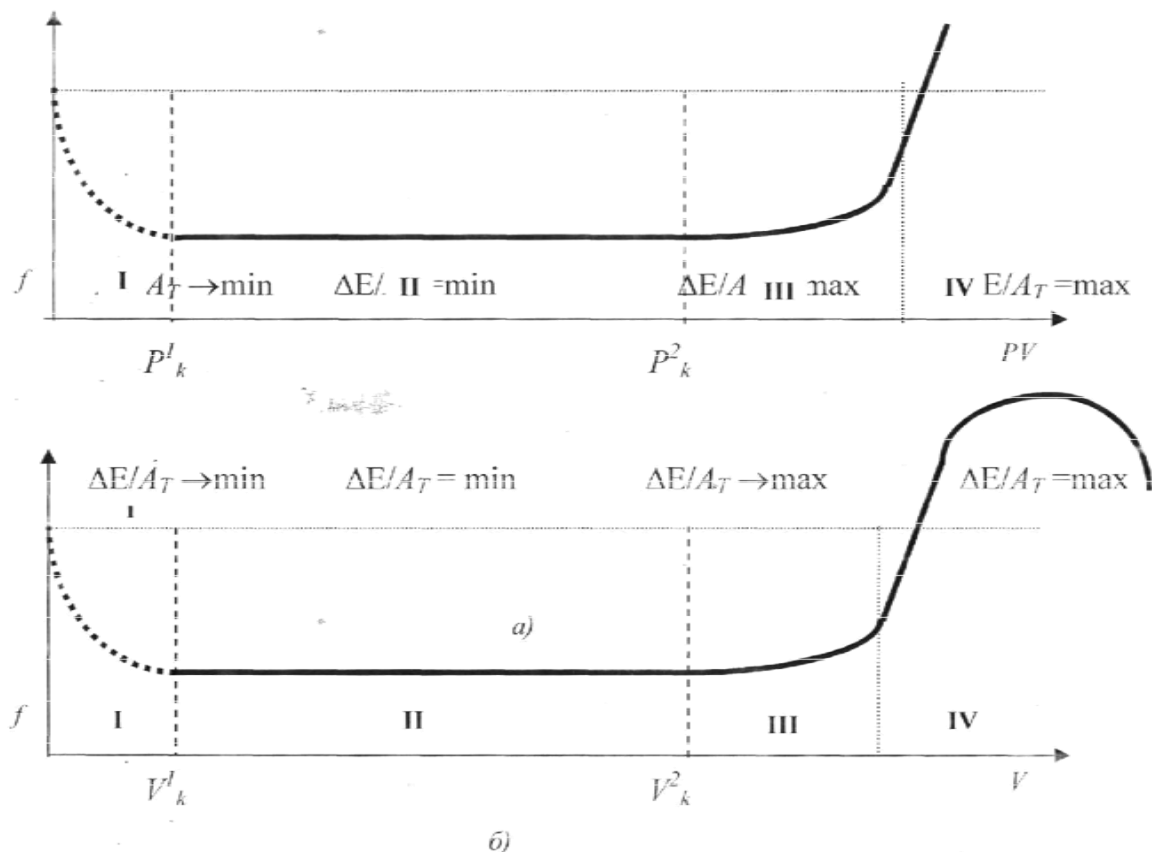


Рисунок 4.1. Енергетичні співвідношення для різних областей залежності коефіцієнта тертя від нормального тиску (а), P ; залежності коефіцієнта тертя від швидкості V (б): I – ділянки перехідної області малих значень P і V ; II – ділянки нормального зовнішнього тертя; III – ділянки порушення динамічної рівноваги; IV – ділянки розвитку патологічних процесів

Енергія поглинання E затрачається на текстурування й активізацію поверхневих шарів металу. Рівновага стану активізованих шарів досягається за рахунок їх насичення активною речовиною, що є в зоні тертя, і теплообміну. Основна частина роботи сил тертя в цій області перетворюється в теплоту:

$$A_T \approx Q.$$

Для області характерні лінійні залежності коефіцієнта тертя від навантаження типу емпіричного закону Амонтона - Кулона. Відсутні суттєві зміни стану поверхневого шару, природи контакту і виду зв'язку (майже не спостерігаються).

Подальше підвищення тиску (ділянка III рис. 4.1а) викликає порушення стабільності кількісних характеристик процесу без суттєвих змін природи контакту і видів зв'язку. Деформація і пошкодження вторинних захисних структур проходять інтенсивніше, товщина текстурованого шару перевищує критичні значення, виникають процеси розпаду нестабільних структур сплавів і т.п. Залежність коефіцієнта тертя від нормального тиску відхиляється від лінійної. Співвідношення E/A_T на цій ділянці непостійне і прагне до деякого максимального (критичного) значення для даних умов тертя: $E/A_T \max$. При подальшому підвищенні тиску величина E досягає критичних значень, відбувається кількісна зміна процесу

тертя, властивостей поверхневих шарів у зоні контакту і видів поверхневих зв'язків. Кінцевим результатом є виникнення патологічних режимів тертя і пошкодження поверхонь контакту. Можливі переходи до тужавіння, зминання, проорювання тощо (ділянка IV, рис. 4.1). Ці зміни, як правило, носять стрибкоподібний, різко виражений характер. Екстраполяція залежності коефіцієнта тертя від нормального тиску на ділянку IV не має змісту.

Внаслідок зміни фізичної природи контакту функція, що виражає залежність коефіцієнта тертя від параметрів зовнішнього навантаження, для різних патологічних процесів неоднозначна. Наприклад, при виникненні процесів тужавіння очевидний перехід зовнішнього тертя у внутрішній. Функція, що виражає закономірність зміни величин зовнішнього тертя, в цьому випадку, очевидно, має значний стрибок до нескінченності (зупинки руху). У випадку теплових процесів, що викликають фазові перетворення загартованих сталей або зміни кристалічної структури при терті деяких металів, слід чекати плавнішої зміни коефіцієнта тертя.

Співвідношення E/A_T в області, яке розглядаємо, дорівнює деякому критичному значенню, що відповідає тому чи іншому патологічному процесу:

$$E/A_T = \max.$$

Розвиток процесів тертя відповідно до енергетичних співвідношень для випадку зміни швидкості ковзання відбувається аналогічно тому, як зображено на рис. 4.1б.

На першій (I) перехідній ділянці невстановлених процесів відношення E/A_T не постійне, прагне до лінійно встановленого значення.

Ділянка II характеризується стабільними (постійними) і мінімальними значеннями співвідношення E/A_T . Ділянка III пов'язана з порушенням динамічної рівноваги утворення і руйнування вторинних захисних структур, відношення E/A_T збільшується до деяких критичних значень. Ділянка IV ($E/A_T = \max$) характеризує перехід до патологічних явищ, коли $E/A_T = \max$. Таким чином, при розгляді принципової залежності співвідношення енергії, що поглинається, до роботи зовнішнього тертя від параметрів навантаження можна виділити 4 області:

$$I - E/A_T \rightarrow \min; II - E/A_T = \text{const}; III - E/A_T \rightarrow \max; IV - E/A_T = \max. \quad (4.5)$$

В четвертій області спостерігаються різкі стрибкоподібні зміни основних складових енергетичного балансу (A_T , Q , E) і їх співвідношення.

Співвідношення E/A_T повністю визначається процесами, що виникають при ковзаючому контакті, тобто видом взаємодії поверхонь і фрикційних зв'язків.

Таким чином, розглядаючи основні положення структурно-енергетичної теорії тертя професора Б.І. Костецького можна зробити основний висновок, що загальна закономірність процесу тертя і зношування полягають у тому, що для всіх матеріалів, відомих в техніці, існує діапазон навантажень і швидкостей, в якому рівні значень тертя і зношування на кілька порядків нижче, аніж за межами цього діапазону. Цей діапазон може займати різне місце відносно осі навантаження або швидкостей залежно від співвідношення матеріалів і середовищ.

4.3.2. Самоорганізація при терті матеріалів

Фундаментальною фізичною основою загальної закономірності діапазону нормального тертя у відповідності зі структурно-енергетичною теорією тертя є відкрите професором Б.І. Костецьким у 1974 році універсальне явище структурної пристосованості матеріалів: утворення дисипативної структури, що має властивість мінімального виробництва ентропії.

При реалізації стану структурної пристосованості вся взаємодія твердих тіл тертя і середовища (механічні, хімічні, електричні тощо) локалізуються в тонкоплівковому об'єкті – вторинних структурах. Перебудова вихідної структури в нову фазу відбувається в напрямку максимального зміцнення, подрібнення, орієнтації в напрямку руху і насичення активними компонентами середовища. Вторинні структури екранують вихідний матеріал від механічної і фізико-механічної деструкції. Зовнішня механічна дія призводить до руйнування фази, яка екранує, але ця ж дія і процеси перенесення речовини із середовища забезпечують її регенерацію.

Основними ознаками явища структурної пристосованості матеріалів при терті, що відрізняють його від різного виду пошкоджуваності, є локалізація пластичної деформації та руйнування в тонких поверхневих шарах вторинних структур і відсутність будь-яких видів руйнування основного металу.

Вторинні структури являють собою тонкоплівковий об'єкт (товщина ВС- $h = 2 \cdot 10 \dots 8 \cdot 10$ нм), який утворюється шляхом кінетичного фазового переходу (КФП), основою якого є сумісна дія деформації, нагрівання, дифузії і хімічних реакцій. За хімічним складом вторинні структури являють собою широку гаму з'єднань металу з активними компонентами середовища від перенасичених твердих розчинів до хімічних з'єднань нестехіометричного складу. Вторинні структури володіють аномалією фізичних, хімічних, механічних властивостей і не мають лінійних, поверхневих і об'ємних дефектів кристалічної будови.

Основним фактором, що визначає неминучість і механізми КФП, енергетику активації і кінетику утворення та руйнування ВС, є робота сил тертя A_T .

Спрощене уявлення про силу тертя F , як про функцію нормального навантаження, виявилось неспроможним як в теоретичному, так і в експериментальному плані.

Встановлено, що сила тертя F є не функцією нормального навантаження, а оператором процесів A_T , які виникають при тому чи іншому поєднанні значень нормального навантаження, швидкості ковзання і вектора параметрів тертя:

$$F(P) = A_T(P, V, C) \quad (4.6)$$

Сили тертя інтегрально відображають дії всіх факторів складного процесу тертя.

Таке уявлення про сили і роботу тертя відкриває можливості системного аналізу процесів трансформації матеріалів у зоні тертя, побудови конкретних положень і залежностей оптимізації показників тертя і зношування.

Визначаючим результатом роботи сил тертя є контактна пружно-пластична деформація, яка протікає в екстремальних умовах силового навантаження при синергетичній (кооперативній) дії дифузії, хімічних реакцій і нагріванні.

Складнонапружений стан поверхневих ультрамікроскопічних плівок зумовлений їх блокуванням підповерхневими і бічними об'ємами.

Силова взаємодія на ділянках фактичного контакту має форму багатократних короточасних імпульсів. Розрахунки показують, що тиски на площадках фактичного контакту знаходяться в межах 100...1000 МПа, час контактування елементарних ділянок складає 0,000001...0,0001 с.

У відповідності з уявою механохімії пластична деформація призводить до утворення реакційно-активних ультрадисперсних структур.

На всіх етапах силового навантаження проходить взаємодія активованих тертям поверхневих шарів з активними компонентами середовища (адсорбція, дифузія, хімічні реакції).

В результаті синергетичної дії коефіцієнти дифузії при терті збільшуються на 5...10 порядків, хімічні реакції протікають фактично миттєво. Різко збільшується розчинність, виникають нестехіометричні хімічні сполуки.

Стає очевидним, що проблеми процесів структурної організації при терті відносяться до області "високих параметрів" стану речовини високих концентрацій енергії, великих швидкостей, високих тисків алотропних перетворень, аномальних агрегатних станів.

Виникають структурні і фазові стани, які відсутні в діаграмах рівноважних систем. Дослідження процесів вторинного структуроутворення, які виконані за допомогою електронної трансмісійної і растрової мікроскопії, рентгеноспектрального та ОЖЕспектрального аналізу, електронографії, рентгенографії і радіоактивних індикаторів, дозволили встановити, що традиційні механізми об'ємної пластичної деформації при терті металів в умовах СО трибосистем повністю виключаються. КФП призводить до нових механізмів пластичності, деформації та руйнування.

Професор Б.І. Костецький встановив існування двох типів вторинних структур і ряду їх проміжних станів.

Вторинні структури I типу являють собою пересичені аморфізовані тверді розчини кисню, сірки, фосфору та інших реагентів у металах, мають бездислокаційну фрагментовану будову, володіють при їх утворенні аномальною пластичністю (ступінь деформації досягає дві тисячі процентів), а при виході із контакту затвердівають. Товщина ВС I типу h_{BCI} знаходиться в межах $2 \cdot 10 \dots 4 \cdot 10$ нм, уміст реагента в межах 4...10% (для сплавів на основі заліза).

Дослідження вторинних структур (ВС) на просвітлення, суміщене з

електронно-графічним аналізом, свідчить про знищення границь зерен, блоків, дислокацій, дефектів пакування, граничного подрібнення, фрагментування і орієнтації за напрямком тертя (мінімальний розмір кристалічних областей складає 2...5 нм).

Вторинні структури II типу являють собою хімічні сполуки нестехіометричного складу, як правило, з дефіцитом за реагуючим елементом. При особливо напружених умовах тертя (при різанні металів) спостерігаються нестехіометричні з'єднання з надлишком реагента. В результаті блокуючої і зміцнюючої дій нестехіометричних з'єднань хімічної фази, вторинні структури II типу мають аномально високу твердість, при терті проходить переважно пружна деформація. Товщина h_{BCII} знаходиться в межах $4 \cdot 10 \dots 8 \cdot 10$ нм, вміст реагентів у межах 10...28% (для сплавів на основі заліза).

На поверхнях тертя формується оптимальний мікрорельєф, який самовідновлюється і відповідає станам поверхневих шарів і процесам формування ВС I і II типів.

Механізм руйнування вторинних структур, форма, розміри і склад частинок зношування відповідають виявленим механізмам вторинного структуроутворення, міцності, пластичності й характеру деформації ВС.

Суттєво, що КФП до режиму структурної організації й утворення вторинних структур не є довільним, а керується мінімальними принципами. Всі взаємодії при терті в режимі СО локалізуються в тонких поверхневих плівках. Відбувається масштабний стрибок.

Мінімальний принцип можна записати так:

$$\frac{\Delta E(V)}{A_{тер}} \cdot dV \rightarrow \min. \quad (4.7)$$

Інтеграл поглиненої енергії E , віднесений до роботи тертя $A_{тр}$ по об'єму V , що трансформується, прямує до мінімуму.

Наслідком цього принципу є умови:

$$V_{ef} \rightarrow \min; A_T/V_p \rightarrow \min; V_e/V_{ef} \rightarrow \max, \quad (4.8)$$

де V_{ef} – ефективний об'єм взаємодії; V_p – об'єм вторинних структур, що руйнується; V_e – об'єм матеріалу, що поглинув енергію E , близьку до граничної.

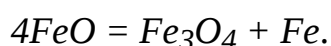
4.4. Забруднення поверхонь. Плівки на металічних поверхнях

Забруднення поверхонь тертя здійснює важливий вплив на коефіцієнт тертя. Основна частина забруднень поверхні складається з окисних шарів, які швидко утворюються на незахищених чистих металічних поверхнях.

Утворення окисних плівок на металічних поверхнях відбувається спонтанно, коли поверхня стикається з повітрям. Слідом за адсорбцією молекул кисню і водяної пари на поверхні чистого металу відбувається хімічна реакція. Кінетика росту плівки включає дифузію іонів металу через окисну плівку.

Практично всі метали окислюються. Металічні поверхні в процесі обробки дуже швидко покриваються первинною окисною плівкою. Внаслідок механічної обробки такі плівки виявляються і на благородних металах. Не дивлячись на малу товщину, плівка всього в кілька елементарних комірок кристалічної ґратки даної фази окислу за нормальної температури зупиняє подальше окислення.

Продуктами окислення можуть бути тверді розчини кисню в металі і їх хімічні з'єднання. В залізі при нормальній температурі розчиняється біля 0,05% кисню, а при 1000°C – 0,12% . Якщо окислення триває вище границі насичення, то з розчину випадають оксиди. Залізо з киснем утворює оксиди, що являють собою фази в системі O_2-Fe з різним типом кристалічної ґратки: в'юстит FeO , магнетит Fe_3O_4 і гематит Fe_2O_3 . В'юстит розчинний в залізі і стійкий при температурах вище 570°C, нижче цієї температури він розпадається на магнетит і чисте залізо.



Магнетит і гематит стійкі у діапазоні температур до точок плавлення. Плівка на залізі складається з шарів, розміщених від поверхні в середину в послідовності, що відповідає зменшенню кисню в оксиді. При температурі нижче 570°C плівка може складатись з одного шару Fe_3O_4 , зовнішнього шару Fe_2O_3 і наступного за ним шару Fe_3O_4 , або з шарів Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і FeO , причому розпад FeO іде слідом за його утворенням.

Швидкість утворення оксидної плівки на поверхні металу вимірюється долями секунди. Для виникнення шару товщиною 1,4 нм достатньо 0,05 с. Зі збільшенням товщини ріст плівки сповільнюється.

Зовнішній шар поверхні складається також із забруднень, що потрапили на поверхню при обробці, і адсорбованих газів і парів. Товщина цієї плівки 0,1...2,5 нм. Розміщений під нею шар, що виникає під впливом атмосферного кисню, має на залізі товщину до 5 нм, на сталі до 2 нм, на алюмінію до 15 нм. Товщина граничного змащувального шару близько 20 нм.

При конактуванні двох чистих металів утворюються сильні зв'язки металу з металом. Фактично атоми однієї поверхні (у випадку однакових металів) зближуються з атомами другої на відстань, яку можна порівняти з міжатомними відстанями всередині металу. На цьому етапі пограничні атоми однаковою мірою взаємодіють із сусідніми атомами й атомами другого тіла. Відповідно, сили на поверхні подібні за величиною міжатомним силам в середині об'єму тіл, які

спрягаються. На практиці існує певна невідповідність між кристалічними решітками, які стикаються, тому поверхня розділу зазвичай має недосконалості, які складають слабкі області. Ці області можуть змикатися внаслідок пластичного деформування або теплової дифузії, і в цьому випадку поверхня розподілу втрачає який-небудь фізичний зміст. Тоді адгезія відповідає міцності самого металу. Аналогічний механізм спостерігається і при стикуванні різнорідних металів, наприклад, індій і золото. Середня адгезія між різнорідними металами сильніша адгезії в середині об'єму слабшого металу (наприклад, індію), і, коли поверхні відриваються одна від одної, розділ проходить по слабкому металу, а не по початковій границі.

Відсутність сильної пограничної адгезії між металічними поверхнями можна пояснити двома причинами. Перша – наявність розлянутих вище забруднених поверхонь. Друга – відсутність пластичності контактуючих нерівностей, що призводить до їх механічного руйнування під дією дотичних напружень. Поверхневих плівок можна уникнути ретельною дегазацією у вакуумі, а втрату пластичності зміцнених з'єднань нерівностей можна компенсувати відповідним відпалом перед зняттям навантажень.

4.5. Особливості тертя в умовах вакууму

Створення нових космічних апаратів постійно потребує підвищення надійності та безвідмовності роботи вузлів тертя. Особливо це стосується пар тертя, що забезпечують роботу кулькових, роликів підшипників і підшипників ковзання, пристроїв для повороту антен і для відчинення чи зачинення ілюмінаторів, сонячних батарей, підвіски рухової установки космічних апаратів, штока газогенератора тощо. Нові проблеми з'явилися за створенням апаратів, що виконують посадку на інші планети і їхні супутники, переміщаються по них та ін. Неабияке значення має застосування вакууму в земних умовах (виплавка сталі, напилювання покриттів й інші технологічні процеси). У зв'язку з цим дослідження процесів тертя і зношування у вакуумі є актуальним і практика постійно вимагає розв'язання назрілих проблем.

Вище було показано, що поверхневі забруднення мають великий вплив на тертя металів. Встановлено, що тертя ковзання неможливе без наявності поверхневих плівок, оскільки інакше обидві поверхні миттєво зварювалися б одна з одною. Так як більшість поверхневих плівок складаються з окислів тієї чи іншої форми, то експерименти з тертям часто проводяться у вакуумі, щоб виключити забруднюючий вплив повітря і зберегти чистоту відкритих металічних поверхонь.

Порівняння коефіцієнтів тертя на повітрі і у вакуумі для різних комбінацій металів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Коефіцієнт тертя на повітрі і у вакуумі

Комбінація металів	Коефіцієнт тертя	
	На повітрі	У вакуумі (після усунення плівки)
Нікель-вольфрам	0,3	0,6
Нікель-нікель	0,6	4,6
Мідь-мідь	0,5	4,8
Золото-золото	0,6	4,5

Для повного усунення плівки застосовують нагрівання поверхонь в вакуумі порядку 0,0001 Па до різних високих температур залежно від матеріалів поверхонь.

Якщо замість повного видалення поверхневих плівок лише змінити їх товщину, то отримаємо цікавий результат: коефіцієнт тертя зменшується зі збільшенням товщини плівки (рис. 4.2).

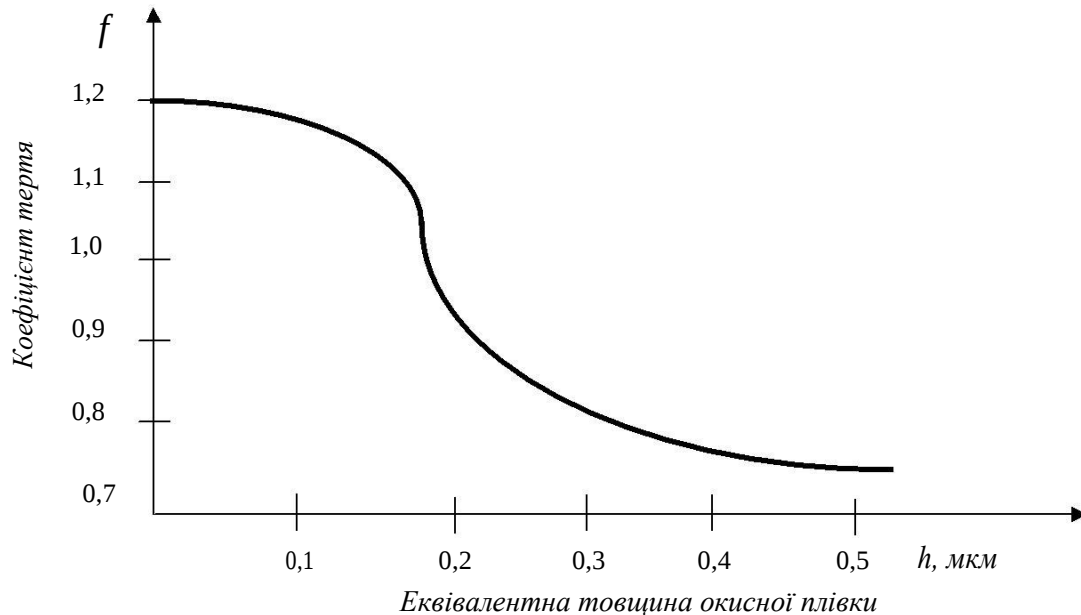


Рисунок 4.2. Співвідношення між коефіцієнтом тертя і товщиною тонких окисних плівок

Це пояснюється зменшенням сил молекулярного притягання між поверхнями. З іншого боку, окисні плівки мають більшу товщину, ніж представлені значеннями абсциси на рис. 5.2, мають явно виражену молекулярну структуру, яка може призвести до зниження або підвищення тертя зі збільшенням товщини плівки.

4.6. Перенос металу при терті

Перенос металу з однієї поверхні пари ковзання на другу можна розглядати як частину нормального зношування.

Однак згідно з теорією зварювання–зрізу–проорювання, перенос складає також невід’ємну частку механізму тертя між металами.

В роботах Крагельського І.В. перенос металу пояснюється відокремленням частин м’якшої пари металів у результаті втоми з наступним прилипанням між поверхнями.

Перенос металу з однієї поверхні на другу може відбуватися на атомному і молекулярному рівнях. Експериментальні дослідження показали, що при ковзанні бронзи по сталі в змазці, яка складається із суміші спирту і гліцерину, стальна поверхня збагачується атомами міді, що дифузує з бронзи.

Важливе значення має перенос металу при механічній обробці, коли виникає контакт між металічними поверхнями інструменту і деталі. Дрібні продукти зношування інструменту переносяться на оброблювану поверхню. Ці частинки не бажані не тільки як домішки, але й значною мірою як джерела значної корозії. Прикладами також є перенос металу з молотка, викруток, різців, свердел і т.д. Перенос металу виключається застосуванням ефективного мастила, максимально можливим зниженням ковзання між інструментом і деталлю й підвищенням твердості інструменту.

4.7. Твердість металів

Однією з важливих властивостей металів, що протидіє тертю, зношуванню, ерозії або пластичній деформації, є твердість. Відомо ряд методів випробувань на твердість, і найбільшого розповсюдження набули значення твердості за Брінелем, Роквелом, Віккерсом, Шором і Моосом. Як правило, в поверхню металу втискується твердий індентор при відомому навантаженні і вимірюється розмір отриманого відбитка.

Індентор Віккерса являє собою квадратну піраміду з алмазу, з кутом між протилежними гранями 136° . Значення твердості за Віккерсом H_v визначається як відношення навантаження до пірамідальної площі відбитка.

У промисловій практиці для визначення твердості використовують прилад Роквела, яким за допомогою індентора визначають глибину відбитка при стандартному навантаженні. В цьому випадку використовують конічний індентор з невеликим напівсферичним наконечником. Середній тиск p для конуса, який втискується в м’який матеріал, не залежить від навантаження. Окрім того,

$$P \cong \frac{1}{d^2}, \quad t = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{ctg} \theta \quad (4.9)$$

де t – глибина відбитка індентора,

d – діаметр відбитка,

θ – половина кута при вершині конуса.

Виключаючи d з цих відношень, отримаємо:

$$t \cong \frac{1}{\sqrt{P}} \quad (4.10)$$

Тобто глибина впровадження буде меншою для твердіших матеріалів. Щоб знайти твердість за Роквелом H_R , віднімемо глибину відбитка t з постійного базового значення C , тобто

$$H_R = C - t = C - \frac{1}{\sqrt{P}} \quad (4.11)$$

Замінюючи P значенням твердості за Віккерсом H_V , отримаємо співвідношення між H_R і H_V :

$$P_k = C - \frac{K}{\sqrt{H_V}} \quad (4.12)$$

де K – постійна.

При визначенні твердості методом, який запропонував Брінель, застосовують твердий сферичний індентор. Звичайно для цієї мети використовують стандартні кульки від підшипника, які дешеві і мають точні розміри. Якщо сферичний індентор втискується в поверхню зміцненого металу, то тиск упровадження приблизно в три рази більший текучості металу (як у випадку індентора Віккерса), тому твердості за Брінелем і Віккерсом практично тотожні.

За методом Мооса замість упровадження індентора використовують дряпання, коли один мінерал дряпає інший, якщо твердість першого на 20% вища твердості другого. Моос запропонував шкалу, яка включає 10 мінералів від тальку до алмазу, кожен з яких дряпає попередній, але не дряпає наступний. Твердість за методом дряпання M пов'язана з твердістю за методом упровадження H співвідношенням виду:

$$H = k \cdot 1,2^M. \quad (4.13)$$

Часто виявляється, що мікротвердість при малих навантаженнях має більш високі значення, ніж при великих навантаженнях. Це пояснюється тим, що поверхневі шари зразка є твердіші, ніж матеріал, який розміщений нижче. Таким чином, при малих навантаженнях фактично отримують результати, які близькі до істинної твердості поверхневого шару, в той час як при великих навантаженнях і глибшому впровадженню твердість близька до об'ємної твердості металу.