

Самостійна робота за темою 8

Тема: Методи і засоби досліджень тертя і зношування
(Самостійно опрацювати матеріал за темою 8 згідно плану)

- 8.1. Кінематичні схеми контакту трибосистем. Прямі і зворотні трибосистеми.
- 8.2. Оптимізація конструктивного виконання трибосистем.
- 8.3. Шляхи зменшення зовнішнього тертя в конструкціях трибосистем.

8.1. Кінематичні схеми контакту трибосистем. Прямі і зворотні трибосистеми

До конструкторських засобів підвищення зносостійкості можна віднести: оптимальний вибір кінематичної схеми спряження; масштабний фактор трибосистем, тобто оптимальне співвідношення площ тертя й об'ємів тертя; вибір сумісних матеріалів; розташування їх по твердості для рухомих і нерухомих деталей.

Це далеко не повний перелік конструкторських засобів підвищення зносостійкості трибосистем машин на етапі їхнього проектування, однак найбільш ефективний.

Можливі кінематичні схеми контакту трибосистем наведені на рис. 8.1. Розподіл спряжень за такою класифікацією широко використовується в теорії машин, механізмів і деталей машин. Така класифікація важлива також для досліджень триботехнічних характеристик, оскільки від схеми сполучення деталей залежить питомий тиск у місцях дотику матеріалів і частота їх контакту між собою при обертанні, яка визначається коефіцієнтом взаємного перекриття.

З приведених схем конструктивного оформлення трибосистем на рис. 8.1 в лабораторних випробуваннях на серійних машинах тертя частіше за все використовують чотири нижчі (рис. 8.2, а,б,в,г) і три вищі (рис. 8.2, д,е,ж) схеми.

Поділ на вищі і нижчі схеми контакту трибосистеми залежать від відношення площини тертя рухомого і нерухомого трибоелементів, яке зветься коефіцієнтом взаємного перекриття ($K_{вз}$). Фізичний зміст цього коефіцієнту зрозумілий з рис 8.3 і визначення його за формулою:

$$K_{вз} = \frac{A_{a1}}{A_{a2}}, \quad (8.1)$$

де A_{a1} , A_{a2} – номінальні площі тертя відповідно нерухомого і рухомого елементів трибосистем.

Необхідно відзначити, що при розрахунку $K_{вз}$ у чисельник варто підставляти меншу площу тертя одного з елементів, незалежно від того, рухомий це елемент трибосистеми або нерухомий. Звідси впливає, що для нижчих кінематичних трибосистем $K_{вз}$ наближається до одиниці ($K_{вз} \rightarrow 1$), а

для вищих кінематичних трібосистем – наближається до нуля ($K_{вз} \rightarrow 0$).

Важливість урахування $K_{вз}$ обумовлена тим, що зміна цього коефіцієнта призводить до зміни часу контактування між собою тертьових поверхонь і з активними компонентами середовища, що у свою чергу призводить до зміни швидкості і глибини фізико-хімічних процесів, що протікають. Крім цього, при постійному нормальному навантаженні в трібосистемі при зменшенні $K_{вз}$ спостерігається підвищення питомого навантаження, оскільки йде зменшення площі, що сприймає це навантаження і навпаки. Це необхідно враховувати при виборі матеріалів для трібосистеми.

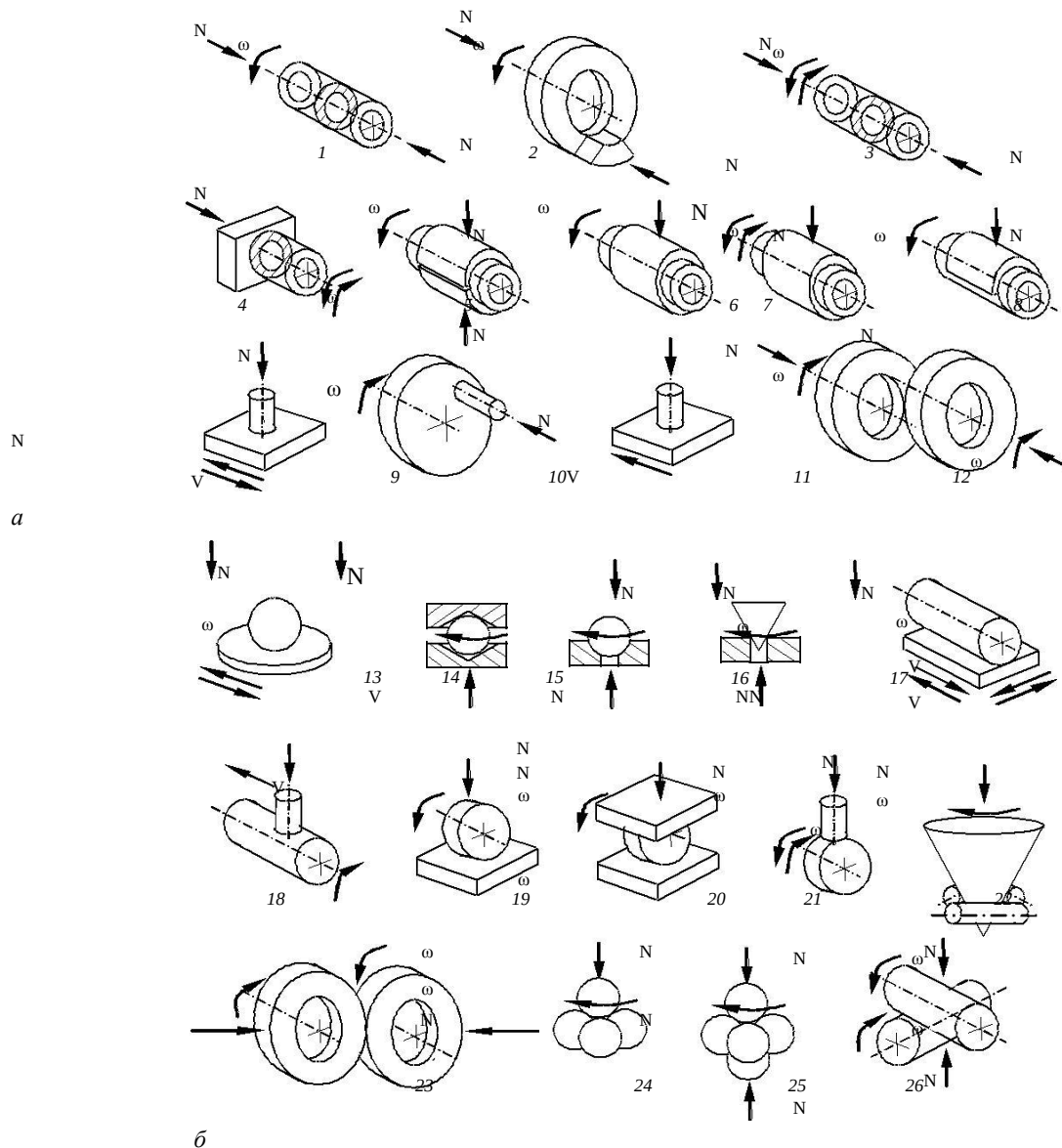


Рис. 8.1. Кінематичні схеми трібосистем:

a – нижчі кінематичні пари; *б* – вищі кінематичні пари

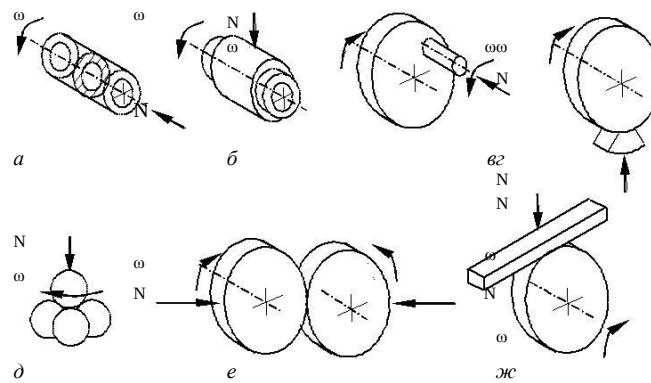


Рис. 8.2. Кінематичні схеми спряжень для лабораторних випробувань на серійних машинах тертя:

a, б, в, г – нижчі пари; *д, e, ж* – вищі пари

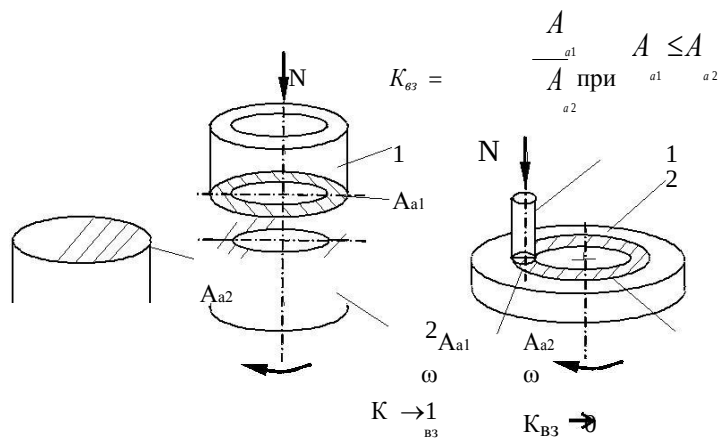


Рис. 8.3. Коефіцієнт взаємного перекриття і його визначення: 1 – нерухомий елемент; 2 – рухомий елемент

Крім того $K_{\text{вз}}$ впливає на процес відведення теплоти. Наприклад, при терті пальця по диску (рис. 8.3), коли коефіцієнт взаємного перекриття дуже малий, велика частина теплоти, що виділяється при терті, поглинається диском і передається з його поверхні атмосфері або мастильному матеріалу. Температура всього диска при цьому змінюється мало, а температура пальця може бути значною. При терті кільцеподібних зразків, коли $K_{\text{вз}}$ наближається до одиниці, уся теплота, що виділяється при терті, спрямовується всередину матеріалу, а потім уже від бічних стінок у навколишнє середовище (рис. 8.3). У цьому випадку робоча температура обох зразків буде вища при тих самих умовах роботи порівняно з першим випадком. Слід зауважити, що два цих граничних випадки, коли $K_{\text{вз}} \rightarrow 1$ та $K_{\text{вз}} \rightarrow 0$, повинні розглядатися при проектуванні, у дослідженнях зношування і особливо для оцінювання нових матеріалів для трібосистем машин і механізмів.

Розглянемо питання впливу $K_{\text{вз}}$ на такі тріботехнічні характеристики, як інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя. На прикладі трібосистеми в якості матеріалу нерухомого елемента застосовувалася сталь 20Х (HRC 30), а для рухомого елемента бронза – Бр.АЖ 9-4 (HB 95),

мастильного матеріалу – гідравлічна рідина ВНИИ НП-403. Ці матеріали найбільше застосовуються в гідромашинах.

Результати дослідження основних триботехнічних характеристик подані на рис. 8.4.

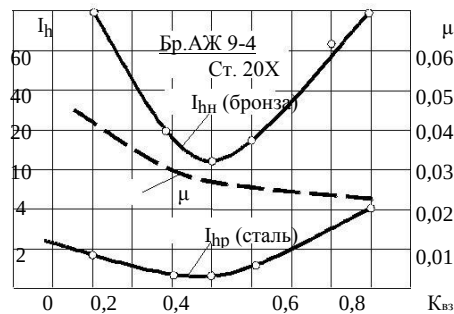


Рис. 8.4. Залежність інтенсивності зношування рухомого I_{hp} і нерухомого I_{hn} елементів і коефіцієнта тертя μ від коефіцієнта взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$ для матеріалів ст. 20Х + Бр.АЖ 9-4

З аналізу залежностей випливає, що коефіцієнт взаємного перекриття має явно виражений оптимум. При $K_{\text{вз}} = 0,5$ лінійна інтенсивність зношування нерухомого і рухомого елементів мінімальна. При збільшенні $K_{\text{вз}}$ або зменшенні від 0,5 інтенсивність зношування різко зростає, особливо для нерухомого м'якого зразка.

Збільшення сумарної інтенсивності зношування при збільшенні $K_{\text{вз}}$ пояснюється зменшенням часу контактування робочої поверхні рухомого зразка з робочим середовищем, активними компонентами робочого середовища і збільшенням часу контактування матеріалів між собою. Для збільшення $K_{\text{вз}}$ характерне зниження коефіцієнта тертя і збільшення часу припрацювання. Збільшення I_{hs} відбувається в основному за рахунок зносу нерухомого – м'якого зразка.

При зменшенні $K_{\text{вз}}$ від 0,5 також спостерігається зростання інтенсивності зношування за рахунок нерухомого м'якого зразка.

Порівняно мала робоча площа нерухомого елемента дуже швидко наклепується, набуваючи високої мікротвердості при малій глибині наклепаного шару. Очевидно, подальше збільшення інтенсивності зношування йде за рахунок перенаклепу. Для зменшення $K_{\text{вз}}$ характерне збільшення коефіцієнта тертя і зменшення часу припрацювання трибосистеми.

Експериментальним шляхом була також отримана залежність зміни інтенсивності зношування від $K_{\text{вз}}$ для однойменних матеріалів сталь 20Х (HRC 30) по сталі 20Х (HRC 30), за тих самих умов експерименту, що наведені на рис. 5.5. У цьому випадку точка $K_{\text{вз}} = 0,5$ є точкою вирівнювання інтенсивностей зношування рухомого і нерухомого елементів. Характерним для цієї трибосистеми є те, що в зоні $K_{\text{вз}} = 0,5 \dots 0,9$ трибосистеми дуже довго припрацьовуються і схильні до задирання при коливаннях навантаження. При $K_{\text{вз}} < 0,2$ час припрацювання зменшується, трибосистема працює стійко, однак спостерігається підвищення коефіцієнта тертя. Отримані результати можуть

бути використані для конкретних рекомендацій конструктору на етапі проектування при виборі робочих площ тертя трібосистем. Отже:

1. При виборі співвідношення площ тертя необхідно прагнути до $K_{\text{вз}} = 0,5$, тобто до нижчої кінематичної пари, де контакт здійснюється по площі. У цьому випадку спряження матеріалів повинне бути "твердий – м'який", що забезпечить швидке припрацювання і стійкість у роботі.

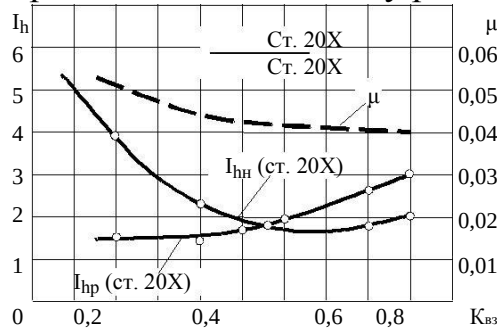


Рис. 8.5. Залежність інтенсивності зношування рухомого I_{hr} і нерухомого I_{hn} елементів і коефіцієнта тертя μ від коефіцієнта взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$ для матеріалів ст. 20X+ст. 20X

Спряження матеріалів "твердий – твердий" застосовується лише для вищих кінематичних трібосистем (контакт по лінії або точці), що також забезпечує швидке припрацювання і стійкість у роботі.

Цей висновок можна проілюструвати спряженням рис. 8.4 і 8.5, що відбито на рис. 8.6. При $K_{\text{вз}} < 0,2$ виграш у ресурсі буде мати трібосистема "сталь 20X по сталі 20X", однак при цьому значно зростає коефіцієнт тертя. Нижчі кінематичні трібосистеми (торцеве тертя або тертя по площі) і вищі кінематичні трібосистеми (тертя по лінії або в точці) дають різний ефект в умовах утворення і руйнування плівок мащення, що призводить до зміни зносу на кілька порядків.

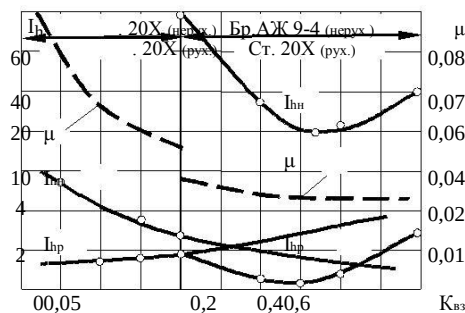


Рис. 8.6. Залежність інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя від коефіцієнта взаємного перекриття для різного спряження матеріалів

2. В основу вибору кінематичної схеми спряження переважно закладають тип переданого руху, тобто конструктивну схему усього виробу. І все-таки при проектуванні трібосистем необхідно прагнути до нижчих кінематичних трібосистем з односпрямованим переміщенням.

В односпрямованому і знакозмінному рухах різко відрізняються характери руйнування поверхонь тертя. Так, зворотно-поступальний рух призводить до значного зносу (наприклад, у результаті фретинг-корозії при

малих амплітудах переміщення або в результаті утомного зносу, при великих амплітудах переміщення). Порядок зростання зносу при знакозмінних рухах щодо односпрямованого не встановлений.

Прямі і зворотні трибосистеми

З аналізу безлічі існуючих конструкцій трибосистем, застосовуваних у машинобудуванні, можна виділити чотири умови існування таких конструкцій.

Перша умова – це широко розповсюджена конструкція трибосистем, рухомий елемент якої має високу твердість і велику площу тертя, а нерухомий – меншу твердість і меншу площу тертя, тобто:

$$H_p > H_n, A_{ap} > A_{an}, \quad (8.2)$$

де H_p, H_n – твердості рухомого і нерухомого елементів; A_p, A_n – площі тертя рухомого і нерухомого елементів відповідно.

Через масовість застосування такого сполучення матеріалів і площ тертя, назвемо таку трибосистему прямою.

В основу визначення понять прямої і зворотної трибосистем було покладене функціональне призначення елементів. Необхідно розрізняти елемент, через який потужність підводиться до трибосистеми, і елемент, через який вона перетворюється в роботу.

В усіх трибосистемах потужність підводиться через рухомий елемент, з'єднаний із приводом, а перетворюється в роботу на нерухомому елементі. Якщо рухомий елемент трибосистеми буде мати високу твердість і велику робочу площу тертя, то це забезпечить гарні умови передачі через нього потужності або крутного моменту, а також можливість тривалого контакту робочої поверхні тертя із середовищем, що поліпшить умови роботи цього елемента. Отже, нерухомий елемент повинен мати меншу твердість і меншу робочу площу тертя, що забезпечить його швидке припрацювання до рухомого елемента. Трибосистема, яка відповідає названим умовам, називається прямою трибосистемою. Широко розповсюджений приклад такої трибосистеми – обертовий сталевий вал у спряженні з нерухомим антифрикційним вкладишем або підшипником (рис. 8.7).

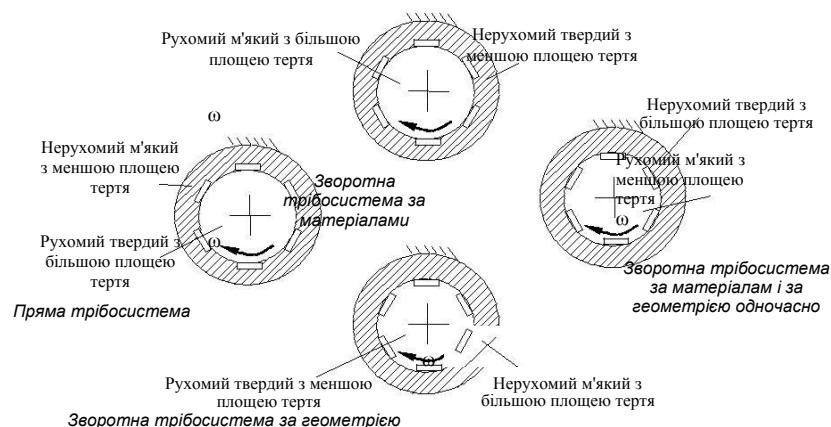


Рис. 8.7. Схеми прямих і зворотних трибосистем для спряження "вал – підшипник"

Друга умова – це трібосистема, яка має змінене співвідношення твердостей матеріалів, а співвідношення площ тертя залишається колишнім, як і у прямій трібосистемі:

$$H_p < H_n, A_{ap} > A_{an}, \quad (8.3)$$

тобто рухомий елемент трібосистеми має меншу твердість і більшу площу тертя, а нерухомий – твердіший і з меншою площею тертя. Оскільки у такій трібосистемі змінене тільки взаємне розташування матеріалів, назовемо її зворотною трібосистемою за матеріалами. Приклад такої трібосистеми показаний на рис. 5.7.

Третя умова – це трібосистема, у якій змінене співвідношення площ тертя, а співвідношення твердостей матеріалів залишається колишнім порівняно з прямою трібосистемою:

$$H_p > H_n, A_{ap} < A_{an}. \quad (8.4)$$

Оскільки в цієї пари змінене лише взаємне розташування площ тертя, назовемо таку трібосистему зворотною трібосистемою за геометрією.

Четверта умова – це трібосистема, у якій змінено стосовно прямої трібосистеми співвідношення твердостей матеріалів і співвідношення площ тертя:

$$H_p < H_n, A_{ap} < A_{an} \quad (8.5)$$

Оскільки в цієї трібосистеми змінене взаємне розташування матеріалів і площ тертя стосовно прямої трібосистеми, назовемо таку трібосистему зворотною трібосистемою за матеріалами і за геометрією одночасно.

Усі перераховані умови існування трібосистеми досить часто зустрічаються в реальних конструкціях машин та механізмів.

Зносостійкість прямих та зворотних трібосистем. Схеми конструктивного оформлення прямих і зворотних трібосистем за схемою "кільце – кільце" з коефіцієнтом взаємного перекриття 0,2, для лабораторних випробувань показані на рис. 8.8.

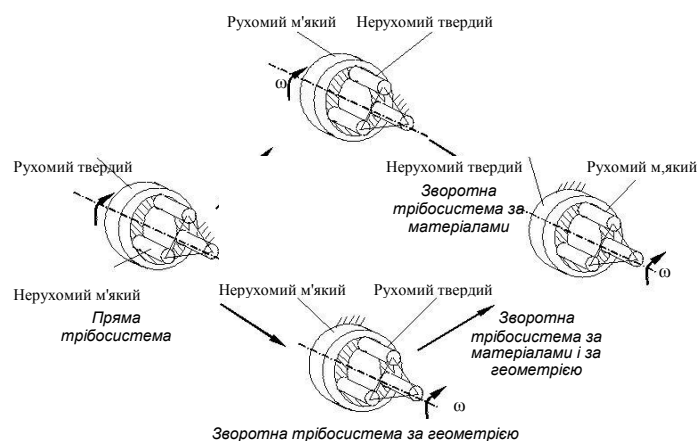


Рис. 8.8. Схеми прямих і зворотних трібосистем для лабораторних випробувань

Швидкість ковзання і навантаження для всього циклу випробувань складають: $V = 0,5$ м/с, $N = 800$ Н. Мастильним матеріалом є гідравлічна рідина ВНИИ НП 403, що подається в зону тертя з постійною витратою в часі. Як матеріал для твердих зразків застосовується сталь 20Х (HRC 30), для м'яких зразків – бронза Бр.АЖ 9-4 (HB 95).

Реєструють лінійну інтенсивність зношування рухомого I_{hp} і нерухомого I_{hn} зразків, шорсткість R_a , мікротвердість поверхонь тертя H_m , глибину наклепаного шару h_m , коефіцієнт тертя μ , робочу температуру в зоні тертя T , час припрацювання t_{np} і навантаження задирання N_3 . Результати зведені у табл. 5.1. Крім цього, на всіх зразках проводиться металографічний аналіз з метою вивчення будови деформованого поверхневого шару, який здійснюється на шліфах, виготовлених перпендикулярно поверхні тертя.

З аналізу отриманих результатів випливає, що мінімальна інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, час припрацювання характерні для прямої трібосистеми. Нерухомий бронзовий (м'який) елемент з меншою площею тертя при терті по сталевому (твердому) елементу у процесі припрацювання швидко набуває високої мікротвердості, $H_{mn} = 2428$ МПа (вихідна мікротвердість бронзи $H_{mn} = 1847$ Мпа), що наближається до мікротвердості вихідної сталеві поверхні ($H_{mn} = 3545$ МПа). Усі процеси, що відбуваються при терті, локалізуються в тонкому поверхневому шарі, глибина залягання максимальних напруг у підповерхневому шарі бронзи $h_{mn} = 3,6$ мкм. При цьому реалізується мінімальна інтенсивність зношування рухомого і нерухомого елементів, однак знос трібосистеми відбувається в основному за рахунок нерухомого елемента (табл. 8.1).

Таблиця 8.1 - Тріботехнічні характеристики різних умов існування трібосистем

Тріботехнічна характеристика і її одиниця	Трібосистема			
	Пряма трібосистема а $H_p > H_n$ $A_{ap} > A_{an}$	Зворотна трібосистема а за матеріалами $H_p < H_n$ $A_{ap} > A_{an}$	Зворотна трібосистема а за геометрією $H_p > H_n$ $A_{ap} < A_{an}$	Зворотна трібосистема а за матеріалами і геометрією $H_p < H_n$ $A_{ap} < A_{an}$
$I_{hn} \cdot 10^{-10}$, м/м	78	10	140	1,7
$I_{hp} \cdot 10^{-10}$, м/м	0,8	147	13	259
$I_{hs} \cdot 10^{-10}$, м/м	78,8	157	153	260,7
μ	0,041	0,048	0,042	0,045
T , °С	85	80	75	90
t_{np} , хв.	93	185	205	96
N_3 , Н	3750	5100	4500	3400

При терті прямої трібосистеми структура сталевго елемента близька до

вихідної (для даного рівня навантаження і швидкості ковзання). Структура бронзового елемента зазнає пластичної деформації. При цьому на окремих найбільш навантажених ділянках поверхні тиск може досягати значень, необхідних для пластичної плинності бронзи, що призводить до утворення фрагментованої структури, що має переривчасту будову за глибиною деформованого шару.

Найбільш імовірним поясненням східчастої будови деформованого тертям шару металу є процеси пластичної плинності поверхневих шарів при зносі течією. Відповідно до такого механізму, у результаті контакту мікронерівностей відбувається їхня течія і нагромадження пластичної деформації, що призводить до утворення максимально деформованого поверхневого шару у вигляді "кірки", що і формує надалі пластинчасті частки зносу.

Утворення такого шару може супроводжуватися перенасиченням активованого при терті металу киснем, елементами контртіла або мащення завдяки їхній дифузії в процесі тертя.

У цьому випадку, мабуть, буде спостерігатися переважно окиснювальне зношування сталевго зразка і переважно утомне зношування бронзового зразка.

Ідентичними виявилися в роботі зворотна трібосистема за матеріалами і зворотна трібосистема за геометрією. Інтенсивність зношування твердих і м'яких зразків в обох трібосистемах виявилися майже однакові (табл. 8.1). Як для зворотної трібосистеми за матеріалами, так і для зворотної трібосистеми за геометрією характерний ефект "різця", тобто процес проникнення твердого елемента з меншою площею тертя (рис. 8.9, *а*). У першому випадку рухомих є м'який зразок, а в другому – твердий, що схематично показано на рис. 8.9, *б*. Для цих трібосистем спостерігається груба шорсткість, що формується в процесі припрацювання, сам процес припрацювання стає розтягнутим у часі і не яскраво вираженим, у всіх випадках стійко спостерігається перенос бронзи на сталеві поверхні, мікротвердість сталевго поверхні майже не збільшувалася в порівнянні з вихідною.

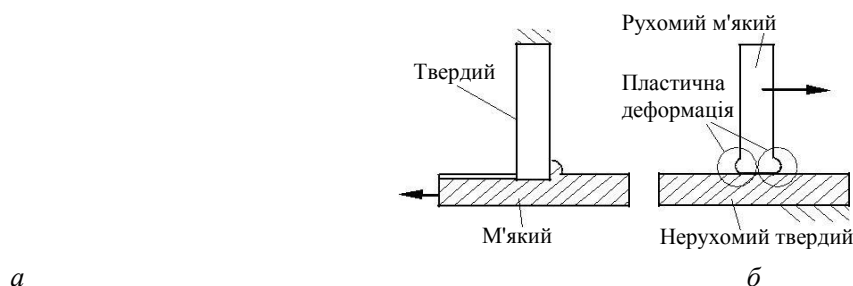


Рис. 8.9. Схеми взаємодії елементів трібосистеми:

а – для зворотної трібосистеми за матеріалами або для зворотної трібосистеми за геометрією; *б* – для зворотної трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно

Сумарна інтенсивність зношування збільшилася більше, ніж вдвічі порівняно з прямою трібосистемою, за рахунок одночасного збільшення

зносу твердих і м'яких елементів, однак у більшій мірі твердих, які в зворотних трібосистемах за матеріалами нерухомі, а в зворотних трібосистемах за геометрією рухомі (рис. 8.8).

Під час роботи цих трібосистем взаємодія поверхонь головним чином складається з адгезійної взаємодії і відповідного їй механізму зношування, що полягає в утворенні часток переносу бронзи на сталь, а потім утворення часток зносу. У цьому випадку будова деформованого тертям поверхневого шару бронзи має східчасту фрагментацію.

Максимальна сумарна інтенсивність зношування характерна для зворотної трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно, що більше ніж втричі порівняно з прямою трібосистемою (табл. 8.1). При цьому сильно зношується рухомий м'який елемент, який має меншу площу тертя. Велика інтенсивність зношування цього елемента пов'язана з великою пластичною деформацією. Елемент стає схожим на "грибок" (рис. 8.9, б). При передачі крутного моменту через м'який (податливий) елемент наслідок його пластичності відбувається більша деформація, ніж у прямій трібосистемі, де він нерухомий. Отже, бронзовий елемент може пластично деформуватися настільки, наскільки руйнування даного матеріалу за даних умов навантаження супроводжується пластичною деформацією. Будова поверхневого шару бронзи має монотонно зменшуватися з віддаленням від поверхні фрагментацію, оскільки швидкість зношування вища за швидкість утворення поверхневої "кірки" у результаті процесу пластичної плинності.

Характер зношування в даному випадку такий: зношування бронзи абразивне, зношування сталі переважно утомне.

Цікавим і одночасно складним є питання розподілу зносу між елементами трібосистеми.

Для наочності зобразимо результати у виді гістограми (рис. 8.10), з аналізу якої можна зробити такі висновки:

1. Гіпотеза про збільшення зносу на елементах з перемінним контактом, у порівнянні з елементами, що мають постійний контакт, не підтверджується, оскільки у прямій трібосистемі (ПТ) та зворотній за матеріалами і за геометрією одночасно (ЗТМ + ЗТГ) більший знос мають елементи з постійним контактом. Для зворотної трібосистеми за матеріалами (ЗТМ) та за геометрією (ЗТГ) ця гіпотеза справедлива.

Гіпотеза про збільшення зносу на елементах, що мають більшу поверхню тертя, у порівнянні з елементами, що мають меншу поверхню, не підтверджується, тому що на ПТ і ЗТМ + ЗТГ більший знос мають елементи з меншою площею тертя. Для ЗТМ і ЗТГ ця гіпотеза справедлива.

Гіпотеза про збільшення зносу на зразках, що обертаються, а отже, більш інтенсивно охолоджуються, не підтверджується, тому що на ПТ і ЗТГ рухомі елементи зношуються менше. Для ЗТМ і ЗТМ + ОТГ ця гіпотеза справедлива. Сюди можна додати і зв'язок величини зносу з величиною робочої температури елементів. У ПТ і ЗТМ + ЗТГ у більшій мірі зношуються елементи, що мають більш високу температуру, оскільки знаходяться увесь час у контакті, а в ЗТМ і ЗТГ елементи з більш високою

робочою температурою зношуються менше.

Цей аналіз свідчить про складність процесів, що протікають. Зараз можна констатувати лише той факт, що розподіл зносу між елементами трібосистеми залежить від розташування матеріалів. В усіх чотирьох конструктивних варіантах трібосистем більший знос завжди присутній у елемента трібосистеми, яка має меншу твердість (рис. 8.10).

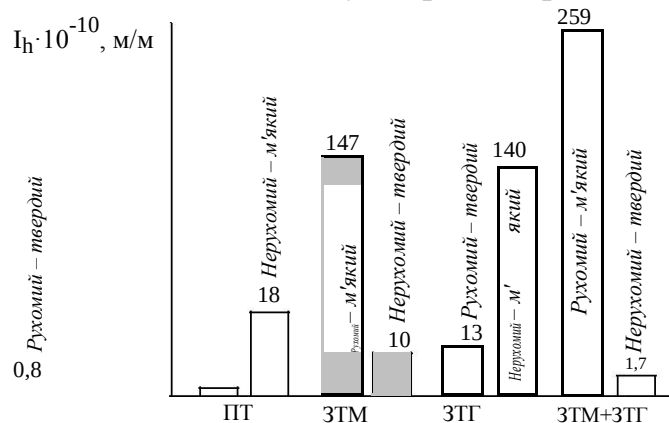


Рис. 8.10. Гістограма розподілення зносу між елементами трібосистеми: ПТ – прямі трібосистеми; ЗТМ – зворотні трібосистеми за матеріалами; ЗТГ – зворотні трібосистеми за геометрією; ЗТМ+ЗТГ – зворотні трібосистеми за матеріалами і за геометрією

Слід зазначити, що наведений аналіз розподілу зносу між елементами трібосистеми справедливий лише при терті в умовах граничного мащення, де в мастильному середовищі відсутні абразивні частки.

При наявності в мастильному середовищі абразивних часток характер розподілу зносу між елементами трібосистеми зміниться. Нерухомий м'який елемент за рахунок шаржування абразивними частками буде захищений від зносу, а зношуватися буде рухомий – твердий елемент трібосистеми. Отже в ПТ і ЗТГ більше буде зношуватися твердий рухомий елемент. В ЗТМ і ЗТМ + ЗТГ рухомих елементом виступає м'який матеріал. У такому випадку шаржування абразивних часток у м'який матеріал ускладнене. Абразивні частки будуть перекочуватися між поверхнями тертя, гострими краями дряпаючи і "проорюючи" їх. У цьому випадку знос елементів трібосистеми буде майже однаковим, однак у більшій мірі буде зношуватися м'який матеріал.

Коефіцієнт тертя для всіх чотирьох трібосистем можна вважати постійним (табл. 8.1), тобто незалежним від розташування матеріалів і площ тертя.

Визначення стійкості при заїданні прямих і зворотних трібосистем дає протилежні результати.

Під стійкістю при заїданні трібосистеми тертя розуміють її здатність виконувати задані функції при перевантаженнях без заїдання матеріалів.

Стійкість при заїданні можна характеризувати навантаженням задирання N_3 , при якій відбувається заїдання або схоплювання матеріалів.

Навантаження задирання залежить від режиму навантаження при випробуваннях. Численні дані про ці навантаження, які надані в довідниках з розрахунків деталей машин, неоднозначні і найчастіше суперечливі. При довільно призначеному режимі підвищення навантаження результати випробувань характеризують режим навантаження і мають порівняльну цінність тільки щодо заздалегідь обговореного режиму. Практично необмежена кількість таких режимів на практиці при застосуванні нестационарних методів випробувань різко знижує цінність таких результатів. Навантаження задирання визначають східчастим навантаженням, величина ступеня навантаження 200 Н, час роботи на кожній ступіні – 10 хв. Навантаженням задирання вважається таке навантаження, при якому поведінка моменту тертя стає хитливою і досягає величини 7 Н·м. При такій величині відбувається самовимикання машини тертя.

Отримані результати наведені в табл. 5.1. Як впливає з наведених результатів, максимальне навантаження задирання має зворотна трібосистема за матеріалами (5100 Н), що на 35% перевищує навантаження задирання прямої трібосистеми (3750 Н). Друге місце щодо стійкості при заїданні займає зворотна трібосистема за геометрією (4500 Н), що на 20% перевищує стійкість при заїданні прямої трібосистеми. І найгіршу стійкість при заїданні має зворотна трібосистема за матеріалами і за геометрією одночасно ($N_3 = 3400$ Н), що на 10% нижче, ніж у прямої трібосистеми.

З цього погляду найслабкішою ланкою, наприклад, в конструкції машин будуть зворотні трібосистеми за матеріалами і за геометрією одночасно. Ці трібосистеми мають найбільшу інтенсивність зношування і низку стійкості при заїданні. Щодо зворотних трібосистем за матеріалами або за геометрією, то, програючи прямій трібосистемі в зносостійкості в два і більше разів, такі трібосистеми володіють кращою стійкістю при заїданні, що на 20...35% вище, ніж у прямої.

Згідно з отриманими експериментальними даними можна зробити висновок, про те, що реалізація різних механізмів зношування на прямих і зворотних трібосистемах тертя визначається твердістю спряжених матеріалів, їх розташуванням і величиною діючих напруг, що можуть значно збільшуватися за рахунок способу передачі крутного моменту, при зміні відносності руху елементів трібосистеми. Слід зазначити, що при тому самому рівні навантаження і швидкості ковзання спостерігаються чотири види зношування, які відрізняються механізмом утворення і відділення часток зносу. Це абразивне, адгезійне, утомне і окиснювальне зношування.

Масштабний фактор трібосистеми. З точки зору зниження матеріалоємності доцільно виготовляти спряження, за розмірами, що близькі до межі забезпечення міцності, тобто з мінімальними геометричними розмірами. У більшості випадків на етапі проектування при виборі геометричних розмірів трібосистем виходять лише з умов забезпечення міцності спряження на основі емпіричних даних роботи прототипу або даних лабораторних, стендових випробувань.

Добра працездатність, високі параметри стійкості до заїдання характерні для трібосистем з мінімальними розмірами вала. Краща працездатність спостерігається у зразків з меншими геометричними розмірами. Вплив масштабного фактора на фрикційну теплостійкість при лінійному підвищенні тисків відзначається також розходження в поведінки "великих" і "малих" зразків і робиться висновок, що режими навантаження, які рекомендуються для великогабаритних спряжень з більшою площею тертя, неприйнятні для малогабаритних. При цьому більш сприятливі характеристики мають спряження з великими габаритами.

У зв'язку з цим, а також виходячи із завдань дослідження в даному розділі розглядаються закономірності зміни тріботехнічних характеристик "малих" і "великих" трібосистем для одержання загальної закономірності на вибір оптимальних геометричних розмірів трібоспрями, використання якої обумовить на етапі проектування вибір оптимального інженерного рішення і створення надійної та економічної конструкції.

Масштабний фактор елементів трібосистем буде значно впливати на процеси тертя і зношування.

В основу коефіцієнта форми трібосистеми K_f були покладені такі припущення:

1. Необхідно враховувати робочу площу тертя елемента, яка бере участь у роботі, "генеруючи" і розсіюючи тепло, A_a .

2. Варто враховувати об'єм елемента, що лежить під робочою площею, поглинає і розсіює теплову енергію V . Там, де лінійні розміри елемента більші за розміри робочої площі, необхідно враховувати ефективний об'єм.

3. Варто враховувати відношення площ тертя нерухомого A_{an} і рухомого A_{ap} елементів, тобто коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$. Важливість врахування $K_{\text{вз}}$ обумовлена, як уже відзначалося, тим, що зміна цього коефіцієнта призводить до зміни часу контактування тертьових поверхонь між собою і з активними компонентами середовища, що, у свою чергу, приводить до зміни швидкості і глибини фізико-хімічних процесів, що протікають.

Відношення площі, що "генерує" теплову енергію, до об'єму, що поглинає це тепло, для нерухомого A_{an}/V_n і рухомого A_{ap}/V_p елементів дасть уявлення про коефіцієнт форми для цих зразків відповідно.

Очевидно, що при нестационарних процесах за короткі проміжки часу не весь об'єм елементів устигає взяти безпосередню участь у контактній взаємодії. Мова йде "про деформацію і поширення теплоти в об'ємі матеріалу елементів трібосистеми. Процеси пластичного деформування матеріалу залежать від його конструктивного оформлення, яке характеризується параметром $S = A/V$, тобто відношенням загальної площі тіла до його об'єму. Відзначимо, що при статичних випробуваннях на розрив пластично деформується майже весь об'єм зразка, а в процесі тертя пластично деформується тільки та частина об'єму, що лежить під площею тертя. Відношення у вигляді комплексу A_a/V дає можливість врахувати просторовий (номінальна площа тертя A_a і об'єм V) розвиток конструктивного елемента.

Критеріальне оцінювання оптимальності конструктивного виконання трібосистеми. Коефіцієнт форми трібосистем. Виходячи з того, що в трібосистемі одночасно взаємодіють два елементи – рухомий і нерухомий, можна одержати наведений коефіцієнт форми трібосистеми за аналогією з приведеним радіусом кривизни при контакті двох тіл різного діаметра, 1/м:

$$K_{\phi, np} = \frac{\frac{A}{A_{an}} \cdot \frac{A_{ap}}{A_{ar}}}{\frac{V_H}{V_H} + \frac{V_P}{V_P}} \quad (8.6)$$

Помноживши $K_{\phi, np}$ на коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\phi z}$, одержимо коефіцієнт форми трібосистеми, 1/м:

$$K_{\phi} = K_{\phi, np} \cdot K_{\phi z} = \frac{A_{an}}{V_D + V_H} \cdot \frac{A_{ar}}{A_{ap}} \quad (8.7)$$

З аналізу формули випливає, що при збільшенні площі нерухомого елемента з одночасним зменшенням площі рухомого і об'ємів рухомого і нерухомого елементів K_{ϕ} наближається до максимуму. Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\phi z}$ прагне до одиниці. Така трібосистема графічно показана на рис. 8.11, а, трібосистема, у якій діаметр вала наближається до мінімуму.

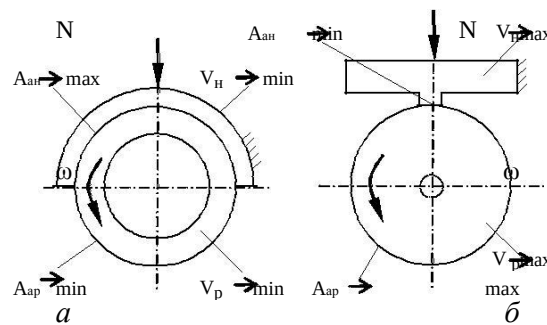


Рис. 8.11. Графічні зображення трібосистем з різними коефіцієнтом форми K_{ϕ} : а – K_{ϕ} прагне до максимуму; б – K_{ϕ} прагне до мінімуму

При зменшенні A_{an} , з одночасним збільшенням A_{ar} , V_P , V_H , K_{ϕ} наближається до мінімуму. Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\phi z}$ наближається до нуля. Така трібосистема графічно показана на рис. 5.11, б, трібосистема, у якої діаметр вала наближається до максимуму.

Вплив масштабного фактору на тріботехнічні характеристики трібосистем. Для оцінювання працездатності наведених трібосистем і виявлення глибини протікання процесів у поверхневих шарах здійснюють модельні випробування на трібосистемах з такими коефіцієнтами форми: для трібосистеми на рис. 5.11, а – $K_{\phi} = 26,8$ 1/м, діаметр рухомого диска $d = 23$ мм, ширина $l = 16$ мм, $K_{\phi z} = 0,5$; ескіз диска такої трібосистеми поданий на рис. 5.12, а; для трібосистеми на рис. 5.11, б – $K_{\phi} = 0,09$ 1/м,

діаметр диска $d = 120$ мм, $l = 25$ мм, $K_{\text{гз}} = 0,013$; ескіз диска наведений на рис. 8.12, б.

Для порівняння візьмемо стандартну трібосистему для машини СМТ-1 "диск – колодка", у якій $K_{\phi} = 4,9$ 1/м, $d = 50$ мм, $l = 12$ мм, $K_{\text{гз}} = 0,12$.

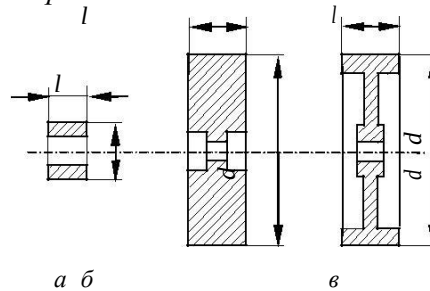


Рис. 8.12. Диски для лабораторних випробувань

Характер зміни перерахованих залежностей зображений на рис. 8.13 і 8.14, з яких випливає, що мінімальна сумарна інтенсивність зношування і мінімальний коефіцієнт тертя в трібосистемі з $K_{\phi} = 26,8$ 1/м і максимальна інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя в трібосистемі з мінімальним коефіцієнтом форми, $K_{\phi} = 0,09$ 1/м, причому інтенсивність зношування відрізняється на порядок, а коефіцієнт тертя – майже втричі.

При цьому для трібосистеми з великим коефіцієнтом форми характерна відносно низька мікротвердість поверхонь при більшій глибині наклепаного шару – у порівнянні з трібосистемою з меншим коефіцієнтом форми.

Наведені дані про мікротвердість поверхонь і глибину наклепаного шару свідчать про те, що трібосистема з великим K_{ϕ} працює в більш "м'яких" умовах тертя, ніж трібосистеми з меншим K_{ϕ} .

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 8.14, можна зробити висновок: при даному рівні навантажень і швидкості ковзання трібосистеми з великим K_{ϕ} мають монотонну структуру поверхневого шару, що змінюється, а трібосистеми з меншим K_{ϕ} – структуру, яка східчасто змінюється.

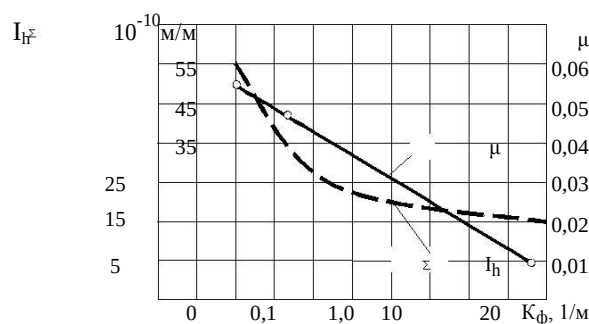


Рис. 8.13. Залежність сумарної інтенсивності зношування I_{Σ} від коефіцієнта форми K_{ϕ} трібосистеми

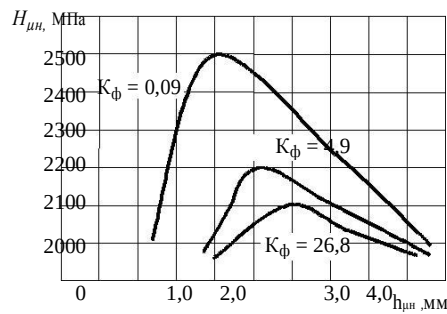


Рис. 8.14. Залежність мікротвердості поверхні тертя нерухомого елемента $H_{\mu н}$ від глибини наклепаного шару $h_{\mu н}$ для трібосистем з різними коефіцієнтами форми

Структура, що змінюється монотонно підповерхневого шару, формується в двох протилежних випадках: при незначних напругах, які призводять до окиснювального і одночасно утомного зношування, і при максимальних напругах, що призводять до абразивного зношування. При такому рівні навантаження і швидкості ковзання для трібосистеми тертя з $K_{\phi} = 26,8$ 1/м характерний перший випадок. Це можна підтвердити, по-перше, значенням мікротвердості бронзи, що дорівнює 2100 МПа (вихідне значення 1847 МПа), тобто бронза не вичерпала свого запасу пластичності. І по-друге, цей висновок підтверджується також значеннями робочих температур. У трібосистемі з $K_{\phi} = 26,8$ 1/м робоча температура перебувала в межах 80...85 °С, у той час як у трібосистемі з $K_{\phi} = 0,09$ 1/м вона знаходилася в області 100...110 °С. Однак у трібосистемі з великим коефіцієнтом форми спостерігається досить тривале припрацювання – 2...3 год, у той час як трібосистеми з малим K_{ϕ} припрацьовувалися протягом 15...25 хв.

Можна припустити, що зміни інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів є функцією коефіцієнта форми. Щоб підтвердити висунуте припущення, проводився експеримент, метою якого було визначення характеру зміни перерахованих залежностей на різних трібосистемах з тим самим коефіцієнтом форми $K_{\phi} = 4,9$ 1/м, але який має різний діаметр диска. Умови експерименту ідентичні описаними, тобто матеріали, їхня твердість, мастильне середовище, навантаження, швидкість ковзання відповідають описаному нами експерименту.

Проводиться три серії випробувань.

У першій серії випробувань діаметр диска $d = 50$ мм, $K_{\phi} = 4,9$ 1/м, $K_{\phi 3} = 0,12$.

В другій серії випробувань діаметр диска $d = 120$ мм, $K_{\phi} = 4,9$ 1/м,

$K_{\phi 3} = 0,12$. Площі тертя диска і колодки, а також їхні об'єми збільшені в шість разів відносно стандартної трібосистеми для машини тертя 2070 СМТ-1 (діаметр диска 50 мм). Оскільки при зміні лінійних розмірів елементів їхні площі змінюються в другому ступені, а об'єми – у третьому, диск діаметром 120 мм виконаний у вигляді маточини, при цьому була дотримана рівність

коефіцієнтів форми і коефіцієнтів взаємного перекриття. Ескіз диска зображений на рис. 8.12, в.

В цих трібосистемах інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, мікротвердість і глибина наклепаного шару в рухомих і нерухомих елементів однакові. Числові значення цих параметрів наведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 - Результати дослідження тріботехнічних характеристик трібосистем з різними діаметрами елементів при $K_\phi = 4,9 \text{ 1/м}$

Тріботехнічна характеристика і її одиниця	Схема випробувань		
	Диск – колодка		Кільце – кільце
	$K_\phi = 4,9 \text{ 1/м}$ $d = 50 \text{ мм}$	$K_\phi = 4,9 \text{ 1/м}$ $d = 50 \text{ мм}$	$K_\phi = 4,9 \text{ 1/м}$ $d = 28 \text{ мм}$
$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}, \text{ м/м}$	34	36,5	34,5
μ	0,027	0,021	0,025
$H_{\text{цн}}, \text{ МПа}$	3590	3530	3676
$h_{\text{цн}}, \text{ мкм}$	2,75	2,65	2,47
$H_{\text{цн}}, \text{ МПа}$	2080	2190	2373
$h_{\text{цн}}, \text{ мкм}$	2,6	2,59	2,75

У третій серії випробувань змінена схема їхнього проведення. Випробування проводилися за схемою "кільце – кільце". Елементи трібосистеми мають зовнішній діаметр 28 мм (відповідно до технічного опису для машини тертя УМТ-1). Коефіцієнт форми був досягнутий 4,91/м за рахунок зміни коефіцієнта взаємного перекриття, що склав 0,39. Результати випробувань наведені в табл. 5.2, з якої випливає, що при однаковому коефіцієнті форми, незалежно від діаметра елементів і схеми випробувань, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, мікротвердість поверхні тертя і глибина наклепаного шару ідентичні. Ці результати дозволяють зробити висновок, що коефіцієнт форми може служити для оцінювання зносостійкості трібосистеми у функції геометричних розмірів.

Як випливає з рис. 8.11, розподіл трібосистем на вищі і нижчі можна здійснювати не тільки за коефіцієнтом взаємного перекриття, але і за коефіцієнтом форми.

Можна вважати: якщо $K_\phi < 1$, то трібосистеми переходить від контактів по площі до контакту по лінії, тобто у вищу кінематичну трібосистему. Трібосистему з $K_\phi = 1$ можна вважати перехідною трібосистемою. Трібосистеми з $K_\phi > 1$ мають контакт по площі, тобто є нижчими трібосистемами.

На основі викладеного можна зробити висновок, що ці положення необхідно враховувати при проектуванні трібосистем машин. Варто прагнути до збільшення коефіцієнта форми трібосистеми. З аналізу формули K_ϕ випливає, що для цього необхідно або збільшити робочу площу нерухомого елемента трібосистеми (дотримуючи співвідношення $A_{\text{ан}}/A_{\text{ар}} = 0,5$), або зменшити об'єми обох елементів трібосистеми. Зменшення об'ємів

позначається позитивно на роботі трібосистеми, оскільки елементи великих розмірів при тих самих умовах тертя нагріваються до значно більш високих температур, ніж елементи малих розмірів.

8.2. Оптимізація конструктивного виконання трібосистеми

Запропонована методика розрахунку K_ϕ може служити експертною оцінкою працездатності спроектованих трібосистем, виявлення "вузьких місць" у конструкціях.

Корисно відзначити, що зворотні трібосистеми при наявності в них великих коефіцієнтів форми можуть виявитися більш зносостійкими, ніж прямі трібосистеми з низьким коефіцієнтом форми. Такий висновок графічно зображений на рис. 8.15, що складений за результатами лабораторних випробувань. Це можна побачити, аналізуючи наведені криві. Прямі трібосистеми з коефіцієнтом форми менш 0,11/м будуть мати більшу інтенсивність зношування, ніж ЗТГ або ЗТМ, що мають значення K_ϕ понад 5 1/м.

Як уже відзначалося, криві на рис. 8.15 побудовані за результатами лабораторних зразків, коефіцієнт форми в яких не перевищує 5 1/м. Однак у трібосистемах реальних машин K_ϕ знаходиться в межах 0,68...102 1/м. У зв'язку з цим при великих K_ϕ розглянута залежність не так явно виражена.

Виходячи з того, що в реальних конструкціях існують зворотні трібосистеми за геометрією, де площа тертя в нерухомого елемента більше, ніж у рухомого, необхідно внести зміну у формулу K_ϕ , яка отримана для прямих трібосистем. На зворотних трібосистемах за геометрією $K_{\phi z}$ буде перевищувати 1, що суперечить фізичному змісту цього коефіцієнта, наведеного на рис. 8.3.

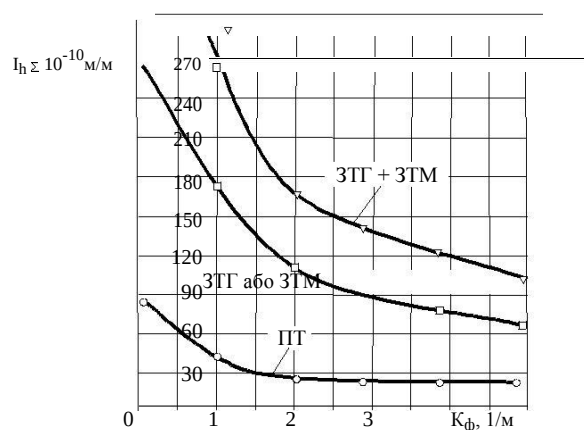


Рис. 8.15. Залежність сумарної інтенсивності зношування $I_{h\Sigma}$ від коефіцієнта форми K_ϕ для різних трібосистем:

ПТ – пряма трібосистема; ЗТГ або ЗТМ – зворотна трібосистема за геометрією або зворотна трібосистема за матеріалами; ЗТГ + ОТМ – зворотна трібосистема за геометрією і матеріалами одночасно

З урахуванням викладений розрахунок коефіцієнта форми здійснюють за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{A_{a \min}}{V_{Aa \max} + V_{Aa \min} \cdot \frac{A_{a \max}}{A_{a \min}}} \quad , \quad (8.8)$$

де $A_{a \min}$, $A_{a \max}$ – відповідно менша і більша робоча площа тертя одного з елементів;

$V_{Aa \max}$, $V_{Aa \min}$ – об'єм елемента, що містить відповідно більшу і меншу робочу площу тертя.

За допомогою коефіцієнта форми можна пояснити велику різницю в зносі за той самий час випробувань між лабораторними і натуральними (стендовими або експлуатаційними) випробуваннями.

Мається на увазі, що при випробуваннях трібосистем, виготовлених з тих самих матеріалів і в одному і тому ж мастильному середовищі, але які відрізняються лише геометричними розмірами. Лабораторні зразки на машинах тертя зношуються значно швидше, ніж натурні в реальних умовах експлуатації (зразки для лабораторних випробувань у кілька разів менші в порівнянні з натурними). Пояснюється це тим, що стандартні зразки для машин тертя мають значення $K_{\phi} = 0,05 \dots 15$ 1/м, а значення K_{ϕ} для реальних трібосистем знаходяться в межах 30...100 1/м.

Залежність, показана на рис. 5.13, дозволяє оцінити, у скільки разів знос лабораторних зразків буде більше зносу натурних трібосистем. А якщо в лабораторних випробуваннях використовуються зворотні трібосистеми, то різниця в зносі досить чітко ілюструється на рис. 8.15.

Відзначимо також, що нанесення будь-яких зносостійких покриттів на поверхні тертя елементів призводить до зменшення ефективного об'єму. При цьому за об'єм елемента, що лежить під площею тертя, необхідно приймати об'єм покриття. І чим менша товщина покриття, тим менший об'єм. У результаті коефіцієнт форми в таких трібосистемах буде набувати досить великих значень. Тому трібосистеми, що мають зносостійкі покриття, будуть дуже зносостійкими не тільки в зв'язку з матеріалами покриття, але і завдяки певному конструктивному оформленню трібосистеми.

У результаті детального вивчення впливу масштабного фактора на триботехнічні характеристики трібосистеми – як у лабораторних умовах, так і в реальних конструкціях – стало очевидним, що при проектуванні трібосистем необхідно обирати оптимальні співвідношення робочих площ і об'ємів рухомого і нерухомого елементів трібосистеми.

Висновки впливу масштабного фактора на знос трібосистеми такі:

1. При виборі співвідношення робочих площ тертя необхідно прагнути до

$K_{\phi} = 0,5$, тобто до нижчої кінематичної пари, де контакт здійснюється по площі. У цьому випадку сполучення матеріалів повинно бути "твердий + м'який", що забезпечує швидке припрацювання і стійкість до заїдання. Спряження матеріалів "твердий + твердий" застосовується лише на

вищих кінематичних парах. Зменшення або збільшення K_{63} від оптимального значення буде супроводжуватися збільшенням інтенсивності зношування.

2. Коефіцієнт форми трібосистем, до якого входять робочі площі і об'єми рухомого і нерухомого елементів, виявляється функцією інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і процесів, що відбуваються в поверхневих шарах. Чим вищий коефіцієнт форми, тим кращі тріботехнічні характеристики мають трібосистеми. Збільшувати коефіцієнт форми трібосистеми можна шляхом збільшення робочої площі тертя нерухомого елемента з одночасним зменшенням об'ємів елементів трібосистем.

3. За допомогою коефіцієнта форми можна поділяти трібосистеми на вищі і нижчі. При значеннях $K_f < 1$ трібосистема є вищою, при $K_f > 1$ – нижчою. Трібосистема з $K_f = 1$ є перехідною трібосистемою.

4. За допомогою коефіцієнта форми можна здійснювати експертне оцінювання спроектованих трібосистем і виявляти шляхи підвищення їхньої зносостійкості на етапі проектування.

8.3. Шляхи зменшення зовнішнього тертя в конструкціях трібосистем

Ця група методів реалізується на стадії проектування трібосистем. Вона включає вибір матеріалів для виготовлення елементів трібосистем, оптимізацію геометрії і раціональне спряження матеріалів тіл, захист зони тертя від потрапляння хімічно активних речовин, абразивних часток і інших видів забруднень, компенсацію макрогеометричних відхилень деталей, заміну зовнішнього тертя внутрішнім, застосування систем подачі мастильних речовин і регулювання температури і інші методи.

Вибір матеріалів. Застосування матеріалів для виготовлення елементів трібосистем є досить складним завданням, оскільки їх вибір повинен здійснюватися з урахуванням досить великої кількості факторів. До них відносять: рівень статичного і динамічного навантажень, швидкість відносного переміщення тертьових тіл, температура експлуатації, властивості мастильного матеріалу, вид тертя, конструкція трібосистеми. Матеріал повинен також задовольняти вимоги зносостійкості і коефіцієнта тертя, мати низьку вартість, добру припрацьовуваність і технологічність.

Найбільш важливою вимогою є раціональне спряження або урахування сумісності матеріалів тіл, що сполучаються. Іншими словами, повинна бути виключена можливість схоплювання поверхонь. Дотримуючись цієї умови, матеріали трібосистем необхідно підбирати так, щоб вони не утворювали при терті міцних адгезійних зв'язків, а руйнування цих зв'язків здійснювалося по границі розділу. Один з матеріалів повинен мати низький опір зрушенню, у контакті повинні мати місце переважно пружні деформації. Отже, нераціонально використовувати спряження однойменних матеріалів (мідь – мідь, бронза – бронза, мідь – бронза, титан – титан), а також трібосистеми, обидва елементи яких виконані з м'яких матеріалів (алюмінієвий сплав – мідь, мідний сплав – свинець тощо).

Спряження твердого матеріалу з м'яким забезпечує високу довговічність трібосистеми при низьких навантаженнях і температурі. У важконавантажених і низькошвидкісних трібосистемах ковзання і в опорах кочення доцільно спряження твердих матеріалів. У трібосистемах зі збідненим мащенням або при його відсутності добрий ефект є спряження твердих матеріалів з пористими, утримуючими мастильну рідину матеріалами і самомащувальними композитами.

Оптимізація макрогеометрії поверхонь тертя. Цей метод спрямований на досягнення якомога більш рівномірного розподілу напруг у зоні контакту, зниження фрикційного нагрівання і поділу поверхонь тертя шаром мастильного матеріалу. Останнім часом розвиваються напрямки, в основу яких покладений такий принцип. При виробництві поверхні тертя повинна задаватися така форма, яку вона має у період сталого тертя. Слід зазначити, що цей принцип не позбавлений недоліків, оскільки в міру зношування безупинно змінюються зазори, теплове навантаження, відбувається перерозподіл тисків і відповідно до цих факторів змінюється макрогеометрія тертьових тіл.

Тіла, що спряжуються, повинні мати форму, близьку до ідеальної. У протилежному випадку можлива локалізація напруг, утворення припиків і інтенсивний знос окремих ділянок контакту. Макрогеометричні відхилення тіл кочення сприяють виникненню вібрацій, росту динамічних навантажень і об'ємному утомному руйнуванню.

Одним з методів підвищення зносостійкості є вибір оптимальної хвилястості. При великому кроці S і висоті хвилі H_x тиск на контурних площадках контакту може досягати межі плинності і для незмазаних поверхонь можливе заїдання. При малих S і H_x , шорсткість не здатна виконувати роль кишень для мастильного матеріалу.

Розповсюдженим конструкційним прийомом підвищення зносостійкості є надання деталі такої форми, при якій у міру зносу одних ділянок поверхні тертя в контакт вступають сусідні, менш зношені. Такий прийом використовується в ущільненнях з еластичних матеріалів і підшипниках ковзання (розточення з восьми центрів), трібосистемах зі змінним навантаженням, а також у трібосистемах, що вимагають високої піддатливості одного з тіл. Як правило, конструкції, що реалізують цей прийом, виконують й іншу функцію. Вони компенсують знос тіл, що спряжуються, і макрогеометричні відхилення їхніх поверхонь тертя.

Компенсація макрогеометричних відхилень деталей. Компенсація зносу, макрогеометричних відхилень поверхонь тертя і биття елементів трібосистем досягається з допомогою застосуванням еластичних прокладок. Так, між внутрішнім і зовнішнім шарами підшипника ковзання розташовують шар з еластичного матеріалу. При цьому робочий (антифрикційний) шар може бути виконаний у вигляді сегментів. Еластичні прокладки встановлюють також між корпусом і зовнішнім кільцем підшипника кочення. В ущільнених елементах завдання підвищення зносостійкості вирішується за рахунок використання еластичних матеріалів і

надання поверхні тертя оптимальної форми.

Наведемо розповсюджені прийоми компенсації зносу елементів трібосистем. Це використання змінних елементів конструкції (твердосплавні зуби гірничодобувних машин, струмознімачі електродвигунів); деталей, що плавають, (поршневі пальці, втулки, шайби); конструкцій з регульованим зазором (конструкції, що реалізують тертя вертіння).

Досягнення високої точності установлення деталей трібосистем.

Підвищення довговічності трібосистем неможливо без зменшення або виключення додаткових напруг, що виникають у тертьових тілах внаслідок невідповідності взаємного розташування поверхонь тертя і площини дії дотичних сил. Виникають додаткові напруги при низькій точності установлення рухомих зчленувань, наприклад, при неспіввісності веденого і ведучого валів, вала і підшипника, розташуванні площини ковзання напрямних під кутом до дотичного навантаження або поверхні, що спряжуються, тощо. Для вирішення цього завдання застосовують трьохточкове установлення на амортизаторах або балансірне підвішування джерела руху, розчленовування вала на опорні секції і їх з'єднання за допомогою компенсаційних муфт, пружні прокладки, що самовстановлюються, опори або осі. В опорних підшипниках самоустановлення досягається за рахунок виконання опорної поверхні вкладиша сферичних або застосування пружних опор.

Заміна зовнішнього тертя внутрішнім. При малих лінійних або кутових переміщеннях тертьових тіл застосовується принцип заміни зовнішнього тертя внутрішнім. Для реалізації цього принципу між двома тілами, що рухаються, відносно один одного розміщають еластичний елемент, жорстко закріплений з їх поверхнями. При переміщенні тіл еластичний елемент зазнає циклічних знакозмінних деформацій, амплітуда і асиметрія циклу з яких визначають його довговічність. Переваги таких конструкцій полягають в забезпеченні можливості їхнього застосування при впливі ударних навантажень і вібрацій в середовищах з абразивом. Вони не вимагають високої точності виготовлення і встановлення рухомих зчленувань, застосування мастильних речовин і пристроїв, що ущільнюють.

Раціональний вибір виду тертя. Не завжди перехід від ковзання до кочення тертьових тіл приводить до позитивного результату, хоча сила тертя в першому випадку на 1...2 порядки вище, ніж у другому. Застосування опор кочення найбільш виправдане у трібосистемах, що експлуатуються при малих і середніх навантаженнях і швидкостях, відсутності хімічно активних речовин, вібрацій і ударних навантажень. Крім того, їх застосування вимагає подачі мастильного матеріалу в зону тертя, високої точності виготовлення і монтажу деталей рухомих зчленувань. Нераціональним їх застосування при реверсивному русі тіл з малими кутами повороту. У цьому випадку на доріжках кочення утворюються поглиблення, що нагадують відбитки кульки при оцінюванні твердості за Бринелем. Це явище (бринелювання) призводить до швидкого руйнування опор кочення.

Застосування опор ковзання можливе в широкому інтервалі навантажень і швидкостей, у трібосистемах працюючих без мастильного матеріалу. Вони менш чутливі до вібрацій, ударних навантажень та впливів абразивів і хімічно активних середовищ. Ці переваги досягаються головним чином за рахунок того, що на відміну від опор кочення вони можуть бути виготовлені зі значно більш широкого класу матеріалів.

До основних недоліків опор ковзання відносяться високі коефіцієнти тертя й інтенсивність зношування, знос поверхні, що спряжується, залежність тріботехнічних характеристик від температури.

Істотним недоліком опор кочення є великі габаритні розміри. Це призвело, наприклад, до розробки голчастих підшипників кочення.

Усунення цього та ряду інших недоліків обох типів опор досягається розроблюваним в останні роки методом, сутність якого полягає у тому, що у мастильний матеріал для опор ковзання вводять дрібнодисперсні частки (розміром до 1 мкм) твердих матеріалів. Це ультраалмази, оксиди, борида і карбіди металів. Завдяки близькій до сферичної форми і високій твердості частки, потрапляючи в зону тертя, виконують роль тіл кочення. Це сприяє зниженню коефіцієнта тертя і інтенсивності зношування тіл, що спряжуються.

Зниження теплового навантаження контакту. Тепловиділення на фрикційному контакті є причиною інтенсивного зношування тертьових тіл в наслідок зміни умов тертя, структури і властивостей поверхневих шарів. Наявність температурних градієнтів по дотичній і нормалі до поверхні тертя приводить до виникнення високих температурних напруг, зміни зазорів і рельєфу поверхні тертя. У результаті можливе схоплювання поверхонь, заїдання і заклинювання рухомого спряження. Заходи боротьби з цим явищем включають: розрахунок зазорів з урахуванням величини температурних деформацій елементів трібосистеми; вибір матеріалів із близьким значенням коефіцієнтів теплового розширення; застосування схем контактування з оптимальним коефіцієнтом взаємного перекриття поверхонь тертя; реалізацію засобів теплозахисту і тепловідведення.