

Тема: МОЛЕКУЛЯРНО-МЕХАНІЧНА ТЕОРІЯ ТЕРТЯ

МЕТА РОБОТИ: вивчити основні положення молекулярно-механічної теорії тертя та на прикладах різних конструкцій трибосистем закріпити учбовий матеріал.

1.Вказівки з підготовки до роботи

1.1 Питання для обговорення

1. Механічна складова сили тертя, шляхи зниження механічної складової, приклади реальних конструкцій трибосистем.
2. Молекулярна складова сили тертя, шляхи зниження молекулярної складової, приклади реальних конструкцій трибосистем.

1.2 Порядок проведення лабораторної роботи

По кожному питанню 1 та 2, 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.

2.Вказівки до виконання роботи

2.1.Теоретичні відомості

Молекулярно–механічна теорія тертя розроблена І.В. Крагельським.

Відповідно до цієї теорії, тертя має двоїсту природу: молекулярну і механічну, тобто тертя обумовлене подоланням сил молекулярної взаємодії, на плямах фактичного контакту і опором деформованого матеріалу переміщенню j . Отже, сила тертя F повинна складатися з молекулярної F_a і механічної F_d складових.

Сили молекулярної взаємодії на плямі контакту викликають утворення фрикційних зв'язків. Для відносного переміщення контактуючих тіл необхідно подолати сили молекулярної взаємодії і розрив молекулярних зв'язків. В міру переміщення нерівності розривів одних (старих) зв'язків утворюються інші. Отже, тертя являє собою безперервний процес руйнування і поновлення молекулярних зв'язків на фактичних плямах контакту A_r . Очевидно, що чим більше кількість плям контакту і їхні розміри, тим вищим повинно бути зусилля, необхідне для відносного переміщення контактуючих тіл. Отже, сила тертя $F_a \sim A_r$.

Друга складова сили тертя (деформаційна) обумовлена опором деформування матеріалу, що прилягає до впроваджених нерівностей рухомого трибоелемента. Проникнувши в поверхневий шар одного тіла жорстка мікронерівність іншого тіла, при збільшенні дотичного навантаження, буде деформувати цей шар. Перед нерівністю утворюється хвиля (валик) деформованого матеріалу, а по краях матеріал відтискується в сторони. Під нерівністю матеріал підминається, утворюючи канавки, глибина яких складає частки мікрметра. Сила опору переміщенню контртіла, обумовлена деформуванням матеріалу поверхневого шару мікронерівностями, являє собою механічну складову сили тертя F_d , яка залежить від N , $F_d \sim N$.

Основні закономірності контактної взаємодії згідно з молекулярно-механічною теорією тертя. Розглянемо закономірності контактування поверхонь тертя з моменту зрушування елементів тертя.

Сили тертя спокою (F_n) називають зсувним зусиллям, що прикладається до контактуючих тіл, і не викликає їхнього взаємного ковзання (рис.1 , а). При цьому взаємне переміщення (L_n) досягається за рахунок деформації матеріалу виступів шорсткості в зоні контакту і називається попереднім зсувом. Деформування носить в основному пружний характер і зникає при знятті зусилля, що зрушує. Однак зі зростанням зусилля, що зрушує, попередній зсув набуває пластичного характеру і стає частково необоротним. На рис. 1, показана гранична величина попереднього зсуву (L_{nm}) і відповідно граничне значення сили тертя спокою, що називають статичною силою тертя. При подальшому збільшенні переміщення починається ковзання.

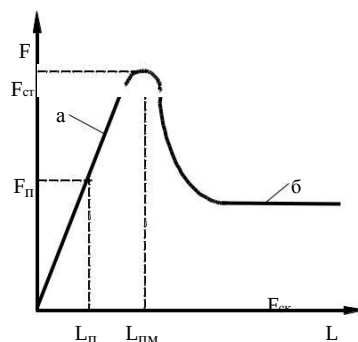


Рис.1 Характерні випадки формування сил тертя: *а* — сила тертя спокою; *б* — сила тертя ковзання

Силу тертя можна подати у вигляді добутку питомої сили тертя (τ) і фактичної площі контакту (A_r):

$$F = Ar. \quad (1)$$

Під коефіцієнтом тертя розуміють відношення найбільшої сили тертя спокою до діючого на контакт нормального зусилля:

$$\mu = F/N. \quad (2)$$

Тут також розрізняють коефіцієнти тертя спокою (статичний) і ковзання (кінетичний).

У залежності від характеру мастильного прошарку розрізняють чотири види тертя: тертя без мастильного матеріалу; тертя в умовах граничного мащення; гідродинамічне (газодинамічне) і змішане (яке є частково гідродинамічним, а частково граничним мащенням). У першому випадку контактують поверхні, що не змазуються. Вони покриті окисними плівками і найтоншими шарами молекул газів і води, адсорбованими з навколишнього середовища. В другому випадку, крім перерахованих плівок, присутні молекули мастильних матеріалів у вигляді тонкого шару товщиною в кілька молекул, міцно пов'язани з поверхнею. У третьому випадку шар рідкого мастила цілком розділяє з'єднані сполучені поверхні.

Тертя без мастильного матеріалу і тертя в умовах граничного мащення схожі за своєю природою і мають загальні закономірності, оскільки при граничному терті мономолекулярні шари мащення міцно пов'язані з твердою поверхнею, мають твердоподібні властивості і служать ніби продовженням твердої фази. Тому, як і при терті без мастильного матеріалу, фактично має місце контакт двох твердих поверхонь. Відмінність полягає в різних значеннях коефіцієнта тертя: без мастильного матеріалу він звичайно більше 0,2, а при граничному його величина знаходиться в інтервалі 0,05...0,2.

Механізм виникнення тертя пояснює молекулярно-механічна теорія тертя. Згідно з цією теорією він має двоїсту молекулярно-механічну природу. Силу

тертя можна подавати як суму молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових:

$$F = F_A + F_d. \quad (3)$$

Молекулярна складова обумовлена опором розриву молекулярних або міжатомних зв'язків, що виникають між контактуючими тілами. Розсіювання роботи тертя в теплоту пов'язане з пружною деформацією кристалічних ґрат. Робота зовнішньої сили переходить у потенційну енергію решіток. Після розриву зв'язку потенційна енергія переходить в енергію коливань атомів – у внутрішню.

Механічна складова викликана опором пружного і пластичного відтискування виступів контактуючих тіл, що утворилися при русі поверхонь, рис. 2.

На рис. 2, а показане ковзання твердого сферичного виступу по в'язко-пружному півпросторі. Матеріал після проходження виступу через запізнювання деформації щодо навантаження не встигає відновлювати форму.

Тому поверхні перед виступом і після несиметричні, а реакція опору, прикладена в центрі контактної поверхні, не збігається за напрямком з нормальним зусиллям. Це явище характеризується гістерезисом деформації. На рис.3 показана крива гістерезису при розтягуванні-стискуванні в'язкопружного стрижня. Крива *ОМ* відбиває процес навантаження, а крива *MN* – процес розвантаження. Через запізнювання деформації в той момент, коли напруга дорівнює нулю, деформація не зникає і дорівнює ϵ_0 . Тому слід, що залишився від руху виступу, не встигає відновлюватися цілком, чого варто було б очікувати для ідеального пружного середовища.

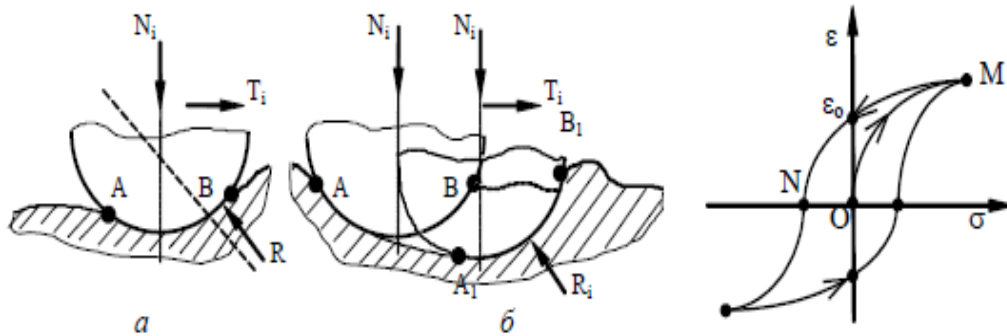


Рис. 2 Відтискування матеріалу при ковзанні:
а – пружне; б – пластичне

Рис. 3 Гістерезис

На рис. 2, б показана поведінка твердого виступу при ковзанні по пластичному середовищу. На початку, поки ковзання відсутнє, під дією нормального зусилля виступ заглиблюється. Контактна крива *AB* симетрична. При ковзанні задня границя виступу відривається від лунки. Усе навантаження зосереджується на передній границі, а дуга контакту займає положення *A₁B₁*. Спереду виникає валик матеріалу, що відтискується. Реакція опору не збігається за напрямком з нормальним зусиллям.

Оскільки молекулярна і механічна взаємодія здійснюється на фактичних площинах контакту, то питома сила тертя записується у такому вигляді:

$$\tau = \frac{F}{A_r} = \tau_a + \tau_\Delta \quad (4)$$

де τ_a , τ_Δ – адгезійна і деформаційна складові питомого зусилля.

Численні спроби вивести розрахункове співвідношення для адгезійної складової (τ_a) не мали успіху через неможливість врахувати вплив різноманітних плівок, що покривають поверхні. У той же час для ювенільних (без плівок) металевих поверхонь встановлено, що при їхньому контакті адгезія обох поверхонь приводить до їх зрощування (холодне зварювання), і питома сила тертя близька до опору зсуву решітки. Останні дослідження показали, що на фактичній площі контакту, обумовленій зминанням субмікронерівностей, опір зрушенню контактуючих кристалів наближається до теоретичної міцності. Однак для реальних поверхонь, покритих плівками, адгезійна складова значно нижча. Залежність адгезійної складової питомої

сили тертя від фактичного тиску ($\sigma_r = N/A_r$) виражається у вигляді двочленного закону:

$$\tau_a = \tau_0 + \beta \sigma_r \quad (5)$$

де τ_0 і β – молекулярні константи тертя, визначені експериментально. Таким чином, молекулярно-механічна теорія тертя ґрунтується на таких положеннях:

– взаємодія між тертьовими тілами здійснюється на дискретних ділянках контакту, що складають фактичну площу контакту (ФПК);

– оскільки фактична площа контакту мала порівняно з номінальною площею A_a , та на одиничних плямах контакту розвиваються тиски, достатні для зближення контактуючих виступів і виникнення міжмолекулярної взаємодії між ними. Сумарна сила міжмолекулярної взаємодії між зближеними ділянками поверхонь тертя являє собою молекулярну складову тертя. Критерієм оцінювання сил міжмолекулярної взаємодії є відношення $\tau_{зріз}/\sigma_v$. $\tau_{зріз}$ – опір зрізу; σ_v – тимчасовий преділ міцності;

– при відносному переміщенні контактуючих тіл проникли виступи поверхні, одного тіла проорюють більш м'який матеріал іншого. Опір цього матеріалу переміщення в його об'ємі нерівностей поверхні тіла, що спряжується, обумовлює механічну складову тертя. Критерієм оцінювання внеску механічної складової у формуванні сил тертя є величина $h_{вист}/r_{вист}$, де $h_{вист}$ – висота виступу; $r_{вист}$ – радіус при вершині виступу;

– поверхні тертя реальних тіл покриті оксидними і адсорбційними плівками, тому міжмолекулярна взаємодія здійснюється не між самими тілами, а між плівками різної природи. Це забезпечує позитивний градієнт механічних властивостей за глибиною – необхідна умова зовнішнього тертя.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії вираз для коефіцієнта тертя має такий вигляд:

$$f = \frac{\tau_{зріз}}{\sigma_v} + \beta + k_a \sqrt{\frac{a}{r_{вист}}} \quad (6)$$

де $\tau_{зріз}$ – опір зрізу при відсутності нормальних напруг;

σ – нормальна напруга на контакті;

β – п'єзокоефіцієнт, що характеризує зміцнення адгезійного зв'язку під дією нормальних напруг,

$r_{вист}$ – радіус заокруглення нерівностей,

k – коефіцієнт, що залежить від шорсткості поверхні, для найбільш типових видів обробки поверхонь, розповсюджених у машинобудуванні, $k = 0,44$;

a – відстань між поверхнями.

Перші два доданки характеризують молекулярну складову тертя, а третій – деформаційну. Якщо матеріал на плямах контакту деформується

в основному пружно, значення f залежить від молекулярної взаємодії. При пластичному контакті істотну роль відіграє деформаційна складова.

Коефіцієнт тертя являє собою функцію ряду факторів, яка визначає умови роботи трібосистеми: навантаження, швидкість ковзання, наявність плівок на поверхнях тертя контактуючих тіл, мікрогеометрії поверхонь цих тіл, умов тепловідводу тощо. Розглянемо деякі з них.

Нормальне навантаження. Вплив навантаження N на коефіцієнт тертя залежить від виду контактної взаємодії – пружної або пластичної. У загальному випадку залежність $f(N)$ немонотонна, (рис. 4). Положення мінімуму цієї кривої залежить від співвідношення молекулярної і механічної складових. При збільшенні відношення F_a/F_d мінімум кривої зміщується в зону менших значень N . В зоні малих навантажень (ліва гілка кривої) реалізується переважно пружний контакт і значення f визначається в основному молекулярною складовою коефіцієнта, тертя. Зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням N обумовлене, тим, що N росте швидше, ніж викликане цим ростом збільшення площі фактичного контакту, і як наслідок – сили тертя.

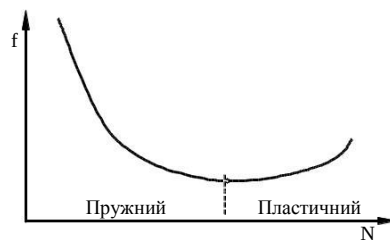


Рис. 4 Загальний вигляд функціональної залежності коефіцієнта тертя від навантаження

Після досягнення мінімуму f реалізується в основному пластичний контакт. При цьому тиск на плямах фактичного контакту дорівнює твердості більш м'якого матеріалу і не залежить надалі від навантаження. Отже, $F_a = const$ і коефіцієнт тертя залежать тільки від механічної складової, тобто від глибини відносного проникнення виступів дотичних тіл.

Швидкість ковзання. Вплив швидкості ковзання V на коефіцієнт тертя

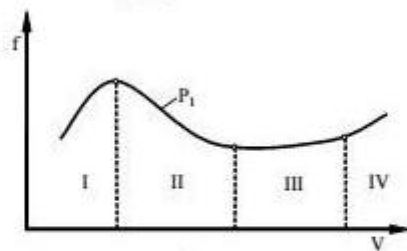


Рис. 5. Вплив швидкості ковзання на коефіцієнт тертя при різних контактних тисках

залежить від ряду факторів, у тому числі від навантаження і механічних властивостей тертьових тіл. У загальному випадку залежність $f(V)$ має два екстремуми: максимум і мінімум. Такий вигляд кривої характерний для недосконалого пружного контакту, рис. 5.

Зі збільшенням швидкості ковзання V в зоні малих її значень (ділянка I) трохи збільшується температура на плямах ФПК, що сприяє зминанню нерівностей, збільшенню площі їхнього контакту з контртілом і зростанню в'язкого опору деформування. У зоні контакту не встигає також утворитися захисна плівка достатньої товщини, і завдяки цьому на окремих ділянках поверхні тертя можливе мікрорізання.

Падіння коефіцієнту тертя f при подальшому підвищенні V (ділянка II) обумовлене зниженням як молекулярної, так і механічної складових. Деформації матеріалу контактуючих виступів при збільшенні швидкості не встигають поширюватися на значну глибину, пружно-пластичне тіло поводить як пружне, зменшуються глибина відносного проникнення нерівностей, розміри і кількість фрикційних зв'язків.

При високих швидкостях ковзання (ділянка III), поряд з характерними для другої ділянки явищами, нагрівається значний шар деформованого матеріалу і реалізується в більшій мірі пластична деформація. В результаті можливе зростання відносної глибини проникнення нерівностей і, як наслідок, деяке збільшення коефіцієнта тертя.

Температура в зоні контакту тертьових тіл. Залежність коефіцієнта зовнішнього тертя від температури T в зоні контакту тертьових тіл немонотонна (рис. 2.6.) Це обумовлене сумарним ефектом зміни молекулярної і механічної складових коефіцієнта тертя. Зі збільшенням T знижується F_a унаслідок утворення плівок і зниження міцності адгезійних сполук на зріз, а також зниження F_d , за рахунок збільшення твердості поверхневих шарів. Це викликає зниження коефіцієнта тертя. З наближенням до T_0 падіння f сповільнюється, оскільки збільшення твердості матеріалу не відбувається, а навпаки, через нагрівання поверхневих шарів відбувається зменшення твердості матеріалу, що сприяє збільшенню розмірів і кількості плям фактичної площі контакту, тобто F_a .

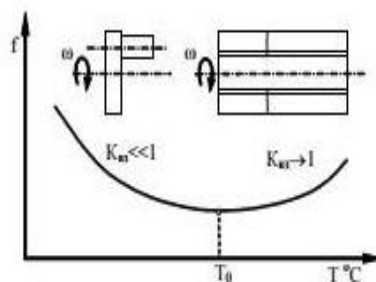


Рис. 6 Залежність коефіцієнта тертя від температури в зоні фрикційного контакту

Подальше зростання T призводить до збільшення F_d і F_d одночасно через нагрівання і втрату твердості поверхневого шару, що сприяє збільшенню коефіцієнта тертя в цілому (права гілка кривої).

Мікрогеометрія поверхонь тертя. Вплив мікрогеометрії на коефіцієнт тертя залежить від того, який вид контакту (пружний або пластичний) є домінуючим. При пружному контакті залежність $f = f(R_z)$ немонотонна, (крива 1 на рис. 7), де R_z - середньоарифметична висота шорсткості.

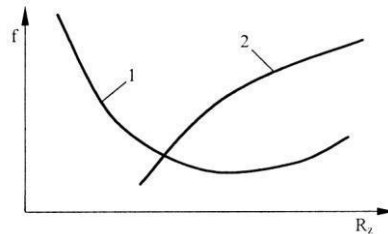


Рис. 7 Вплив шорсткості сполучення поверхонь на коефіцієнт тертя:
1-пружний контакт; 2- пластичний контакт

Збільшення R_z , приводить спочатку до зниження площі фактичного контакту і зменшення молекулярної складової F_d . При подальшому збільшенні R_z радіуси заокруглення вершини нерівностей зменшуються. Це сприяє глибшому проникненню матеріалу і збільшенню F_d (права гілка кривої 1 на рис. 7). При пластичному контакті молекулярна складова тертя від мікрогеометрії не залежить, а механічна – росте, що і обумовлює монотонне зростання f при збільшенні R_z (крива 2 на рис. 7).

Фізико-механічні властивості контактуючих тіл. Вплив властивостей контактуючих тіл на коефіцієнт тертя обумовлений кількістю і міцністю фрикційних зв'язків. Так, при збільшенні твердості тіл, що спряжуються, зменшуються глибина відносного проникнення і кількість контактуючих нерівностей. Це призводить до одночасного зменшення молекулярної і механічної складової тертя.

В умовах пружного контакту коефіцієнт тертя залежить від модуля пружності контактуючих тіл. Зі збільшенням модуля пружності зменшується фактична площа контакту і глибина відносного проникнення нерівностей, що зменшує відповідно F_d і F_d і призводить до падіння коефіцієнта тертя.

Закономірності руйнування поверхні тертя згідно з молекулярно-механічною теорією тертя. Відповідно до утомної теорії, зношування обумовлене наявністю таких факторів:

- дискретним характером взаємодії тертьових тіл, тобто взаємодією нерівностей контактуючих поверхонь на дискретних ділянках, що утворюють фактичну площу контакту;
- багаторазово повторюваним імпульсним тепловим впливом і деформаціями локальних об'ємів матеріалу поверхневого шару в зонах контакту з нерівностями;
- наявністю мікродефектів структури та їхньою акумуляцією в поверхневому шарі тіла, що зношується у процесі тертя;

- існуванням характерного для кожного матеріалу граничного стану, що визначає умови його руйнування (наприклад, гранична щільність енергії, накопиченої в локальному об'ємі).

Руйнування поверхні тертя і утворення часток зносу при утомному зношуванні являють собою багатостадійний процес. Підлягаючий руйнуванню мікрооб'єм поверхневого шару тіла, що зношується, зазнає деформації в процесі тертя. Це супроводжується появою ушкоджень (пружних спотворень решіток, дислокацій) у мікрооб'ємі. Багаторазове деформування матеріалу призводить до підвищення концентрації мікрodefektів і після досягнення певної концентрації до утворення ультрамікротріщин. Подальше навантаження матеріалу викликає їхній розвиток і злиття. Результатом цього процесу є відділення від основного матеріалу його частин, які видаляються згодом із зони тертя у вигляді часток зносу.

Інтенсивність утомного зношування I_h описується рівнянням І.В. Крагельського, отриманим для множинного контакту. Контакт моделюється площиною (матеріал, що зношується), яка сполучається з набором твердих сферичних сегментів однакового радіуса, розташованих по висоті так, що розподіл матеріалу в поверхневому шарі моделі і реальної поверхні описуються однаковою опорною кривою. Рівняння має вигляд:

$$I_h = k k_{\text{єз}} \sqrt{\frac{a}{R} \cdot \frac{p_a}{p_r} \cdot \frac{1}{n}}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від розташування нерівностей по висоті, звичайно $k = 0,2$;

$k_{\text{єз}}$ – коефіцієнт взаємного перекриття третьових тіл;

a/R – відносне зближення контртіла і зношуваного матеріалу;

p_a, p_r , – номінальний і фактичний тиск(в контактї);

n – кількість циклів до руйнування деформованого об'єму матеріалу, що зношується.

Число циклів n до руйнування є степеневою функцією діючих на пружному контактї напруг $\sigma_{np} = k'_{fp} :$

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{np}} \right)^{t_y}, \quad (8)$$

де σ_0 – руйнівне напруження при однократному навантаженні;

t_y – коефіцієнт утоми, змінюється від 1,3 до 12 і залежить від матеріалу зношуваного тіла;

k – коефіцієнт, що залежить від природи зношуваного матеріалу.

Для пластичного контакту кількість циклів до руйнування є функцією амплітудних значень деформацій ϵ , які зазнає матеріал, що зношується, у процесі тертя:

$$n = \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} \right)^{t_n}, \quad (9)$$

де ε_p – деформація матеріалу при розриві;

t_n – коефіцієнт утоми, вимірюваний від 2 до 3, тобто в більш вузькому інтервалі, ніж при пружному контакті.

Природа руйнування при одноосьовому циклічному і фрикційному навантаженнях істотно не відрізняється. З огляду на це, коефіцієнт утоми може бути визначений при обробці кривих об'ємної утоми Велера, якщо при терті матеріал, що зношується, не вступає в механохімічну взаємодію з навколишнім середовищем, мастильним матеріалом або контртілом. Складові, наведені в формулі напруги і деформації, можуть бути визначені розрахунковими шляхом або експериментально.

На сьогодні немає єдиної думки про те, у якій зоні (на поверхні або в підповерхневому шарі) починається руйнування, і чи є утворення часток зносу результатом розвитку підповерхневих або поверхневих тріщин. Це зумовлено виникненням при терті зони пластичних деформацій в підповерхневому шарі, в якому переважно концентруються дислокації.

Скупчення мікрodefектів і пустот на відстані від поверхні тертя сприяє розповсюдженню мікротріщин паралельно поверхні тертя. Розвиток мікротріщин може відбуватися або шляхом з'єднання порожнин, або внаслідок збільшення однієї з них. Після багаторазового навантаження матеріалу тіла, що зношується, тріщина, поширюючись паралельно поверхні тертя, відокремлює від основного матеріалу тонкий шар. При виході її на поверхню утвориться частка зносу.

Існують численні дослідження, що підтверджують можливість реалізації поверхневого механізму руйнування металів і полімерів. Шліф сталевго зразка, зображений на рис. 8. Видно, що, розташовані перпендикулярно до поверхні тертя тріщини поширюються всередину зразка. На деякій глибині вони повертаються і орієнтуються паралельно поверхні тертя (тріщини 1 і 2). При цьому можливо злиття тріщин і викрашування мікрооб'єму матеріалу, укладеного між ними.



Рис.8. Розповсюдження поверхневих тріщин утоми по глибині зразка сталі.

Утворення часток зносу може відбуватися в результаті одночасного зростання як поверхневих, так і підповерхневих тріщин.

Зношування полімерних матеріалів є наслідком імпульсно теплових впливів, що протікають на дискретних ділянках контакту, і напруг, що призводять до необоротних змін їхньої структури.

Короткочасне підвищення температури в точках контакту призводить до збільшення рухливості ланцюгів макромолекул і зниження сил внутрішньої і міжмолекулярної взаємодії. Збільшення сегментальної рухливості супроводжується ростом імовірності необоротного зсуву ланцюгів макромолекул під дією механічних напруг за умови, якщо сили внутрішньої або міжмолекулярної взаємодії виявляються менше діючих напруг.

З накопиченням розривів зв'язків у процесі тертя збільшуються напруги на сусідніх, менш напружених зв'язках і створюються умови для їх розриву. В результаті в структурі полімеру утворюються мікродефекти. Після багаторазового прикладання навантаження утворюються мікротріщини в зонах максимального скупчення мікродефектів, у яких локалізуються механічні напруги. При збільшенні неоднорідності розподілу напруг завжди мають місце дефекти технологічного походження, а також аморфні прошарки у полімерів, що кристалізуються, і наявність двох різко відмінних за енергією типів взаємодії: хімічної (внутрішньої молекулярної) і фізичної (міжмолекулярної). Кінетика розвитку тріщин і утворення часток зносу визначається типом полімерного матеріалу і співвідношенням теплового і механічного навантажень на плямах фактичного контакту.

Інтенсивність утомного зношування залежить від навантаження, швидкості, наявності мастильного матеріалу, механічних властивостей матеріалу, що зношується, топографії поверхонь, що спряжуються, і фрикційних властивостей тертьових тіл.

Вплив нормального навантаження N на швидкість утомного зношування може бути виражений степеневою функцією вигляду:

$$I_h \sim P_a^{1+\beta_0 t_y} \quad (10)$$

де p_a – номінальний тиск на контакт;

β_0 – коефіцієнт, що залежить від шорскості контртіла, орієнтовно дорівнює 0,05;

t_y – коефіцієнт втоми матеріалу.

Показник степеня в наведеній формулі змінюється в інтервалі від 1,4 до 3. При терті без мастильного матеріалу показник степеня наближається до 1, а при наявності мастильного матеріалу він значно перевищує 1.

Вплив навантаження на I_h , здійснюється в основному при посередництві коефіцієнта тертя і температури. Так, збільшення N призводить до зростання температури в зоні тертя, зміни властивостей поверхневого шару, збільшення частки пластичних деформацій та їхніх амплітудних значень. Наслідком цього є зниження опору матеріалу утомному зношуванню.

Вплив швидкості ковзання на інтенсивність зношування I_m здійснюється через швидкість деформування матеріалу, що зношується, і в більшій мірі через температуру в зоні тертя. Найбільше швидкість ковзання впливає на зношування полімерів і композитів на їхній основі. У загальному випадку залежність $I_m(V)$ відображається кривою з мінімумом. В зоні малих швидкостей збільшення V призводить до зменшення часу існування фрикційних зв'язків і глибини відносного проникнення нерівностей поверхні контртіла. Деформації матеріалу в точках контакту зменшуються, інтенсивному деформуванню піддається більш тонкий поверхневий шар. В результаті це призводить до зниження інтенсивності зношування матеріалу. При високих швидкостях ковзання визначальна роль у процесі руйнування поверхневого шару належить температурі. Підвищення V викликає зростання температури в зоні тертя. Це супроводжується падінням модуля пружності і міцності матеріалу поверхневого шару, ростом контактних деформацій і коефіцієнта утоми. Результатом зміни зазначених факторів є підвищення інтенсивності зношування тертьових тіл. У даному випадку може мати місце малоциклова утома матеріалу, що зношується.

3. Питання для самоконтролю

1. Яка із складових науки трибологія відповідає за розвиток систем діагностування трібосистем?
 - 1.1. Триботехніка
 - 1.2. Трибоінформатика
 - 1.3. Триботехнологія
 - 1.4. Трибомоніторинг
 - 1.5. Трибоматеріалознавство
2. Яким ученим розроблена молекулярна механічна теорія тертя?
 - 2.1. І. Дезагюльє
 - 2.2. Б.В. Дерюгіним
 - 2.3. І.В. Крагельським
 - 2.4. Г.М. Бартенєвим
 - 2.5. В Гарді
3. Які складові входять до сили тертя?
 - 3.1. Молекулярна і кінетична
 - 3.2. Молекулярна і адгезійна
 - 3.3. Молекулярна і механічна
 - 3.4. Адгезійна і кінематична
4. Сила тертя – це:
 - 4.1. Властивість трібосистеми змінювати структуру матеріалів при відносному русі
 - 4.2. Властивість трібосистеми працювати без заїдання
 - 4.3. Сила, що чинить опір відносному переміщенню та направлена у бік дії зовнішньої сили
 - 4.4. Сила, що чинить опір відносному переміщенню та направлена в протилежний бік дії зовнішньої сили

4.5. Сила, що чинить опір відносному переміщенню та направлена перпендикулярно дії зовнішньої сили

5. Яку розмірність має коефіцієнт тертя?

5.1. Безрозмірний

5.2. Розмірність – метр

5.3. Розмірність – метр⁻¹

5.4. Розмірність – секунда

5.5. Розмірність – секунда⁻¹

6. Шляхи зниження механічної складової сили тертя?

6.1. Застосування мастил

6.2. Збільшення шорсткості

6.3. Зменшення площі тертя

6.4. Зменшення шорсткості

6.5. Зменшення радіусу вершин виступів шорсткостей

7. Шляхи зниження адгезійної складової сили тертя?

7.2. Застосування мастил

7.3. Збільшення площі тертя

7.4. Збільшення шорсткості

7.5. Зменшення шорсткості

7.5. Збільшення радіусу вершин виступів шорсткостей