

Самостійна робота за темою 3

Тема: Характеристика поверхні твердих тіл (Самостійно опрацювати матеріал за темою 3 згідно плану)

- 3.1. Структурно-енергетична теорія тертя.
- 3.2. Активація та пасивація поверхонь тертя.
- 3.3. Параметри оцінки зношування машин.

3.1. Структурно-енергетична теорія тертя

Явища, що мають місце при терті і зношуванні, багато в чому визначаються властивостями матеріалів, з яких виготовлені деталі машин, а також станом їхніх поверхневих шарів. Розглядання цього питання має на меті засереджити увагу до вивчення процесів руйнування поверхонь тертям, які будуть викладені надалі, оскільки для їхнього розуміння необхідно володіти мінімальною сукупністю знань з термодинаміки, фізики твердого тіла і фізичного металознавства. Вважається, що при терті навантажені ділянки поверхонь одержують енергетичні впливи до $100 \text{ eV}/(\text{атом с})$, тобто на рівні руйнування атомних зв'язків. Однак у дійсності частка латентної (накопиченої) енергії, яка створює руйнування, знижується до 4...5 порядків. Це зниження руйнівної енергії, її розсіювання обумовлене дисипативними властивостями поверхневих структур. Виходячи з термінології фізичного металознавства у трібології їх прийнято називати дисипативними структурами. Сучасні підходи до розуміння явищ, що відбуваються під час тертя, пов'язують ці процеси із самоорганізацією дисипативних структур, досліджуваних синергетикою і термодинамікою нерівноважних процесів.

Структура і дефекти матеріалів трібосистем

Конструкційні матеріали, які застосовуються у трібосистемах, поділяються на кристалічні та аморфні. З фізичної точки зору твердими тілами вважаються тільки кристали. Їхні атоми розташовуються в вузлах регулярної просторової структури – кристалічних решітках, структурною одиницею яких є елементарний осередок. Приклади ряду структурних схем кристалів наведені на рис. 2.9.

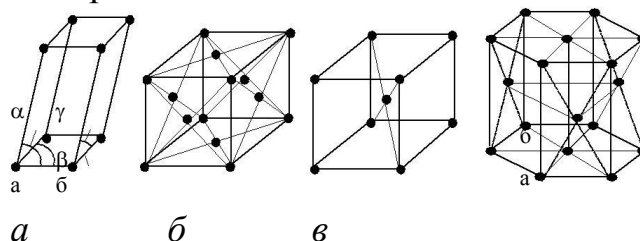


Рис. 3.1 Схеми елементарних осередків кристалів

У загальному випадку елементарний осередок має вигляд косокутного паралелепіпеда, (рис. 3.1, *a*) який характеризується значеннями сторін a , b , c . За співвідношенням сторін і кутів виділяють 7 кристалічних систем. Найбільш розповсюдженими є решітки кубічні (рис. 3.1, *б*, *в*) і гексагональні (рис. 3.1, *г*). Якщо в центрах граней куба розташовуються додаткові атоми, то

решітки називаються гранецентрованими (ГЦК), якщо атом впроваджується в центр куба – решітки об'ємноцентровані (ОЦК). Гексагональні щільно упаковані решітки мають осередок з основою у вигляді правильного шестикутника. Кубічні решітки типу ГЦК і ОЦК характерні для сталей. Між атомами в решітках можливий зв'язок 3-х типів: іонний, ковалентний, металевий. У першому випадку у вузлах знаходяться позитивні і негативні іони, у другому – нейтральні атоми, валентні електрони яких утворюють пари, що рухаються в полі сусідніх ядер. Зв'язок має квантово-механічну природу. Металевий зв'язок виникає між атомами металів. Валентні електрони в цьому випадку залишають свої атоми і здійснюють хаотичний тепловий рух у загальному полі атомних залишків, які знаходяться у вузлах решіток (вільні електрони).

Між молекулами діють сили Ван-дер-Ваальса, енергія яких приблизно на 2 порядки нижча, ніж в атомних зв'язках. Особливим видом молекулярної взаємодії є водневий зв'язок. Слабко екранований одним електроном ядро атома водню, який бере участь у ковалентному зв'язку, може притягатися до сильно електронегативних атомів (кисень, фтор) і утворювати з ними другий зв'язок. Водневий зв'язок міцніший за інші міжмолекулярні зв'язки. Він характерний для взаємодії молекул вуглеводнів, зокрема полімерів, з киснем окислів металів є найважливішою формою зв'язку між молекулами води в рідкому стані й у виді льоду. У табл. 3.1. подані величини енергії перерахованих видів зв'язків і зазначені характерні властивості кристалів.

Таблиця 3.1-Енергія зв'язку і деякі властивості кристалів

Тип зв'язку	Приклади кристалів	Енергія зв'язку, кДж/моль	Деякі властивості кристалів
Іонний	NaCl LiF MgO	~ 1000	Мала електропровідність при низьких і гарна іонна провідність при високих температурах. Високі міцність, твердість і температура плавлення, крихке руйнування
Ковалентний	C (алмаз), Si, Ge, TiN, WC, SiC	~ 700	Висока твердість, низька електропровідність при малих температурах, крихкість. Деякі матеріали є напівпровідниками
Металевий	Fe, Cu, Al, Ag, Na	~ 400	Висока електропровідність і пластичність
Молекулярний	Молекули в полімерах Ar, CH ₄	~ 10	Низька температура плавлення, сильна стискальність, пластичність, повзучість, в'язка пружність
Водневий	H ₂ O, HF	~ 50	Схильність до утворення розгалужених багатомолекулярних структур

Дефекти кристалів поділяють на нульвимірні (точкові), одновимірні і двовимірні. До точкових відносяться енергетичні, електронні і атомні. Найбільш поширені енергетичні дефекти – фонони-кванти хвиль розтягування-стискування і зрушення (звукові хвилі). Тепло в кристалі поширюється також у виді механічних хвиль зі звуковою швидкістю. У квантовій механіці поширення звукових хвиль, як і електромагнітних, розглядається як рух часток – фононів. Енергія фонона, як і фотона, за формулою Планка дорівнює $h\nu$. До електронних дефектів належать надлишкові електрони, дірки, екситони. Останні являють собою пари електрон-дірка, пов'язані кулонівськими силами.

Основні види атомних дефектів включають вакансії (рис. 3.2, *а*), атоми в міжвузлах (рис. 3.2, *б*), чужорідні атоми у вузлах. Відстані між атомами в різних напрямках решіток (рис. 3.2, *в*) різні (*AA*, *AB*, *AB*). Оскільки від міжатомної відстані залежать фізичні властивості кристалів: міцність, електропровідність, показник переломлення тощо, то ідеальні кристали є анізотропними середовищами (у різних напрямках різні властивості).

Анізотропія властивостей характерна для ідеальних кристалічних решіток – монокристалів. Монокристали вирощуються при строго контрольованій температурі і тиску з ретельно очищеного від домішок матеріалу. Їхня міцність близька до ідеальної. Якщо при відливанні виробу ці умови не дотримуються, то кристалізація починається одночасно на безліч центрів, якими є домішки атоми та інші дефекти. У результаті виникає безліч довільно орієнтованих монокристалів з розмірами порядку десятків мікрометрів. У той час, як кожен кристаліт має анізотропію, тверде тіло, яке складається з багатьох тисяч кристалів, у середньому однорідне, практично ізотропне і називається полікристалом. Звичайні конструкційні матеріали є полікристалами.

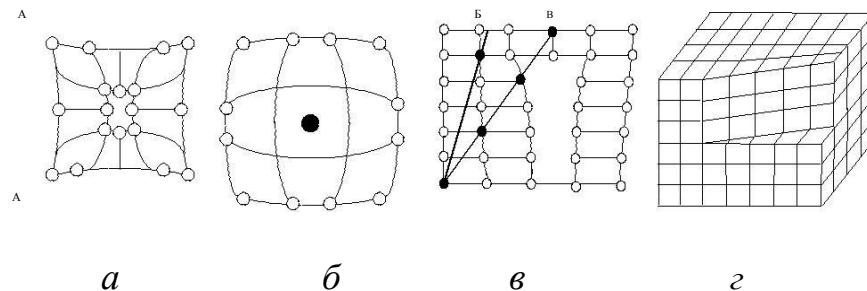


Рис. 3.2 Дефекти кристалічних решіток

Одновимірні дефекти – дислокації відіграють величезну роль у поведінці кристалів при деформації. Найпростіша лінійна дислокація являє собою відсутній ряд атомів. Більш складною є гвинтова дислокація, що виникає в результаті повороту однієї частини кристала щодо іншої. Пластична деформація кристалів здійснюється при зсувних напругах, у багато разів менших, ніж теоретичні, завдяки руху дислокацій, що починається при порівняно невеликій відносній деформації порядку $10^{-4} \dots 10^{-3}$. Коли дислокація проходить через весь кристал, одна частина останнього зміщується щодо іншої на величину міжатомної відстані. Зважаючи на те, що щільність дислокацій велика (складає на початку зрушення $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$), то

зрушення призводить до однорідного ковзання безлічі блоків кристала один відносно одного з виходом дислокацій і утворенням сходинок на границях тіла. Рухливість дислокацій, а отже швидкість пластичної деформації, росте по експоненті з ростом температури.

Показана залежність міцності матеріалу від щільності дефектів. Спочатку зростання кількості дефектів (дислокацій) призводить до падіння міцності. Після досягнення мінімуму міцність наростає. У цьому випадку виявляється взаємодія дислокацій одна з одною та іншими дефектами, яка призводить до гальмування руху дислокацій. Тому існують два способи зміцнення матеріалів: зниження кількості дефектів, тоді міцність наближається до теоретичної (ділянка 1 на кривій міцності), або збільшення щільності дефектів (ділянка 2). Обидва шляхи реалізовані в промисловості. У строго контрольованих умовах одержують високоміцні волокна (наприклад з бору), близькі за будовою до бездефектних монокристалів. На основі цих волокон виготовляють метало-композиційні матеріали з величезною міцністю на розрив. З таких легких і міцних матеріалів розпочато виготовлення кузовів гоночних автомобілів. Іншим прикладом одержання виробів з металів, що містять найменше дефектів, є технологія виготовлення лопаток турбін турбореактивних двигунів. На сучасному етапі лопатку вирощують як монокристал у спеціальних формах в строго контрольованих умовах.

Інший шлях полягає в насиченні кристала дефектами за рахунок загартування, легування або механічного наклепу. Легування приводить до появи в решітках сторонніх атомів. Загартування викликає здрібнювання зерен полікристала, причому границі зерен є двовимірними дефектами. На них розсіюються дислокації. Деформаційне зміцнення – наклеп приводить до утворення величезної кількості нових дислокацій, який перешкоджає їхньому взаємному переміщенню.

Аморфні речовини, на відміну від кристалічних, мають ближній порядок у розташуванні молекул, який стає хаотичним при віддаленні від цієї молекули на кілька діаметрів. У таких речовин відсутня точка плавлення. Вони ізотропні. Плин, як і в рідинах, відбувається при будь-якому навантаженні і різко інтенсифікується з підвищенням температури, тому вони не мають межі плинності. Напруги і деформації є функціями навантаження, часу і температури. До таких речовин відносяться багато полімерів. Макромолекули полімерів мають ланцюг із сотень і тисяч атомів вуглецю, до якого бічними зв'язками приєднані групи OH, COOH, NH₂, атоми водню, хлору, фтору. До складу молекул можуть входити бензольні кільця та інші сполуки атомів. Між макромолекулами діють сили Ван-дер-Ваальса. Як конструкційні матеріали використовуються термопластичні і термореактивні полімери. До термопластичних належать поліетилен, вініпласт, капрон, нейлон тощо. Вони розм'якшуються під дією температури. У них, поряд з аморфними, є і кристалічні зони. Прикладом цілком кристалічного полімеру є фторопласт – унікальний хімічно інертний теплостійкий матеріал з надзвичайно низьким коефіцієнтом тертя.

Термореактивні полімери мають просторову сітчасту структуру. Макромолекули з'єднуються поперечними ковалентними зв'язками. До них належать пластмаси на основі фенол-формальдегідних, епоксидних і інших смол. Такі пластики термостійкі, зберігають міцність до температури 300...400 °C.

Особливу групу складають еластомери, що мають здатність до великих, порядку сотень відсотків відносних пружних деформацій (гуми, поліуретани). Великі деформації пов'язані з особливою формою макромолекул, які скручені у клубки і розпрямляються при розтягуванні. За рахунок введення різних наповнювачів з полімерів вони створюють композиції, що мають комплексом фізико-механічних і хімічних властивостей.

3.2. Активація та пасивація поверхонь тертя. Параметри оцінки зношування машин

Контактна пружно-пластична деформація є основним фактором, що активує зумовлюючі процеси структурної пристосовуваності матеріалів при терті.

Відповідно до першого закону термодинаміки робота сил тертя A в основному перетворюється на теплоту Q і частково запасється трібосистемою E , тобто:

$$A = Q + E. \quad (3.1)$$

Виділення теплоти викликає термічну активацію процесів при терті. Процес запасу енергії обумовлений в основному утворенням активної ультра - дисперсної орієнтованої структури, що викликає структурну активацію

матеріалу в контактній зоні деформації. Структурна і термічна активація при терті відбуваються одночасно, і їхній поділ досить умовний. Однак, у визначених діапазонах умов тертя можна виділити переважний вплив структурної або термічної активації на механізми процесів при терті.

Кількісно рівень структурно-термічної активації при терті можна характеризувати величиною питомої роботи тертя A_y , що являє собою добуток коефіцієнта тертя μ і питомого навантаження p та швидкості ковзання V : $A_y = \mu p V$.

Для умов структурної пристосовуваності справедливі такі твердження:

$$A \neq Q ; \Delta E \neq 0 ; \Delta E / A = \min . \quad (3.2)$$

У загальному енергетичному балансі при нормальному терті E складає незначну величину (менше 1%). Однак, якщо врахувати, що ця енергія запасється в найтоншому поверхневому шарі (товщина порядку десятків і сотень нанометрів), то густина запасеної енергії в одиниці об'єму, що деформується, буде близька до граничних критичних значень енергії, яка може поглинути метал у твердій фазі при деформації або при нагріванні до температури, близьких до температури плавлення.

Висока густина запасеної енергії обумовлює аномальні ефекти підвищеної активності поверхневих субмікрооб'ємів. Логічно пов'язати ці ефекти з особливостями ультра дисперсної орієнтованої структури, оскільки енергія, що запасасться, складається насамперед з енергій точкових дефектів і мікроспотворень у дезорганізованих границях цієї структури.

Структурно-термічна активація при терті відіграє визначальну роль у протіканні процесів адсорбції, дифузії та хімічних реакцій. Процеси структурної активації визначаються кінетикою зародження і руху недосконалостей кристалічної будови в контактній зоні деформації. Ця кінетика, у свою чергу, пов'язана з енергетичним станом атомів, що залежать від термічної активації. Тому взаємного посилення фізико-хімічних процесів, що одночасно протікають, структурної і термічної активації можна чекати тільки безпосередньо при терті.

Поряд з утворенням шарів, насичених киснем та іншими хімічно активними елементами середовища, виявляється інтенсивна дифузія вуглецю, азоту та інших менш активних елементів.

Одночасно протікаючі структурна і термічна активації при терті не тільки прискорюють процес насичення, але і сприяють дифузії практично всіх елементів, що заповнюють зону тертя, незалежно від їхньої природи, атомних розмірів тощо. У результаті досліджень було розроблено ряд методів зміцнення поверхонь при терті (механохімічна цементация, азотування, насичення киснем тощо).

При відсутності можливостей насичення за рахунок елементів середовища структурно-термічна активація при терті призводить до взаємної дифузії контактуючих металів (схоплювання I і II роду). Головною передумовою утворення металевих зв'язків при схоплюванні є структурна активація металу, обумовлена щільністю вакансій і дислокованих атомів. Ці дефекти кристалічної будови виникають у результаті пластичної деформації і реалізації механізмів взаємодії різних видів недосконалостей.

Підвищення адсорбційної активності деформованої при механічній обробці металу було відзначене П.А. Ребіндером, який отримав ряд експериментальних доказів збільшення адсорбційного потенціалу. Структурно-термічна активація поверхневих шарів тіл, що труться, підвищує їхню реакційну здатність, тому що при цьому збільшується ентальпія і ентропія в поверхневих об'ємах, що приводить до зсуву констант рівноваги хімічних реакцій.

Вивченню хімічних реакцій, що активуються механічним впливом, присвячений новий розділ науки – механохімія. Активація пов'язується із сильним збільшенням енергії поверхні, високою концентрацією дефектів кристалічної будови і спотворенням решітки. Термодинамічна активність G визначається різницею вільних ентальпій активної G^* і стабільної G речовини:

$$G = G^* - G. \quad (3.3)$$

Особливістю механохімічних реакцій є те, що в них можливі перетворення з позитивною вільною ентальпією, які за законами термохімії не

повинні були б протікати мимовільно. Наприклад, можливі такі реакції:
 $4\text{Cu} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O} + \text{C}$ ($\Delta G = + 10,174$ кДж/моль при 25°C); $\text{SiC} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + \text{CH}_4$ ($\Delta G = + 58,615$ кДж/моль при 25°C);

Загальний хід механохімічної реакції показаний на рис. 3.3. Без механічного активування твердого тіла (зона I) ступінь реакції незначна, або реакція зовсім не протікає. При механічному впливі відбувається активація і реакція підсилюється (зона II). За цим індукційним періодом йде період стаціонарного плину реакцій, що відповідають умовам активування (зона III). Після механічного впливу активність твердої речовини, а разом з нею і швидкість реакції падають (зона IV). Реакція з високим рівнем активації характеризується різким підйомом ступеня реакції при механічному впливі і таким же крутим спадом, тобто відсутністю періодів індукції і загасання.

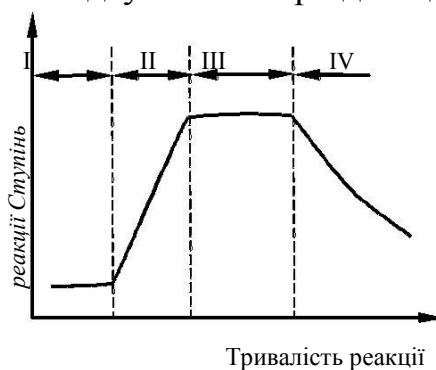


Рис. 3.3 Схема протікання механотермічної реакції

Таким чином, структурно-термічна активація обумовлює своєрідність протікання фізичних і хімічних реакцій і впливає на розвиток процесів при зовнішньому терті.

Активація приводить поверхневі шари матеріалу в аномально нерівноважний, хиткий стан. З погляду термодинаміки природним є прагнення такого матеріалу перейти в більш рівноважний стан. Тому за процесами активації при терті завжди йдуть процеси пасивації. Можна виділити три основних групи реакцій пасивації поверхонь твердих тіл при терті, що відбуваються в результаті: взаємодії з активними елементами середовища; взаємодії з матеріалом контртіла; внутрішньої перебудови структури поверхневих шарів.

Усі три види пасивації є конкуруючими процесами, кожен з яких реалізується при строго визначених умовах тертя.

У результаті взаємодії активованих поверхневих шарів металу з активними елементами середовища – пасиваторами (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом тощо) утворюються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти, що одержали назву вторинних структур. Утворення вторинних структур відбувається у визначеному діапазоні режимів тертя при наявності динамічної рівноваги процесів активації та пасивації і є необхідною умовою для реалізації явища структурної пристосовуваності матеріалів при терті. Якщо здатність середовища, що пасивує, недостатня для утворення і регенерації плівок вторинних структур, то реалізується другий тип пасивації. Наприклад, при терті металів контакт активованих ювенільних

поверхонь викликає процеси взаємної дифузії атомів сполучених металів, у результаті чого досягається метастабільний стан утворення локальних вузлів схоплювання. Їх подальше руйнування супроводжується інтенсивною глибинною пошкодженості поверхонь тертя.

Процес пасивації схоплюванням неприпустимий при нормальних умовах тертя. Якщо матеріал поверхні тертя має хімічну інертність і не здатний активно взаємодіяти з пасиваторами і матеріалом контртіла, то структурно-термічна активація ініціює внутрішню перебудову структури поверхневих шарів. Такий механізм пасивації можливий, наприклад, при терті полімерів у режимі структурної пристосовуваності, коли процеси адгезії мінімізовані і не можуть викликати пошкодження полімерного матеріалу.

У результаті досліджень кінетики механізмів утворення і властивостей трансформованих поверхневих плівок, проведених у широкому діапазоні змін умов тертя на різних матеріалах і в різних середовищах, було визначено існування двох основних типів вторинних структур і великої гами їхніх проміжних станів.

Загальними для вторинних структур обох основних типів є їхня поверхнева локалізація, високоміцна ультрадисперсна будова, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару і екранувати неприпустимі процеси схоплювання, втоми, корозії тощо. Але разом з тим, для кожного типу вторинних структур характерні свої індивідуальні особливості:

– поверхні тертя, покриті вторинними структурами I і II типів, різко відрізняються за зовнішніми ознаками (табл. 3.2); при дослідженні на макроскопічному рівні ці відмінності виявляються в різній здатності поверхонь відбивати світло, на мікроскопічному – у різному фарбуванні поверхонь, на субмікроскопічному – у різному субрел'єфі поверхонь;

Таблиця 3.2 - Зовнішні ознаки вторинних структур

Тип вторинних структур на поверхнях тертя	Загальна характеристика стану поверхонь тертя		
	На макроскопічному рівні	На мікроскопічному рівні	На субмікроскопічному рівні
I (тверді розчини окислювачів в металах)		Блискуча, покрита скловидною плівкою	Гомогенна
	Блискуча		(сплошна плівка без відчутних ознак субмікрорел'єфу)
II (хімічне з'єднання не стехіометричного складу)	Матова	Покрита плівками різноманітного забарвлення	Гетерогенна (вигладжені ділянки, покриті плівкою, і ділянки зруйнованою плівкою)

– вторинні структури I типу мають властивості надпластичності, легко переміщуються по поверхні тертя; структури II типу мають більшу поверхневу міцність, однак менш пластичні;

– поверхні, покриті вторинними структурами I типу, мають знижене, а покриті структурами II типу – підвищене змочування мастилами.

Структурне пристосовування матеріалів при терті. Залежність коефіцієнта тертя μ та інтенсивності поверхневого руйнування I від параметрів тертя (навантаження p , швидкості переміщення V , температури T і властивостей середовища C_p) є ділянкою мінімального тертя і руйнування для будь-яких контактуючих матеріалів. У залежності від властивостей матеріалів і середовища змінюються тільки діапазон і рівень мінімального тертя і зносу (рис. 3.4). Цей діапазон структурної пристосованості (СП) обумовлений виникненням стійкої дисипативної структури тертя, яка підтримується стаціонарними потоками механічної енергії і речовини зовнішнього середовища, взаємодіючою з поверхнями тертя, активованими механічними впливами.

При створенні умов СП відбувається масштабний стрибок: усі взаємодії локалізуються в тонкоплівковому об'єкті – вторинних структурах, що являють собою нову метастабільну фазу, утворену в результаті структурно-термічної активації поверхні, її адсорбційно-хімічної взаємодії із середовищем і пасивації. Ця нова фаза є істинним об'єктом руйнування, що екранує вихідну фазу (матеріал тертьових тіл) від механічних і фізико-хімічних впливів.

Перебудова структури відбувається в напрямку максимального зміцнення і орієнтації щодо напрямку переміщення (наприклад, для металевих матеріалів – це орієнтація ультрадисперсних кристалів). Вторинні структури екранують вихідний матеріал від механічної і фізико-хімічної

деструкції і є істинним об'єктом руйнування, весь об'єм якого поглинає енергію, близьку до граничної енергії руйнування.

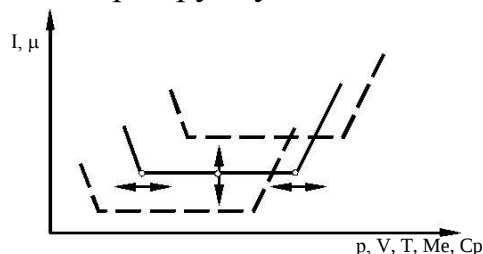


Рис. 3. 4. Схема зміни коефіцієнта тертя μ та інтенсивності зношування I від параметрів тертя p , V , температури T , властивостей матеріалів Me і середовища C_p

Зовнішні механічні впливи неминуче призводять до руйнування вторинних структур, але ці впливи поєднанні з процесами переносу речовини із середовища, забезпечують регенерацію фази, що екранує. Стійкість СП обумовлена динамічною рівновагою, а також саморегулюванням усіх деструктивних процесів, що активують та екранують (процесів пасивування і утворення фази). Таким чином, СП пов'язана з

утворенням стійкої дисипативної структури переносу енергії і речовини зовнішнього середовища в систему тертя.

В загальному випадку більша частина роботи зовнішнього тертя перетворюється в теплоту, а менша йде на зміну внутрішньої енергії поверхневих шарів металу.

Було встановлено, що від умов тертя залежить не тільки сумарна величина роботи тертя, але і співвідношення між основними її складовими, тобто між кількістю поглинаючої енергії і кількістю виділеного тепла. Співвідношення між складовими енергетичного балансу E і Q залежить від властивостей матеріалів трібосистеми, зовнішніх навантажень і фізико-хімічних характеристик робочих середовищ. Для заданого з'єднання контактуючих матеріалів і середовища існує певний діапазон навантажень і швидкостей ковзання, у якому відношення E/A практично незмінне і мінімальне в порівнянні з його значеннями поза розглянутим діапазоном. Схема зміни величини E/A показана на рис. 2.15. Тут ділянка I відповідає перехідній зоні малих значень p і V ; II – процесу нормального тертя і зносу; III – виникненню пошкоджуваності; IV – розвитку пошкоджуваності.

Як критерій зносостійкості матеріалів при терті A_z пропонувалося відношення роботи A , витраченої на видалення маси m :

$$A_z = \frac{A}{\Delta m} \quad (3.4)$$

Ця величина найбільш пов'язана з істиною (фізичною) твердістю матеріалу і повною мірою могла б характеризувати процес диспергування матеріалу при терті.

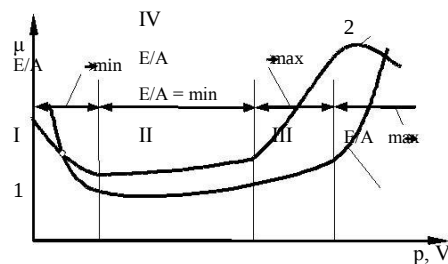


Рис. 3.5. Енергетичні співвідношення для різних зон тертя:

1 – при зміні питомого навантаження p ; 2 – при зміні швидкості руху

Описаний механізм явища СП показує, що при цьому явищі мінімальні принципи виявляються у формі мінімізації ефективного об'єму усіх видів взаємодії твердих тіл і середовища при терті (деформаційного, хімічного, електромагнітного тощо), який описується фізичною моделлю (рис. 3.5). Цей принцип може бути записаний у такому вигляді:

$$\int_V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min, \quad (3.5)$$

й ілюструється схемою зображеною на рис. 3.6, де напрямок z є нормаллю до поверхні тертя, лінією 1 показане збільшення внутрішньої

енергії при СП, локалізованої в зоні I вторинних структур, лінією 2 – обмежена зона збільшення внутрішньої енергії при інших процесах тертя (пошкоджуваності).

Наслідками принципу є умови:

$$V_{ef} \rightarrow \min; \frac{A}{V_p} \rightarrow \max; \frac{V_E}{V_{ef}} \rightarrow \max, \quad (3.6)$$

де V_{ef} – ефективний об'єм взаємодії; V_p – об'єм зруйнованого матеріалу, V_E – об'єм матеріалу, що поглинув енергію E , близьку до граничної.



Рис. 3.6. Фізична модель структурної пристосовуваності матеріалів при терті

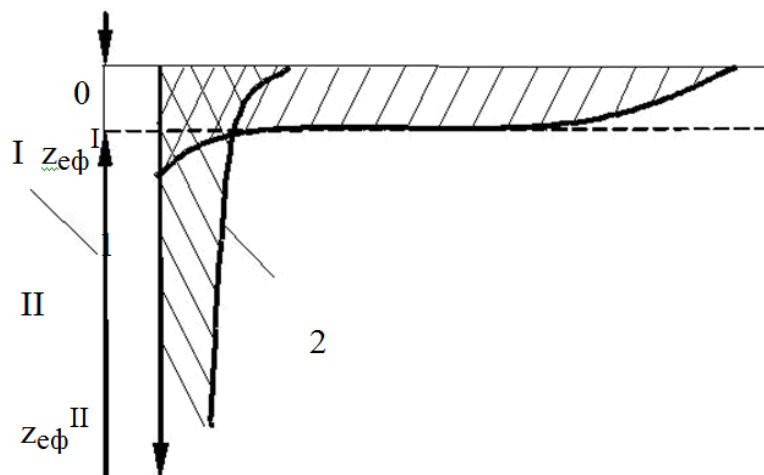


Рис. 3.7. Схема розподілу поглиненої енергії:
1 – структурна пристосовуваність; 2 – інші процеси тертя

Таким чином, при явищі СП відбувається масштабний і енергетичний стрибок, що полягає в локалізації ефективного об'єму взаємодій V , і досягненні в цьому об'ємі граничної енергонасиченості фази, що руйнується, яка реалізується шляхом переходу матеріалу до метастабільного стану, яке відповідає максимальній міцності.

Експериментально встановлено, що питома робота руйнування при СП на кілька порядків вища, ніж при інших процесах тертя.

Параметри оцінки зношування машин

Зношування – процес руйнування і відокремлення матеріалу від поверхні твердого тіла і (чи) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що виявляється у поступовому змінюванні розмірів, форми і (чи) маси тіла. Результатом зношування є знос тертьових тіл.

Знос – наслідок зношування, визначений в одиницях довжини, об'єму, маси. Знос деталей і вузлів призводить до погіршення функціональних показників машин і, як правило, регламентує її ресурс. В результаті зносу порушується кінематична точність механізмів, зменшується продуктивність, знижується міцність деталей, збільшуються витрати на ремонт машин, затрати енергії на виробництво кінцевої продукції, з'являються не передбачені розрахунками додаткові навантаження, вібрація, шум.

Про величину зносу можна судити за зменшенням розмірів тертьового тіла в напрямку, перпендикулярному до його поверхні тертя.

Кількісними характеристиками процесу зношування є швидкість і інтенсивність зношування.

Швидкість зношування – відношення величини зносу до інтервалу часу зношування. Визначається швидкість зношування як відношення товщини зношеного шару Δh , зміни об'єму ΔV або маси Δm твердого тіла до інтервалу часу Δt , протягом якого це тіло піддавалося зношуванню. Розрізняють лінійну i_h , об'ємну i_V і масову i_m швидкості зношування:

$$i_h = \frac{\Delta h}{\Delta t}, i_V = \frac{\Delta V}{V \Delta t}, i_m = \frac{\Delta m}{m \Delta t}. \quad (3.7)$$

Більш розповсюдженими є характеристики процесу зношування, що враховують шлях тертя L , що, при постійній силі тертя і швидкості ковзання V дорівнює добутку V на час стирання Δt . Розрізняють лінійну I_h , масову I_m , об'ємну I_V і енергетичну I_w інтенсивності зношування.

Лінійна інтенсивність зношування являє собою товщину зношеного шару Δh , що приходить на одиницю шляху тертя:

$$I_h = \Delta h / L. \quad (3.8)$$

Ця величина може бути визначена за зміною об'єму ΔV або маси Δm зношеного шару:

$$I_h = \Delta V / (A_a L), I_h = \Delta m / (\rho A_a L), \quad (3.9)$$

де ρ – щільність матеріалу що стирається;

A_a – площа поверхні тертя елемента, що стирається (номінальна площа контакту, якщо поверхні тертя тіл, які спряженні, однакові).

Очевидно, що I_h , є безрозмірною величиною. У більшості випадків

інтенсивність зношування реальних тіл визначається як: $I_h = 10^{-3} \dots 10^{-13}$.

Масова інтенсивність зношування – це маса речовини, що віддаляється з поверхні тіла, яке зношується, за одиницю шляху тертя:

$$I_m = \Delta m / L. \quad (3.10)$$

Об'ємна інтенсивність зношування – це об'єм матеріалу, зношеного за одиницю шляху тертя:

$$I_V = \Delta V / L. \quad (3.11)$$

Енергетична інтенсивність зношування визначає об'єм зношеного матеріалу, що приходить на одиницю роботи сили тертя:

$$I_w = \Delta V / (FL), \quad (3.12)$$

де F – сила тертя.

Ця характеристика застосовується в основному при вивченні роботи гальмових пристроїв і муфт зчеплення.

Зносостійкість тертьових тіл визначають величиною, зворотною інтенсивності зношування чи швидкості зношування. Вона характеризує опір матеріалу зношуванню при заданих режимах тертя. Зносостійкість ε_n різних реальних трібосистем може набувати значення, що належать широкому інтервалу: від 10^3 до 10^{13} . Розрізняють десять класів зносостійкості (від 3-го до 12-го), кожний з яких відрізняється величиною ε_u від наступних у 10 разів. Номер класу відповідає мінімальному показнику ступеня при ε_u . При вивченні опору матеріалів абразивному зношуванню найчастіше в лабораторних випробуваннях використовують поняття відносна зносостійкість ε_0 ,

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta h_0}{\Delta h}, \quad (3.13)$$

де Δh_0 – товщина зношеного шару еталона;

Δh - товщина зношеного шару матеріалу, що досліджується. Величини Δh_0 і Δh визначаються при однакових режимах навантаження.