

## **Тема: СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНА ТЕОРІЯ ТЕРТЯ**

**МЕТА РОБОТИ:** вивчити основні положення структурно-енергетичної теорії тертя та на прикладах різних конструкцій трибосистем закріпити учбовий матеріал.

### **1.Вказівки з підготовки до роботи**

#### **1.1 Питання для обговорення**

1. Фізичні властивості поверхневих шарів. Активація поверхонь тертя. Чинники, які впливають на активацію поверхонь тертя. Шляхи керування процесом активації під час проектування.

2. Пасивація поверхонь тертя. Чинники, які впливають на процес пасивації. Шляхи керування процесом пасивації під час експлуатації.

3. Структурне пристосування матеріалів при терті.

#### **1.2 Порядок проведення лабораторної роботи**

По кожному питанню 1, 2 та 3, на консультації, перед проведенням лабораторної роботи, назначаються доповідачі, які за рекомендованою літературою готують доклади.

Під час докладу доповідач висловлює свою думку щодо тих чи інших конструкцій трибосистем, наводить приклади з практики як вітчизняної, так і закордонної техніки.

Кожний доклад обговорюється студентами, уточнюються явища, процеси, особливості конструкції (проблемні питання).

Обговорення проходить за сценарієм «круглого столу». Оцінювання студентів проводиться по участі в обговоренні питань.

#### **1.3 Рекомендована література**

1. Основи трибології / Підручник. За редакцією В.А.Войтова. – Харків: ЧП Черв'як, 2008. – 351с.

2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424с.

3. Основы трибологии/ Под ред. А.В.Чичинадзе. – М.: 1995. – 779с.

4. Надежность и долговечность машины / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский и др. – Киев: Техника, 1975. – 408 с.

5. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – Киев: Техника, 1976. – 296 с.

## 2. Вказівки до виконання роботи

### 2.1. Теоретичні відомості

#### 2.1.1 Фізичні властивості поверхневих шарів

Атоми, що знаходяться усередині тіла, взаємодіють при найбільш щільному розташуванні з 12 сусідніми (рис. 1). Результируюча усіх сил взаємодії наближається до нуля. Частка, котра знаходиться на поверхні, взаємодіє з 6 сусідніми. Рівнодіюча сил притягання з боку сусідів  $F$  спрямована усередину тіла. Інакше кажучи,  $F$  діє на граничну молекулу. Оскільки енергія сил притягання негативна, то поверхнева частка має енергію, надлишкову в порівнянні з тією, що знаходиться усередині (поверхнева енергія). Надлишкова енергія характеризує здатність до міжмолекулярного притягання поверхонь, що називають адгезією. Адгезія виявляється в прилипанні. Притягання між шарами атомів усередині тіла називають когезією.

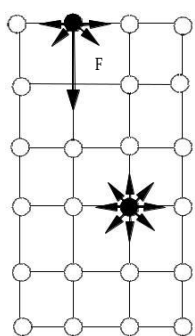


Рис. 1

Атоми в об'ємі  
і на границі

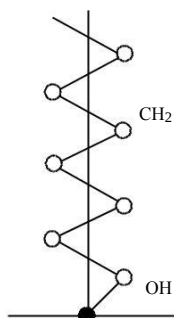


Рис. 2

Молекула  
ПАР

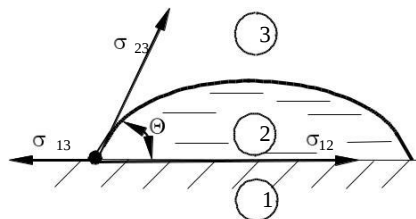


Рис. 3 Сили натягу

Наявність не скомпенсованих зв'язків у граничних шарах приводить до осідання на поверхні молекул речовин з навколишнього середовища, що знижує запас поверхневої енергії. Процес притягування поверхнею молекул називається адсорбцією. У результаті зменшення запасу поверхневої енергії виділяється теплота адсорбції. Процес, зворотний адсорбції, називається десорбцією. Розрізняють адсорбцію фізичну і хімічну. Фізична адсорбція пов'язана з притяганням сторонніх молекул за рахунок сил Ван-дер-Ваальса. Хемосорбція викликана дією валентних зв'язків. Поверхня в різних точках має різну поверхневу енергію. Мікродфекти володіють підвищеною адсорбційною активністю. За рахунок фізичної адсорбції на поверхні молекули газів і води осідають, у першу чергу на активних ділянках – центрах адсорбції. Сорбовані молекули вступають у хімічну реакцію з матеріалом. Так відбувається окислення поверхонь, які викликає корозію. Сорбована волога і температура стимулюють процес окислювання. Збільшення окисної плівки спочатку відбувається швидко, потім сповільнюється. Плівки розрізняють за товщиною: тонкі (товщина до 40 нм),

середні (до 500 нм), товсті – видимі (товщиною більш 500 нм). Окисли бувають м'якими і пухкими, наприклад, у міді, заліза і його сплавів (іржа). Тверді і суцільні плівки утворюються на алюмінії, кольорових металах. Властивості окисних плівок звичайно істотно відрізняються від властивостей матеріалу основи. Найбільш важливими є коефіцієнт теплового розширення, крихкість, співвідношення адгезійної і когезійної міцності. Через різні властивості плівки можуть розтріскуватися і відшаровуватися, що істотно впливає на зношування при терті.

Особливе значення має фізична адсорбція молекул поверхнево-активних речовин (ПАР). До них відносяться, зокрема, органічні речовини, молекули яких мають полярні групи (ОН, СООН, NH<sub>2</sub>) і неполярні – CH<sub>2</sub> (рис. 2). Молекули ПАР активними групами сорбуються на активних центрах поверхні, утворюючи молекулярний ворс, що розділяє пари контактуючих поверхонь та істотно знижує тертя.

ПАР, адсорбовані на поверхні твердого тіла, здатні змінювати характер взаємодії з рідиною (змочування). У залежності від того, як орієнтуються молекули ПАР щодо твердої поверхні, остання може добре змочуватися (гідрофільна) або погано (гідрофобна поверхня). Так, якщо молекулярний ворс спрямований полярними групами до поверхні, а протилежні кінці є неполярними, то змочування гарне, якщо орієнтація молекул протилежна – змочування погане. Оцінюється гідрофільність проводиться за величиною кута змочування (Рис. 3). При змочуванні  $0 < \theta < \pi/2$ , при незмочуванні  $\pi/2 < \theta \leq \pi$ .

Оскільки системи прагне скоротити запас енергії, то тіло намагається зменшити площу поверхні. Крапля рідини набуває сферичної форми, оскільки сфера має найменше відношення площі поверхні до об'єму. Тому поверхня знаходиться в розтягнутому стані, і якщо з неї виділити елемент, то дію частини, що залишається, на елемент можна замінити рівнорозподіленими по контуру силами натягу.

Мірою надлишкової поверхневої енергії є коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$ , що дорівнює надлишковій енергії в розрахунку на одиницю площі поверхні або силі натягу, що діє на одиницю довжини контуру елемента поверхні. На рис. 3. показані сили натягу на границях розподілу фаз: – тверде тіло  $\sigma_{12}$  – рідина;  $\sigma_{23}$  – рідина-газ;  $\sigma_{13}$  – тверде тіло-газ. Оскільки система знаходиться в рівновазі, сума сил дорівнює нулю, а  $\cos\theta = (\sigma_{12} - \sigma_{13}) / \sigma_{23}$ . За рахунок сил натягу, рідина в капілярах утворює меніски (рис. 4), під якими виникає тиск, що розраховується за формулою Лапласа і спрямований до центру кривизни:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (1)$$

де  $r$  – радіус капіляра

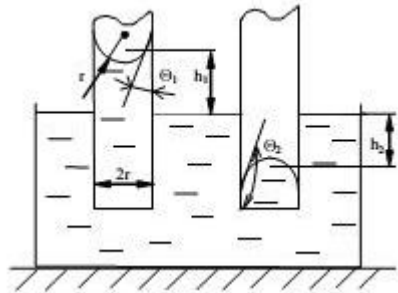


Рис. 4 Капілярний ефект

Під дією цього тиску спостерігається капілярний ефект, що полягає в підніманні або опусканні рівня рідини в капілярі на висоту:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r\rho g} \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина рідини;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Капілярний ефект має велике значення для пористих тіл. Він використовується для подачі мастила в зону тертя в підшипниках з пористими втулками.

Адсорбовані молекули ПАР, знижуючи поверхневий натяг, зменшують опір пластичної деформації поверхневого шару, пластифікують його. Це явище називають ефектом П.А. Ребіндера. Матеріал легше обробляється, тому до складу мастильно-охолоджувальних рідин, застосовуваних при механічній обробці металів, додають ПАР. Іншим проявом ефекту Ребіндера є проникнення молекул ПАР в систему мікротріщин і місця скупчення дислокацій.

Найбільш важливими для трибології фізико-механічними показники поверхневих шарів є мікротвердість  $H_\mu$ , модуль Юнга і зсув  $E$ ,  $G$ , межа зсувної міцності  $\tau_s$ . Ці показники визначають процеси тертя і зношування. Мікротвердість визначається найчастіше методом вдавнення в досліджувану поверхню алмазної піраміди з кутом між гранями  $136^\circ$  з навантаженням  $N$ . Під мікроскопом вимірюють діагональ відбитка  $d$ . Величина мікротвердості розраховується за формулою:

$$H_\mu = 1,854 \frac{N}{d^2} \quad (3)$$

Метод стандартизований. Величина мікротвердості пов'язана з границею текучості при розтягуванні  $\sigma_s$  і межею зсувної міцності:

$$H_\mu \cong 3\sigma_s \cong 6\tau_s. \quad (4)$$

Для оцінювання фізичних властивостей поверхневих шарів застосовуються методи оптичної, електронної, іонної мікроскопії, рентгенівського спектрального мікроаналізу, дифракції повільних електронів і рентгенівських променів з малими кутами ковзання, екзотелектронної емісії тощо.

**Вплив пластичного деформування на службові властивості поверхневого шару трібосистем.** Механічна обробка конструкційних матеріалів у ході виготовлення деталей вносить істотні зміни в будову і властивості поверхневих шарів. Одна з причин – пружна і пластична деформація. При механічному впливі інтенсивно утворюються і переміщуються дислокації, виникають нові структури, пов'язані зі здрібнюванням і орієнтацією зерен у напрямку дії сил. Деформування (витягування) зерен та їхня орієнтація відбуваються не тільки при механічній обробці поверхонь, але і при терті. Подібні зміни структури в поверхневих шарах називають текстуруванням. Наявність орієнтації текстурованих зерен, що відбувається в напрямку руху обробного інструменту або тертя, змінює міцність, твердість матеріалу, магнітні, електричні та інші властивості (рис. 5). Текстуровані шари мають високий ступінь анізотропії.

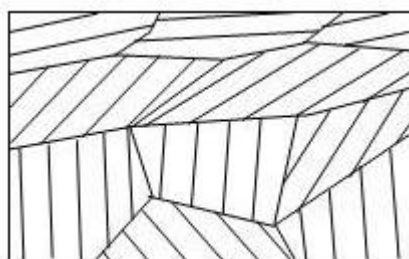


Рис. 5 Текстуровання

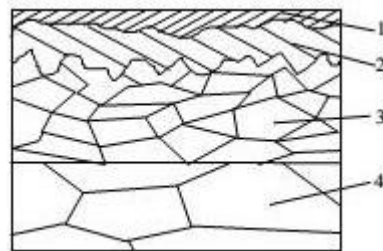


Рис. 6 Будова граничного шару

При текстуруванні, що відбувається при обробці або терті, в самому поверхневому шарі і в підшарі виникають залишкові напруги розтягування-стискування, різні дефекти у вигляді мікротріщин і пор. Пластичне деформування супроводжується тепловиділенням. Збільшення локальних температур прискорює окисні процеси, чому сприяє середовище (охолоджуванні емульсії, змащення). У поверхневому шарі при терті можуть відбуватися фазові перетворення.

Зміну міцності при деформації поверхневого шару називають деформаційним зміцненням або наклепом. На рис. 6 показана схема граничного шару після механічної обробки. Верхня частина 1 являє собою шар адсорбованих молекул рідин і газів, включаючи ПАР. Наступний шар 2 складається з оксидів. Його товщина звичайно порядку 10 нм. Сюди ж входять пилові включення, продукти зносу інструмента. Шар 3 складається з кристалітів, які зазнали змін під дією пластичної деформації і температури. Саме він і визначає експлуатаційні властивості (зносоустійкість) деталі. Далі йде основа 4, не порушена обробкою. Чим глибше поширюється пластична деформація, наприклад, при обробці різанням, під час розкочування, калібрування, тим товстіший шар 3. З оздоблювальних операцій найбільшої товщини цей шар досягає при обробці лезом. У таблиці 1 наведені дані про властивості шару 3.

На рис. 7 зображений типовий розподіл мікротвердості після механічної обробки. Найбільша твердість спостерігається не на поверхні, а на глибині порядку 10...20 мкм. На сталевих поверхнях верхній шар під впливом тертя або багаторазової пластичної передеформації може розміцнитися. У ньому відбувається тонке здрібнювання кристалів і структура наближається до

Таблиця 1 - Властивості деформованого шару

| Вид обробки       | $H_{\text{цпов}}/H_{\text{ц}} \text{ об'ємн.}$ | Товщина шару $h$ , мкм |
|-------------------|------------------------------------------------|------------------------|
| Гостріння         | 1,2...2                                        | 30...200               |
| Фрезерування      | 1,4...2                                        | 40...200               |
| Чистове гостріння | 1,5...2                                        | 20...75                |
| Шліфування        | 1,5...2,5                                      | 30...60                |
| Притирання        | 1,1...1,2                                      | 3...7                  |

аморфної. Такий шар, товщина якого звичайно складає порядку 5 мкм, називається шаром Бейльбі.

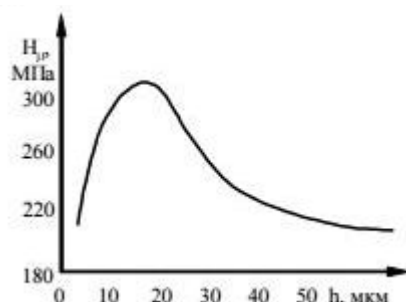


Рис. 7 Розподілення мікротвердості по глибині

Кількісно ступінь анізотропії поверхневих шарів може бути оцінений застосуванням статистичних методів шляхом Фур'є-аналізу поверхонь знятих на растровому електронному мікроскопі при різних збільшеннях.

Дамо короткий аналіз цього виду досліджень.

Напрямок упорядкованості структури завжди можна охарактеризувати функціями зсуву, повороту і порушення періодичності, тобто відповідно функціями  $f(x, y, z)$ ,  $f(\alpha, \beta, \gamma)$ , і  $P(x, y, z)$ . Усі ці характеристики, що відбивають ступінь організації структури, виявляються в спектрі і можуть бути зареєстровані і якісно оцінені скануванням вузького електронного променя по аналізованій поверхні. Фур'є-аналіз отриманого спектра здійснюється за допомогою спеціалізованої програми, адаптованої до більшості сучасних комп'ютерів. У цій програмі аналізується двовимірний Фур'є-спектр. Різні ділянки структури по різному відбивають скандувальний промінь, що обумовлює зміну (відбитого) сигналу, який реєструється.

Використання Фур'є-аналізу при металофізичних дослідженнях дозволяє оцінити вклад текстуровання поверхневих шарів на зносостійкість триботехнічних матеріалів.

Відповідно до термодинаміки поверхневий шар можна розглядати як відкриту термодинамічну систему, здатну обмінюватися енергією і речовиною з навколишнім середовищем і яка характеризується комплексом інтенсивних характеристик. Наявність сорбційних процесів на поверхні матеріалів робить їх схожими на мембрани, але, на відміну від звичайних мембранних систем, поверхневий шар має ще й об'ємні характеристики і, отже, комплексом власних інтенсивних характеристик. У рамках термодинамічного підходу з'явилася можливість користуватися загальними

поняттями і використовувати параметри стану, придатні для опису будь-яких макроскопічних систем, а також у зручній формі, через зміну термодинамічних потенціалів, враховувати адсорбційні та інші ефекти. Для опису зношування було зроблено спроби вивести рівняння стану поверхневого шару у вигляді загальних рівнянь балансу енергії або балансу ентропії. Це призвело до створення енергетичних моделей, що зображують функціональну залежність швидкості зношування від термодинамічних факторів:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (5)$$

де  $J$  – швидкість зношування;

$U$  – внутрішня енергія;

$S$  – ентропія;

$t$  – час.

В основу термодинамічного підходу лягли такі ідеї:

– у поверхневому шарі матеріалу, що зношується, можна виділити об'єм, який знаходиться в стані локальної рівноваги;

– процеси тертя і зношування можуть бути описані рівняннями енергетичного балансу;

– швидкість деструкції контролюється швидкістю виробництва ентропії.

Рівняння балансу ентропії для локальної зони (локальна термодинамічна рівновага) має вигляд:

$$\rho \frac{dS}{dt} + \text{div} S = \sigma, \quad (6)$$

де  $\rho \frac{dS}{dt}$  – швидкість приросту ентропії в цій зоні;

$\text{div}$  – швидкість відтоку ентропії з певної зони в навколишнє середовище;

$\sigma[S]$  – швидкість виникнення або виробництва ентропії усередині цієї зони.

Однак у подібних моделях, не врахований той факт, що в процесі деформації активуються дисипативні процеси самоорганізації, у результаті яких перед руйнуванням у деформованому матеріалі, замість очікуваного хаосу і деградації спостерігаються високо впорядковані структури, тобто із системи безупинно "відкачується" ентропія, утворена в ході нагромадження дефектів. Крім того, відомо, що на стадії вичерпання пластичності перевага надається колективним процесам, які охоплюють масштаб більший, ніж розміри локальних зон усередині дислокаційних осередків, врахування яких у виразі не передбачене.

В основі механізмів нагромадження ушкоджень і утомного руйнування поверхневого шару лежать термоактивні кінетичні процеси.

Залежність між швидкістю деструкції матеріалу  $J$  і зовнішніми факторами встановлюється через його активаційні параметри: енергію активації  $U_0$  і структурно-чутливий коефіцієнт :

$$J = f(U_0, \dots, T, \dots). \quad (7)$$

## 2.1.2 Активація та пасивація поверхонь тертя

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 запасається трібосистемою  $E$ , тобто:

$$A = Q + E.$$

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  $\mu$  і питомого навантаження  $p$  та швидкості ковзання  $V$ :  $A_y = \mu p V$ .

Для умов структурної пристосованості справедливі такі твердження:

$$A \neq Q; \Delta E \neq 0; \Delta E/A = \min.$$

У загальному енергетичному балансі при нормальному терті  $E$  складає незначну величину (менше 1%). Однак, якщо врахувати, що ця енергія запасається 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 температур, 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 запасається, 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).

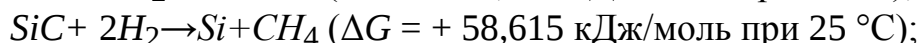
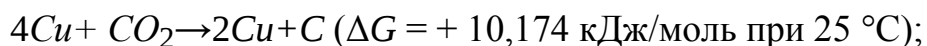
При відсутності можливостей насичення за рахунок елементів середовища структурно-термічна активація при терті призводить до взаємної дифузії контактуючих металів (схоплювання I і II роду). Головною передумовою утворення металевих зв'язків при схоплюванні є структурна активація металу, обумовлена щільністю 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:

$$G = G^* - G. \quad (8)$$

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:



Загальний хід механохімічної реакції показаний на рис. 8. 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. 8 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 пошкоджуваністю 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. 2.3); 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 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                                      | Блискуча, покрита скловидною плівкою        | Гомогенна (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 з 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  $\mu$  та інтенсивності поверхневого руйнування  $I$  від параметрів тертя (навантаження  $p$ , швидкості переміщення  $V$ , температури  $T$  и 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. 8). Цей діапазон структурної пристосовуваності (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.

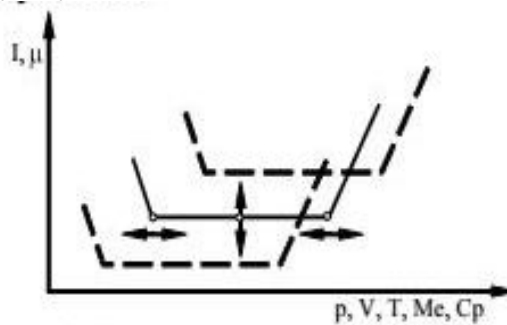


Рис. 8 Схема зміни коефіцієнта тертя  $\mu$  та інтенсивності зношування  $I$  від параметрів тертя  $p$ ,  $V$ , температури  $T$ , властивостей матеріалів  $Me$  і середовища  $Cp$

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. 2.22. 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  $A_3$  пропонувалося відношення роботи  $A$ , витраченої на видалення маси  $m$ :

$$A_3 = \frac{A}{\Delta m} \quad (9)$$

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

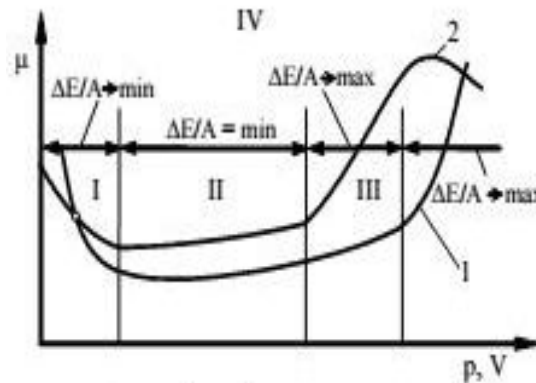


Рис. 9 Енергетичні співвідношення для різних зон тертя:  
1 – при зміні питомого навантаження  $p$ ; 2 – при зміні швидкості руху

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. 10). Цей принцип може бути записаний у такому вигляді:

$$V_{ef} \rightarrow \min; \frac{A}{V_p} \rightarrow \max; \frac{V \bar{E}}{V_{ef}} \rightarrow \max,$$

де  $V_{ef}$  – ефективний об'єм взаємодії;

$V_p$  – об'єм зруйнованого матеріалу,

$V\bar{E}$  – об'єм матеріалу, що поглинув енергію  $E$ , близьку до граничної.

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

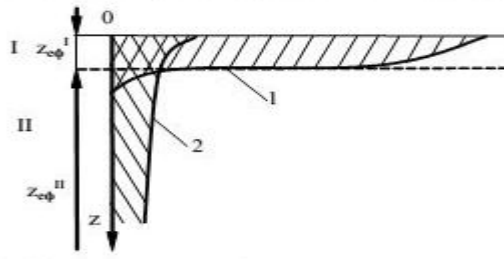


Рис. 2.24 Схема розподілу поглиненої енергії:  
1 – структурна пристосовуваність; 2 – інші процеси тертя

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.

### 3. Питання для самоконтролю

1. Активация поверхонь тертя спричиняє:
  - 1.1. Утворення мастильного шару
  - 1.2. Збільшення шорсткості
  - 1.3. Зменшення шорсткості
  - 1.4. Збільшення площі тертя
  - 1.5. Спричиняє процеси акумулювання енергії в поверхневих шарах
2. Пасивация поверхонь тертя супроводжується:
  - 2.1. Зменшенням температури поверхонь
  - 2.2. Зменшенням температури поверхонь тертя
  - 2.3. Утворенням мастильного шару
  - 2.4. Утворенням окисних плівок
  - 2.5. Утворенням шарів насичених воднем