

Самостійна робота за темою 5

Тема: Фізико-хімічні властивості поверхонь тертя

(Самостійно опрацювати матеріал за темою 5 згідно плану)

5.1. Механохімічне зношування.

5.2. Утомне зношування.

5.3. Адгезійне зношування.

5.1. Механохімічне зношування

До такого різновиду зношування відносять окиснювальне, фретинг-корозійне і водневе зношування.

Окиснювальне зношування пов'язане з активацією окисних процесів поверхневих шарів тертьових поверхонь за рахунок пластичної деформації, підвищеної температури, дії циклічних навантажень і наявності кисню в мастилі і навколишньому середовищі.

При окиснювальному зношуванні спочатку, коли плівки окислів тонкі (порядку часток мікрометра) і еластичні, вони відіграють позитивну роль і захищають поверхні від ушкоджень. Але в міру росту плівки стають товстими, крихкими і руйнуються при навантаженнях, які спочатку легко переносилися. Продукти зносу виносяться з мастильного матеріалу. Тим часом окисний процес продовжується, плівки знову нарастають і захищають від зносу основний матеріал. Таким чином, окиснювальне зношування – це процес, при якому руйнується не матеріал деталі, що зношується, а його вторинні структури – оксиди, що утворилися в процесі тертя.

Окиснювальне зношування є окремим випадком механохімічного. Протікає воно в умовах, коли метал вступає в хімічну реакцію з окислювачами навколишнього середовища або мастильного матеріалу. Окиснювальне зношування відбувається, коли швидкість утворення плівок оксидів більша або дорівнює швидкості їхнього руйнування. У протилежному випадку можливе протікання інших видів зношування, наприклад, адгезійного.

Окиснювальне зношування зазнають підшипники кочення, шарнірно-болтові з'єднання, металеві колеса фрикційних передач, поршневі пальці двигунів, деталі гідравлічних насосів і двигунів внутрішнього згорання.

Процес окиснювального зношування умовно можна розділити на три етапи.

1. У результаті пластичного деформування при терті поверхневий шар насичується дислокаціями і вакансіями. Це забезпечує високу активність поверхневого шару і здатність взаємодіяти з киснем.

2. Утворення вторинних структур. Відбувається в результаті взаємодії активних центрів поверхневого шару металу з киснем і прояви оксидної плівки (рис. 5.1, а).

3. Руйнування оксидних плівок обумовлене їх багаторазовим

деформуванням при терті, наявністю внутрішніх напружень і великою щільністю дефектів структури (пор, дислокацій, вакансій, мікротріщин). Внаслідок відмінності постійних кристалічних решіток оксидний шар зазнає стискаючих напружень, а метал – тих, що розтягують. На поверхні розділу виникають дотичні напруження. При фрикційному навантаженні оксидна плівка відокремлюється від металу по межі розподілу на окремих ділянках завдяки появі і збільшенню підповерхневих мікротріщин, розташованих паралельно поверхні тертя (рис. 5.1, б).

Низький опір оксидних плівок розтягуванню, наявність дефектів структури і внутрішніх напружень в плівці сприяють утворенню і розвитку поверхневих мікротріщин. Зі збільшенням кількості циклів навантаження сітка мікротріщин стає більш щільною. Відбувається злиття, поверхневих і підповерхневих тріщин (рис. 5.1, б), викришування її ділянок і видалення їх із зони тертя (рис. 5.1, г). На новоутвореній оголеній поверхні металу знову з'являється оксидна плівка.

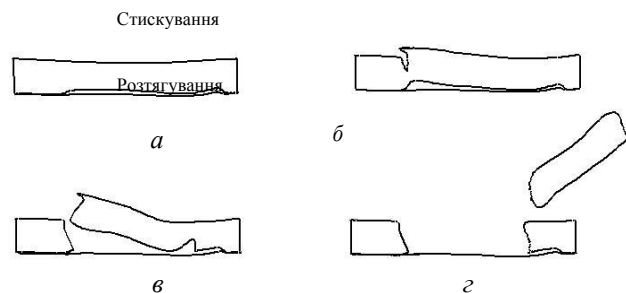


Рис. 5.1. Кінетика утворення часток зносу при окисному зношуванні

При високій міцності з'єднання оксидної плівки з металом можливе поширення тріщин і в об'ємі металу. У результаті частки зносу містять вихідний метал і його оксиди.

Інтенсивність окиснювального зношування I_m металів залежить від швидкості утворення оксидних плівок і швидкості їхнього руйнування.

Про існування кореляції між інтенсивністю зношування і процесом окиснювання свідчать результати вивчення впливу нормального навантаження на I_m і з'ясування вмісту в продуктах зносу оксидів заліза Fe_2O_3 і FeO , які оберігають чистий метал від ушкодження. Максимальній інтенсивності зношування відповідає мінімальний вміст в частках зносу Fe_2O_3 і максимальний – чистого металу. Це свідчить про істотний вплив на I_m адгезійного зношування, що має місце на ділянках контакту, слабо захищених оксидами. Мінімальна інтенсивність зношування спостерігається в тому випадку, коли товщина плівки Fe_2O_3 достатня для захисту основного металу від захоплення.

Швидкість ковзання впливає на інтенсивність зношування через співвідношення швидкості утворення оксидної плівки (керованою температурою в зоні тертя) і швидкості її руйнування. У залежності від цього

співвідношення на контакті може мати місце як окиснювальне, так і адгезійне зношування.

Інтенсивність окиснювального зношування залежить від когезійної міцності оксидних плівок і адгезійної міцності їхнього зчеплення з металом. Так, при терті сурми і кадмію утворюються оксиди з досить низкою когезійною і адгезійною міцністю. Вони легко руйнуються і видаляються з зони тертя. Це призводить до підвищення інтенсивності зношування названих металів при збільшенні вмісту кисню в середовищі.

Оскільки температура на плямах фактичного контакту може досягати температури плавлення одного з тертьових тіл, визначаючи при цьому швидкість протікання хімічних реакцій, важливо простежити її вплив на корозійно-механічне зношування металів. Експериментальні дані про вплив температури на об'ємний знос циліндра з інструментальної сталі, що третється по диску з того ж металу, зображені на рис. 5.2. При терті в дихлордифторметані при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ швидкість корозійних процесів незначна. В цьому випадку інтенсивність зношування є інтегральною характеристикою одночасно протікаючих процесів корозійного і адгезійного зношування.

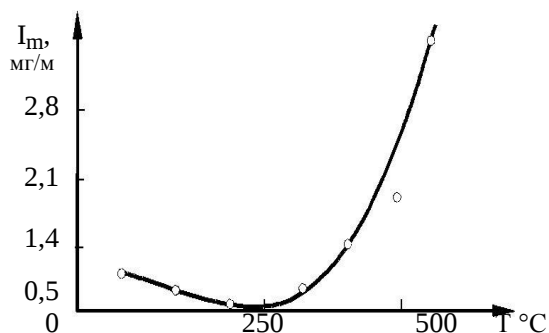


Рис. 5.2. Вплив температури на інтенсивність зношування інструментальної сталі в середовищі дихлордифторметана ($N = 12\text{ Н}$)

Зі збільшенням температури до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ внесок адгезійного зношування зменшується за рахунок утворення тонкого модифікованого шару в результаті корозії, а вплив механічного зношування росте. У результаті I_m практично не залежить від температури. При $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ хімічна активність середовища різко зростає в результаті розкладання дихлордифторметана і виділення хлору, який вступає в реакцію з металом. При $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ швидкість взаємодії хлору з металом стає настільки великою, що відбувається катастрофічне механохімічне зношування металу.

Наведені дані про вплив різних факторів механохімічного зношування металів показують, що корозія в трибоспряженнях може відігравати двоїсту роль. При оптимальній швидкості протікання корозійних процесів у зоні контакту на поверхнях тертя спряжених тіл утвориться модифікований шар і їхня зносостійкість підвищується. У випадку перевищення оптимуму на поверхнях тертя утворюються товсті шари продуктів хімічної взаємодії, які легко руйнуються. Це забезпечує високу інтенсивність зношування тертьових тіл аж до переходу до катастрофічного зносу.

Фретинг-корозійне зношування. Фретинг-корозія – це процес руйнування поверхонь тертя при малих циклічних переміщеннях спряжених тіл, що

спряжуються супроводжується зміною лінійних розмірів цих тіл.

Цей процес виявляється як сильно виражений процес окиснювання і захоплення матеріалів тертьових тіл, що локалізується на невеликих ділянках контакту і супроводжується їх утомним і абразивним зношуванням. Цей вид зношування спостерігається в болтових, заклепувальних, штифтових і шпонкових спряженнях, парах вал – маточина, на посадкових поверхнях деталей, у шарнірах, ресорах, регуляторах електричних контактів, кулачкових механізмах, сталевих канатах.

Необхідною умовою появи фретинг-корозії є проковзування поверхонь контактуючих тіл, починаючи з величин, на порядок перевищуючих міжатомну відстань. Максимальний зсув тертьових тіл, що здійснює коливання не повинен перевищувати розмір плями контакту. Завдяки цьому частки зносу не можуть вийти за межі контактної площадки і забезпечують виникнення високих тисків на локальних ділянках.

Кінетика зношування при фретинг-корозії полягає в такому. Спочатку відбувається динамічне навантаження матеріалу контактуючих нерівностей і видалення адсорбційних і оксидних плівок на плямах контакту. При багаторазовому навантаженні матеріал вершин деяких контактуючих нерівностей пластично деформується. Це призводить до збільшення концентрації дефектів і підвищенню фізико-хімічної активності матеріалу на плямах контакту.

Подальше навантаження супроводжується, з одного боку, зростанням інтенсивності локального окиснювання матеріалу, а з іншого боку – утворенням містків зварювання досить малих розмірів. Зсув тертьових тіл викликає руйнування цих містків і відрив мікроскопічних часток металу з поверхні одного з тертьових тіл.

В зонах адгезійного відриву часток утворюються каверни малих розмірів. Поверхня каверни окислюється, а в її об'ємі накопичуються частки, видалення яких при малих переміщеннях практично неможливе, але відбувається інтенсивне окиснювання цих часток. Продукти окислювання, заповнюючи об'єм каверни, і викликають абразивне зношування її поверхні. З часом окиснювання поступово захоплює нові зони, відбувається їх розширення завдяки абразивній дії продуктів окислювання і руйнування оксидних плівок на сусідніх ділянках і захоплення. Частки оксидів, які знаходяться в кавернах займають більший об'єм, ніж метал, де вони утворилися. Це призводить до підвищення тиску і температури на локальних ділянках, утворення поверхневих і підповерхневих утомних тріщин, їхнього розвитку і відколювання малих об'ємів металу. Можливе злиття двох каверн в одну, де цей процес продовжується.

Поверхня тертя деталей, які піддаються фретинг-корозійному зношуванню, покривається поглибленнями і нагадує за характером руйнування поверхні після корозійного зношування. Ушкодження концентруються на окремих ділянках, що відповідають вершинам хвиль.

На інтенсивність зношування при фретинг-корозії впливає ряд факторів, зв'язаних з умовами навантаження пари тертя. Встановлено, що збільшення амплітуди коливання спряжених тіл викликає зростання інтенсивності

зношування, причому ця залежність близька до лінійної. При малих амплітудах (менше 0,15 мм) частки зносу можуть виконувати роль тіл котіння і охороняють тіла, що спряжується, від інтенсивного зношування. При великих амплітудах переміщення збільшується імовірність руйнування оксидних плівок і утворення містків зварювання, що супроводжує підвищенням інтенсивності зношування. При подальшому збільшенні амплітуди коливань інтенсивність зношування може також знижуватися. Це можливо внаслідок того, що забезпечуються умови для виходу оксидних часток з каверн.

Підвищенню інтенсивності зношування при фретинг-корозії сприяє також збільшення контактного тиску, що викликає перехід від утомного корозійного зношування до схоплювання. Значною мірою цьому сприяє інтенсифікація фрикційного нагрівання і зростання температури на плямах контакту.

Водневе зношування – це процес насичення воднем підповерхневих шарів металу при терті, з утворенням численних мікротріщин і диспергуванням металу в зоні інтенсивної деформації. При перенасиченні металу воднем можливе його зношування внаслідок в'язкої плинності поверхневого шару.

Цьому виду зношування піддаються сталеві і чавунні деталі при терті об матеріал, якими містить водень або у середовищі, насиченому воднем. Такими матеріалами можуть служити композитні на основі полімерів, а середовищем – мастильні матеріали, розкладання яких супроводжується виділенням водню.

Кінетика водневого зношування включає кілька етапів. В результаті термо- або механодеструкції мастила або матеріалу спряженого з металом, відбувається інтенсивне виділення водню в зону тертя. На плямах фактичного контакту постійно протікають трібохімічні реакції, які є джерелом безперервного постачання водню до поверхні тертя металу.

Другим етапом є дифузія атомарного водню в поверхневий шар металу. Вважається, що дифузія водню всередину металу обумовлена наявністю немонотонного розподілу температури і напруг по нормалі до поверхні тертя. При важких режимах навантаження максимально напружена точка знаходиться не на поверхні тертя, а в підповерхневому шарі. В околі цієї точки матеріал зазнає переважно пластичних деформацій, які є джерелом тепла. Отже, джерело тепла розташовується на деякій відстані від поверхні тертя. Рішення для таких умов нестационарної задачі теплопровідності показало, що розподіл температури по глибині третьового тіла графічно зображується кривою з максимумом у точці, розташованій під поверхнею тертя. У шарі, товщина якого менш ніж відстань від поверхні тертя до максимально напруженої точки, температура і напруги зростають із збільшенням глибини. Це і забезпечує зростання температури і дифузії водню в об'єм поверхневого шару металу при терті. Установлено, що розподіл концентрації водню і температури по глибині

близькі за формою кривих. Глибина зони максимальної концентрації водню залежить від режимів навантаження, механічних і теплофізичних характеристик матеріалів тіл, що спряжуються.

5.2. Утомне зношування

До утомного зношування відносять випадки, коли при роботі трібосистем відсутні аномальні ушкодження (схоплювання, задир, мікрорізання, припікання поверхонь тощо), тертя протікає в нормальних умовах, з мастильним матеріалом, але, проте, внаслідок тертя матеріал поверхневого шару "утомлюється" і починає відокремлюватися у вигляді часток зносу. Тут можна провести аналогію з поняттям "утомна міцність".

Розрізняють утомне зношування двох видів: багатоциклічне і малоциклічне. Багатоциклічне зношування виникає при пружному контактуванні. Багаторазовий вплив на мікровиступ призводить до поступового нагромадження мікродефектів, утворення мікротріщин, при злитті яких утворюються поверхневі макротріщини, які викликають руйнування матеріалу і відділення часток зносу. При малоциклічному зношуванні спільна дія нормального і дотичного навантажень при терті призводить до того, що максимальне дотичне напруження виникає не на поверхні, а під плямою контакту на невеликій глибині, де накопичуються ушкодження і утворюються тріщини. У крихкого матеріалу тріщина виникає на поверхні. Малоциклічне зношування спостерігається при пластичному деформуванні поверхонь (без різання) більш м'якого матеріалу виступами більш твердого. У місцях такого деформування нерідко утворюються бічні навали, які при наступних проходах теж можуть відокремлюватися у вигляді продуктів зносу.

Особливим проявом багатоциклічного зношування є так званий пітинг (англ. Pit – поглиблення), що виникає на доріжках кочення підшипників при пульсації навантаження.

Пітинг виникає в результаті багаторазового деформування поверхонь, що навантажуються, тілами кочення. Виразки пітинга часто називають викришуванням. Крім підшипників і напрямних кочення, такий знос характерний для зубів шестерень, шліцьових спряжень і ряду інших контактних пар.

Кількісна оцінка контактної утоми виражається в кількості циклів навантаження або в годинах роботи до виникнення утомних руйнувань поверхонь. Поява утомного зношування – викришування – призводить до посилення вібраційно-акустичної активності механізмів, підвищення рівня шуму, збільшення концентрації навантаження, контактних напруг, зменшенню розміру площі несучої поверхні третьових поверхонь, виникнення інтенсивного зносу і заїдання. Умови виникнення і кінетика розвитку утомного зношування залежать від напруженого і деформованого

стану поверхневих і приповерхневих шарів матеріалу, фізико-механічних властивостей матеріалу, фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів і навколишнього середовища, товщини мастильного шару, кінематики контакту, форми і розмірів дотичних деталей. Пружне контактне макродеформування матеріалів супроводжується появою мікропластичних деформацій у мікрооб'ємах.

Виникненню мікротріщин при циклічних контактних впливах сприяє вплив концентраторів напруг. До поверхневих концентраторів напруг належать

дефекти у вигляді подряпин, вм'ятин, рисок, припиків тощо. До підповерхневих концентраторів напружень належать неметалічні включення, мікропори, раковини, карбідні та ін. Великий вплив має значення максимальних дотичних напружень. Первинна тріщина частіше виникає на поверхні контакту, але може зароджуватись і у приповерхніх шарах матеріалу.

Зі збільшенням товщини мастильного шару зменшуються кількість взаємодіючих мікронерівностей, тривалість і величина деформування, відвертається металевий контакт. Умовами появи викришування, пов'язаного з пластичними деформаціями, можна пояснити позитивний вплив підвищених значень меж пружності, плинності, в'язкості матеріалу, твердості несучої області матеріалу, а також провідне значення дислокаційних процесів – утворення порожнеч, злиття дислокацій уздовж площин ковзання або спайності.

Рівняння І.В. Крагельського для швидкості зношування при фрикційній утомі має такий вигляд:

$$I_h = \sqrt{\frac{h}{R} \frac{p_a}{p_r} \frac{k \alpha_1^*}{n}} \quad (5.1)$$

де h/R – відносна глибина проникнення (h – глибина проникнення одиничної нерівності; R – радіус нерівності);

p_a і p_r – відповідно номінальний і фактичний тиски;

k_1 – коефіцієнт, що залежить від розташування нерівностей по висоті; α^* – відношення номінальної площі до площі тертя;

n – кількість циклів, що витримує деформований об'єм до руйнування. При ковзанні тіл процес нагромадження ушкоджень має певну

стадійність. Спочатку відбувається нагромадження пружних спотворень решітки і збільшується щільність дислокацій. Після досягнення критичної щільності дислокацій виникають субмікроскопічні тріщини. Разом з необоротними спотвореннями кристалічних решіток порушуються міжатомні зв'язки і руйнуються окремі мікрооб'єми.

Теорія зносу відшаровуванням, розроблена Н. Су, виходить з таких концепцій. Тангенціальне зусилля, котре діє в поверхневих шарах, призводить до підповерхневої пластичної деформації, яка накопичується при багаторазових проходженнях нерівностей. При цьому утворюються тріщини і порожнечі в підповерхневих шарах металу, відбувається їх збільшення і злиття. Процес відшаровування розглядається як кумулятивний. Під дією

кожної нерівності відбувається певний зсув матеріалу. Пелюстки зносу виникають після проходження досить великої кількості нерівностей.

5.3. Адгезійне зношування

Адгезійне зношування – це явище утворення міцних сполук у зонах фактичного контакту тертьових тіл, глибинного виривання матеріалу одного тіла і переносу на поверхню тертя іншого, яке супроводжується зміною їхніх лінійних розмірів.

Адгезійне зношування спостерігається в зубчастих і зубчасто-гвинтових

передачах; тяжко навантажених підшипниках ковзання; підшипниках кочення; парах тертя плунжер – втулка, циліндр – поршневе кільце, напрямні металорізальних верстатів – супорт; у трібосистемах, які експлуатуються у вакуумі або інертному середовищі; в сполученнях, що експлуатуються при високій температурі (ролики прохідних печей, прокатних верстатів, деталі гальмових пристроїв).

Механохімічний процес є результатом руйнування адгезійних зв'язків, що виникають між третьюми тілами на ювенільних (очищених від плівок оксидів, мастильних матеріалів, забруднень) ділянках поверхонь. Тому для реалізації цього виду зношування необхідно в першу чергу видалити плівки з поверхні контактуючих нерівностей. При терті цей процес відбувається завдяки тепловому і механічному впливам.

Наступним етапом механохімічної (адгезійної) взаємодії є утворення міцних адгезійних зв'язків (містків зварювання) між третьюми тілами. Необхідною умовою його реалізації є зближення ювенільних ділянок поверхонь, що спряжуються, на відстань дії міжатомних сил. При цьому матеріал нерівностей, що утворює містки зварювання, повинен пластично деформуватися. У протилежному випадку після зняття навантаження пружна енергія деформації може виявитися достатньою для руйнування адгезійного зв'язку. Отже, напруги на плямі контакту повинні перевищувати твердість матеріалу.

Заключний етап процесу механохімічної взаємодії – руйнування містків зварювання – визначається співвідношенням їх адгезійної і когезійної міцностей. Ф.П. Боуден розрізняє чотири види руйнування:

- міцність зв'язку на межі розподілу менша за міцність обох матеріалів пари тертя. У цьому випадку руйнування відбувається переважно по границі розділу, і кількість матеріалу, що видаляється з обох поверхонь (інтенсивність зношування), буде незначною;

- спряження на межі розподілу міцніше одного з третювих тіл. Зріз буде відбуватися по менш міцному матеріалу. Частки цього матеріалу будуть налипати на більш тверду поверхню, утворюючи плівку на його поверхні. У результаті реалізується тертя однойменних матеріалів;

- адгезійне спряження міцніше за матеріал обох третювих тіл. Руйнування відбувається в основному об'ємі більш м'якого матеріалу, але

можливе також руйнування і спряженого з ним тіла. Інтенсивність зношування твердого тіла значно нижче м'якого;

- міцність адгезійного спряження і когезійної міцності третювих тіл однакова (тертя однойменних матеріалів). Ця рівність, як правило, порушується внаслідок наклепу, і міцність спряження стає вище міцності металу. Зріз відбувається по об'єму контактуючих нерівностей, що призводить до інтенсивного зношування обох тіл;

Тип руйнування адгезійних зв'язків визначає вид зношеної поверхні, розмір часток зносу та їхню форму, а також інтенсивність зношування. Можливі такі види руйнування адгезійних зв'язків:

1. Вириг матеріалу у вигляді мікрочастинок. У цьому випадку на поверхні тертя утворюються кратероподібні поглиблення. Частки зносу мають неправильну форму, а їх маса досягає 10^{-10} г. Інтенсивність зношування мала, а

катастрофічне руйнування поверхонь тертя не досягається. Цей вид руйнування спостерігається переважно за умови, коли адгезійна міцність на межі розподілу нижча за когезійну міцність матеріалів контактуючих тіл.

2. Утворення тонкої плівки більш м'якого матеріалу на поверхні тіла, що сполучається з ним. Типовий випадок такого переносу спостерігається при терті міді по сталі. Після утворення плівки реалізується тертя міді по міді. При цьому можливо підвищення коефіцієнта тертя, досягнення високої інтенсивності зношування і перехід до катастрофічного зносу. Частки зносу можуть приймати форму тонких пластин. На поверхні, яка зношується, з'являються борозни, витягнуті в напрямку ковзання. Цей вид руйнування має місце за умови, коли адгезійна міцність вище когезійної одного з елементів пари тертя.

3. Якщо міцність адгезійного зв'язку вища когезійну міцності обох спряжених тіл, то зношуванню піддається в основному менш міцний елемент пари тертя. Однак після багаторазового навантаження можливе локальне руйнування, відділення і перенос часток більш твердого матеріалу (контртіла) на поверхню, що сполучається. На поверхні контртіла утворюються смуги ковзання, що є результатом дряпання наклепаними частками, закріпленими в поверхневому шарі м'якого матеріалу.

4. Глибинне виривання значних об'ємів матеріалу з утворенням на поверхнях тертя глибоких борозен і великих наростів – задирок. При цьому можливе оплавлення поверхонь тертя, катастрофічний знос і заклинювання деталей. Цей вид зношування, названий заїданням, іноді супроводжується загальним зварюванням поверхонь тертя і зупинкою елементів трібосистеми.

Механохімічна взаємодія полімерних і металополімерних пар тертя принципово не відрізняється від описаної. Вона обумовлена взаємодією активних продуктів деструкції молекулярних ланцюгів полімерів і ювенільних ділянок поверхні металу. Міцність утворених зв'язків може перевищувати міцність зв'язків між окремими елементами надмолекулярних утворень або молекулами. В цьому випадку руйнування (зріз) містків зварювання відбувається по об'єму полімеру. Особливість зношування

полімерів полягає в тому, що більш важливу роль у виникненні ступені його прояву відіграє хімічна активність полімеру стосовно контртіла.

Інтенсивність механохімічної (адгезійної) взаємодії збільшується зі зростанням навантаження, швидкості ковзання і температури в зоні тертя, підвищенням хімічної активності матеріалів тертьових тіл, зниженням твердості одного з них і швидкості відновлення захисних плівок на поверхнях тертя.