функція $U(t)$ буде мати нелінійний вид і буде описувати інтенсифікацію або затухання процесу пошкодження матеріалу.

Наприклад, збільшення зносу спряження призводить до росту зазорів і відповідно динамічних навантажень, що інтенсифікують процес. В цьому випадку перебіг процесу пов'язаний не тільки із зовнішніми факторами, але і з ступенем пошкодження. Ця умова може бути записана так $\frac{dU}{dt} = f(U)$.

В окремих випадках, коли на швидкість процесу одночасно діє ряд рівноцінних факторів, що змінюються в часі, залежність $\gamma(t)$ може мати екстремум (максимум або мінімум), що характерно для деяких видів корозії, процесів короблення. В цьому випадку функція $U(t)$ має точку перегину. При досягненні максимуму і подальшому падінні γ до нуля процес пошкодження припиняється. Така залежність характерна для перерозподілу внутрішніх напружень і деформацій у відливках в процесі їх експлуатації. Після певного періоду, який триває декілька років, процес короблення припиняється.

Існує категорія процесів, для яких спочатку відбувається накопичення певних внутрішніх напружень, а потім, з деяким запізненням, відбувається реалізація процесу. Така картина характерна для випадків, коли використовуються залежності, що не повністю відображають внутрішні зв'язки між ступенем пошкодження і причинами, що їх викликає. Хоча процес пошкодження відбувається відразу, параметри, що оцінюють його величину, проявляються дещо пізніше. Наприклад, при втомних руйнуваннях матеріалу, тріщини зароджуються лише після певного числа циклів навантаження.

Якщо швидкість процесу змінює знак, що характерно для складних фізико-хімічних процесів, то функція $U(t)$ буде мати екстремум.

ТЕМА 4. ЗНОШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Зношування – це процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виникає внаслідок відокремлення від поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації.

Класифікація видів зношування подана на рис. 4.1.

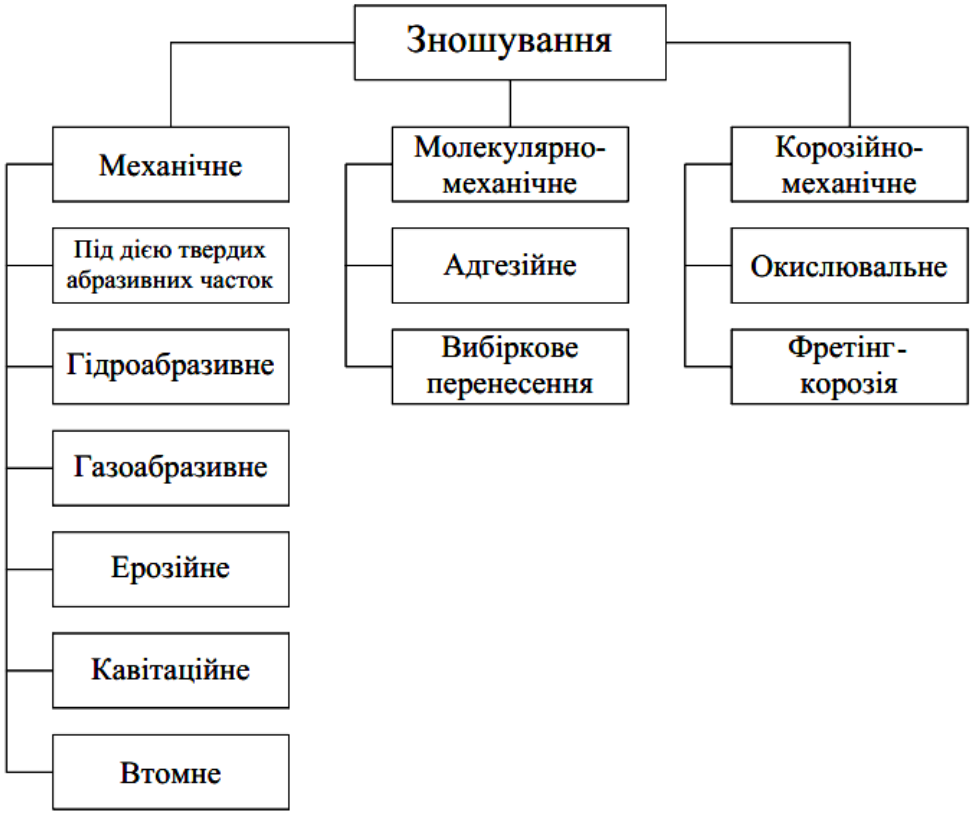


Рисунок 4.1 – Класифікація видів зношування

Механічне зношування є результатом дії сил тертя при ковзанні однієї деталі по поверхні іншої. При цьому виді зносу відбувається стирання (зрізання) поверхневого шару металу та спотворення геометричних розмірів у деталей, що працюють у парі.

Зношування під дією твердих абразивних частинок спостерігається в тих випадках, коли поверхні тертя забруднені дрібними абразивними та металевими частинками. Зазвичай такі частинки потрапляють на поверхні тертя при обробці на верстаті литих заготовок, в результаті зношування самих поверхонь, потрапляння пилу на поверхні контакту тощо. Вони тривалий час зберігають свої ріжучі властивості, утворюють на поверхнях деталей подряпини, задири, а також, змішуючись з брудом, виконують роль абразивної пасти, в результаті дії якої відбувається інтенсивне зношування поверхонь, що сполучаються.

Гідроабразивне зношування (з грецької hydro – вода і латини abrasion стирання, зношування) – це зміна розмірів, форми, маси або стану поверхні

матеріалу під впливом рідини, що рухається з розподіленими у її об’ємі включеннями твердих частинок.

Газоабразивне зношування – це зміна розмірів, форми, маси або стану поверхні матеріалу під впливом газу, що рухається з розподіленими у його об’ємі включеннями твердих частинок.

Ерозійне зношування – це руйнування поверхні деталі внаслідок механічної дії високошвидкісного потоку рідини, газу або пару.

Кавітаційне зношування – це механічне зношування в умовах руху твердого тіла в рідині, під час якого бульбашки газу дезінтегруються (руйнуються, вибухають) поблизу поверхні, що призводить до створення локального високого ударного тиску чи високої температури. Кавітаційні руйнування мають локальний характер і проявляються в утворенні місцевих заглибин і каверн.

Кавітаційне зношування зумовлене тим, що у швидкісному потоці рідини при його звуженні або за наявності перешкоди на його шляху тиск може зменшитись до значення, яке відповідає тиску насиченої пари за даної температури. При цьому може статися розрив суцільного потоку. Порожнини, що утворюються, заповнюються парою або газами, які виділяються з рідини. Парогазові бульбашки розмірами порядку десятих часток міліметра, що утворилися, переміщуючись разом із потоком, потрапляють у зони високих тисків. Пара конденсується, гази розчиняються і в порожнину, що утворилася з великим прискоренням, потрапляють частинки рідини, відбувається відновлення суцільності потоку, яке супроводжується ударом.

Кавітаційне зношування проявляється в наступному. Під дією ударів поверхня металу починає деформуватися і піддаватися наклепу; з'являються лінії зсуву, проявляються межі окремих зерен. Багаторазово повторювані удари викликають знеміцнення і наклеп матеріалу на окремих мікроділянках, що супроводжуються зародженням тріщин. Руйнується у першу чергу найменш міцна структурна складова (в сталях – ферит, в чавунах – графітові включення). Потім може наступити викришування і міцніших компонентів. Руйнування

розвивається в межах зерен або на їх границях в залежності від міцності зерен та зв'язку між ними.

Агресивні середовища (наприклад, морська вода) сприяють збільшенню інтенсивності кавітаційного зношування. Швидкість кавітаційного зношування може в сотні разів і більше перевищувати швидкість корозійного руйнування поверхневого шару.

Інтенсивність кавітаційного зношування залежить від температури, властивостей рідини і матеріалу деталей. Вплив в'язкості рідини на кавітаційне зношування незначне. Зі збільшенням поверхневого натягу рідини зношування відбувається інтенсивніше.



Рисунок 4.2 – Пошкодження пластини клапана аксіально-поршневого гідронасоса в результаті кавітаційного зношування

Кавітаційному зношуванню (руйнуванню) підлягають трубопроводи, гідродвигуни, лопаті гідравлічних турбін і насосів, гребні гвинти, зовнішні поверхні циліндрів двигунів внутрішнього згорання тощо.

Явище кавітації викликає вібрації, удари та струшування, котрі призводять до ослаблення кріпильних елементів, обривання болтів, зминання різі, руйнування ущільнень і втомного руйнування з'єднань.

Кавітація зменшує ККД машин і гребних гвинтів і безпосередньо викликає руйнування поверхонь деталей у зоні її дії. Вона сприяє закупореною розпилювачів форсунок двигунів внутрішнього згорання.

Попередити кавітацію можна, проектуючи гідромеханічну систему так, щоб у всіх точках потоку тиск не був нижчим тиску пароутворення. Додавання у воду речовин, які утворюють емульсії (мастила й емульгатори), зменшує поверхневий натяг і, відповідно, кавітаційне зношування. Воді температурою 50°С відповідає найбільша інтенсивність зношування.

Відхилення від обтічної форми і нерівності, що утворилися внаслідок кавітаційного зношування, призводять до появи вихорів і відхиляння струменів від стінок робочих каналів. Це сприяє виникненню або посиленню кавітації.

Втомне зношування є результатом дії на деталь знакозмінних навантажень, що викликають втому матеріалу деталі та її подальше руйнування. Втомні руйнування матеріалу деталі не обов'язково відразу призводять до її руйнування. Можливе виникнення втомних тріщин, лущення та інших дефектів, які також небезпечні, оскільки викликають прискорене зношування деталі і механізму. Для запобігання втомному руйнуванню важливо правильно вибрати форму поперечного перерізу деталі, що виготовляється або ремонтується: вона не повинна мати різких переходів від одного розміру до іншого. Слід також пам'ятати, що грубо оброблена поверхня, наявність рисок і подряпин можуть стати причиною виникнення втомних тріщин.

Молекулярно-механічне зношування підрозділяють на адгезійне зношування і вибіркове перенесення.

Адгезійне зношування відбувається в зв'язку з виникненням на окремих ділянках контактуючих поверхонь молекулярних (адгезійних) взаємодій, сили яких перевершують міцність зв'язків поверхневого шару матеріалу з основним матеріалом деталі. Прояв атомно-молекулярних зв’язків залежить від властивостей матеріалів контактуючих поверхонь. До адгезійного зношування схильні пари з металевими поверхнями. Адгезійне зношування виражається в глибинному вирівнюванні матеріалу і перенесення його з однієї поверхні на іншу, що призводить, як правило, до заїдання деталей. Знос при заїдання може

виникнути в зубчастій парі або в опорах кочення при високих контактних навантаженнях і відсутності мастила.

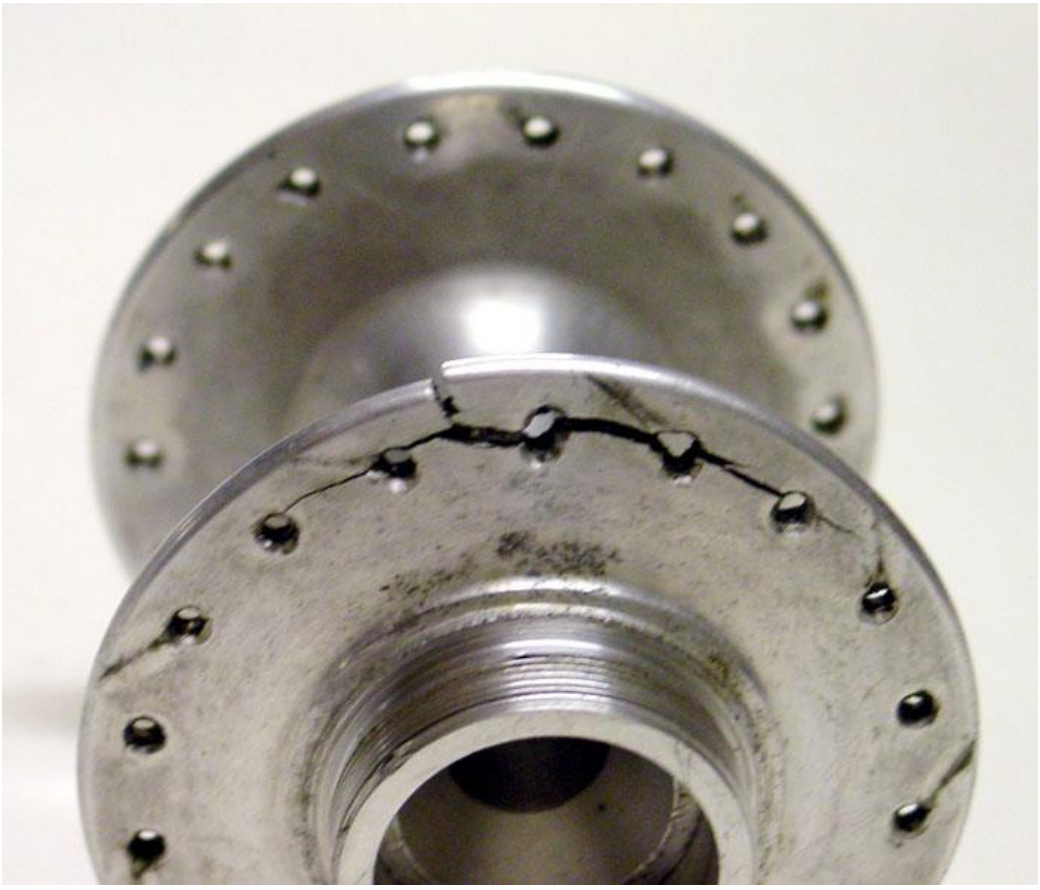


Рисунок 4.3 – Пошкодження деталі в результаті втомного зношування

Вибіркове перенесення – це явище структурного пристосування металів при терті. До періодів вибіркового перенесення відносять два етапи: початковий і усталений. На початковому етапі при терті пари «сталь-сталь» відбувається виділення тепла, під дію якого окисляється мастильно-охолоджувальна суміш (50 % фреону й 50 % мастила). Кислоти, що утворилися при терті, розчиняють поверхню мідних трубок (по яких циркулює фреоно-змащуюча рідина) і переводять іони міді в змащення. Циркулюючи в системі, всередині холодильника, іони міді осідають у вигляді плівки на сталевих поверхнях тертя. На усталеному етапі, після виникнення мідної плівки виникає пара тертя мідь-мідь. За рахунок цього поліпшуються умови тертя, припиняється тепловиділення при терті й окислювання мастильно-охолоджувальної суміші і, як наслідок, припиняється розчинення мідних трубок. При порушенні суцільності плівки

режим тертя погіршується; це призводить до окислювання змащення, до додаткового розчинення міді, внаслідок чого захисна плівка відновлюється. Цей процес повторюється з певною періодичністю в міру руйнування захисної плівки.

Металева захисна плівка, що виникає на поверхнях тертя, називається сервовітною від латинського servo-witte – рятувати життя.

Корозійно-механічне зношування характерне для деталей, що знаходяться під безпосереднім впливом води, повітря, хімічних речовин, коливань температури. Наприклад, якщо температура повітря у виробничих приміщеннях нестійка, то щоразу при її підвищенні водяні пари, що містяться в повітрі, стикаючись з більш холодними металевими деталями, осідають на них у вигляді конденсату, що викликає корозію, тобто руйнування металу внаслідок хімічних і електрохімічних процесів, що розвиваються на його поверхні. Під впливом корозії в деталях утворюються глибокі роз'їдання, поверхня стає губчастою, втрачає механічну міцність. Ці явища спостерігаються, зокрема, у деталей гідравлічних пресів і парових молотів, що працюють у середовищі пари або води.

Окислювальне зношування характерне для випадку, коли на поверхнях дотику утворюються плівки оксидів. В процесі тертя ці оксиди руйнуються і знов утворюються, а продукти зносу складаються з оксидів. Від інших видів корозійно-механічного зношування воно відрізняється відсутністю агресивного середовища, протікає при нормальних і підвищених температурах при терті без змащувального матеріалу або при недостатній його кількості. Інтенсивність зношування може бути досить значною, але поверхня тертя зберігає малу шорсткість. Це пояснюється тим, що оксиди перешкоджають схоплюванню поверхонь. При звичайних температурах окислення поверхонь активізується пластичною деформацією. Тому одним з методів боротьби з окислювальним зношуванням є застосування поверхонь високої твердості.

Для окислювального зношування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями плівки був достатній для утворення плівки досить великої товщини. Природно, що у разі циклічного руйнування оксидів високої твердості, зношування носитиме характер абразивного.

Окислювальному зношуванню піддаються калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань тяги і важелі механізмів управління, шарнірно-болтові з'єднання підвісних пристроїв, що працюють без змащувального матеріалу, металеві колеса фрикційних передач і чашки варіаторів, а також деякі деталі в парах тертя кочення.

Фретінг-корозія – це процес руйнування щільно контактуючих поверхонь пар метал-метал або метал-неметал в результаті малих коливальних відносних переміщень.

Для збудження фреттінг-корозії достатні переміщення поверхонь з амплітудою 0,025 мкм. Руйнування полягає в утворенні на дотичних поверхнях дрібних каверн і продуктів корозії у вигляді нальоту, плям і порошку. Внаслідок малої амплітуди переміщення, пошкодження зосереджуються на невеликих ділянках дійсного контакту. Продукти зносу не можуть вийти із зони контакту, в результаті виникає високий тиск і збільшується їх абразивна дія на основний метал.

Якщо амплітуда коливального руху велика (близько 2,5 мм), то площа ураження фреттінг-корозією збільшується і картина зношування нагадує ту, яка спостерігається при ковзанні. Тому вважається, що амплітуда переміщення близько 2,5 мм є верхньою межею амплітуди для збудження фреттінг-корозії. Все сказане відноситься до незмащених поверхонь.



Рисунок 4.4 – Пошкодження деталей в результаті фретінг-корозії

Продукти фреттінг-корозії сталевих виробів в атмосфері повітря мають колір від світло-червоно-коричневого до темно-коричневого залежно від марок матеріалів, тиску, вологості і частоти циклів мікрозсувів.

Інтенсивність зношування залежить від виду тертя, які можна класифікувати наступним чином (див. рис. 4.5).

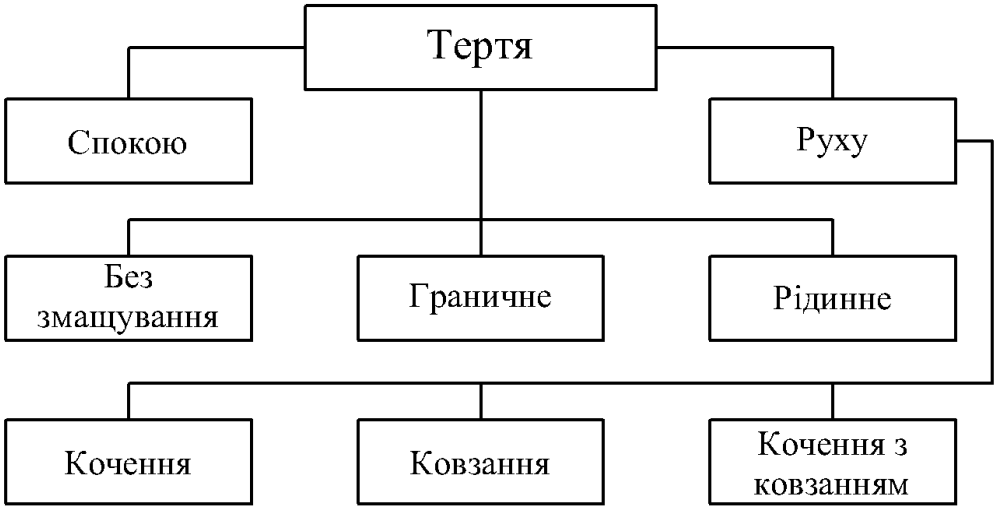


Рисунок 4.5 – Класифікація видів тертя

Костецький Б.І. в якості основних ознак класифікації руйнування рекомендує приймати до уваги механічні, фізичні, та хімічні процеси, що протікають в зоні контакту (див. рис. 4.6).

Схоплювання І роду – один з найбільш небезпечних видів пошкодження, що виникає при малих швидкостях взаємного переміщення деталей і тиску в парі $P \geq \sigma_T$ на ділянці фізичного контакту при відсутності змащування чи захисних плівок окислів. При цьому виникають локальні зв'язки матеріалом, їх деформація і руйнування з відокремленням чи налипанням частинок металу.

Схоплювання ІІ роду – це пошкодження пов'язане з утворенням місцевих металічних зв'язків, їх деформацією і руйнуванням з утворенням тріщини, адгезійного зношування, переносом та відокремленням частинок. Воно обумовлене розм'якшенням. Параметри схоплювання подано в таблиці 4.1.



Рисунок 4.6 – Види руйнувань внаслідок тертя

Таблиця 4.1 – Параметри процесу схоплювання

Параметри	Схоплювання	
	I роду	II роду
Глибина шару руйнування, мм	до 0,5	до 0,1
Температура поверхні, град	до 100	до 1500
Зміна твердості	до 2	до 2
Швидкість руйнування, мкм/год	10…15	1…5

Фретінг процес – це руйнування поверхонь деталей, що проявляється у різко вираженому динамічному окисленні чи схоплюванні. Він виникає при терті ковзання із зворотно-поступальними рухами і динамічним прикладанням навантажень, що викликає на поверхнях тертя локалізацію значних напружень та температур на обмежених ділянках. Швидкість процесу динамічного окислення 1…5 мкм/год, а схоплювання – 5…10 мкм/год.

Механічна форма абразивного зношування – це процес при якому на поверхнях тертя присутні абразивні частинки, що руйнують поверхню за рахунок різання з відокремленням стружки.

Втомні пошкодження – виникають при терті кочення і є результатом інтенсивного руйнування поверхневих шарів металу, що знаходиться в особливо напруженому стані (підшипники, шестерні).

Механо-хімічне нормальне зношування виникає при терті ковзання, кочення при сухому терті і граничному змащуванні.

Швидкість взаємного переміщення деталей:

1…4 м/с – для відпалених сталей;

до 7 м/с – для загартованих сталей;

до 25 м/с – при граничному змащуванні.

Тиск P в парі не перевищує граничного і не руйнує захисні вторинні структури і плівки мастила.

Тепло, що утворюється при терті сприяє розвитку окислювального зносу до певної межі, після чого може спостерігатися дисорбція мастила і схоплювання II роду.

При окислювальному зносі швидкість процесу руйнування становить 0,1 мкм/год.

При наявності абразивних частинок швидкість процесу I форми з переважним механо-хімічним руйнуванням плівок зростає до 0,5 мкм/год, а II форми з переважно механічним руйнуванням від 0,5 мкм/год.

ТЕМА 5. МОДЕЛІ ВІДМОВ

5.1. Зв'язок між ступенем пошкодження і вихідним параметром виробу

Різні види і ступінь пошкодження матеріалу впливають на вихідні параметри виробу, тим самим визначаючи його надійність.

Однак, закон зміни вихідного параметра виробу в часі $X(t)$ може, як відповідати, так і відчутно відрізнятися від залежності ступеня пошкодження