

Лекція 7

ВИДИ ЗНОШУВАННЯ І ПОШКОДЖУВАНOSTІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ

План

- 7.1. Класифікація видів зношування і пошкоджуваності
- 7.2. Механохімічне окисне зношування
- 7.3. Абразивне зношування
- 7.4. Схоплювання і заїдання поверхонь при терті
- 7.5. Зминання

7.1. Класифікація видів зношування і пошкоджуваності

Поверхні тертя деталей машин при експлуатації суттєво змінюються. Змінюються розміри і геометричні характеристики, структура, властивості і напружений стан поверхневих шарів. Ці зміни можуть мати монотонний і різко виражений стрибкоподібний характер. Вони можуть охоплювати мікро-, макро-і субмікроскопічні об'єми. Характер змін значною мірою залежить від кінематичного руху (виду тертя), умов механічного навантаження, наявності й складу середовища, виду змащування, концентрації кисню, матеріалу.

Зміни можуть бути корисними, які нормалізують зовнішнє тертя і сприяють мінімізації зношування, або призводять до недопустимих явищ різко вираженої пошкоджуваності.

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) нагромадження його залишкової деформації під час тертя, що виявляється в поступовому змінюванні розмірів і або форми деталі, зразка.

Знос – результат зношування, що оцінюється безпосередньою зміною розмірів або побічними (непрямими) ознаками. Розрізняють знос лінійний, який визначається зменшенням розміру по нормалі до поверхні тертя, об'ємний – зменшення об'єму і ваговий – зменшення ваги.

Окрім зміни форми і геометричних розмірів деталей або зразків, відбувається повна трансформація структури і її поверхневих шарів. Найбільш різка зміна структури і її властивостей спостерігається в початковий період роботи спряжень. При встановленому зношуванні процеси трансформації мінімізовані й зосереджені в надзвичайно тонких поверхневих шарах.

Пошкоджуваність – процес різко вираженої і нерівномірної зміни геометричного стану поверхонь тертя, структури і властивостей поверхневих шарів. **Пошкодження** – результат пошкоджуваності, що проявляється у зміні макрогеометричних характеристик, структури, властивостей і напруженого стану поверхневих шарів. Зношування і пошкоджуваність відрізняють чітко

вираженими зовнішніми ознаками, механізми їх внутрішнього розвитку специфічні.

В основу класифікації видів зношування і пошкоджуваності деталей машин при терті, яку запропонував професор Б.І. Костецький, покладено такі принципи:

1. Вивчення природи процесів руйнування, що спостерігаються при роботі деталей машин.
2. Відтворення цих процесів і вивчення їх у лабораторних умовах.
3. Вивчення зношування і пошкоджуваності в процесі їх розвитку у зв'язку

з критичними переходами від одних видів до інших залежно від зовнішньої механічної дії, факторів середовища і властивостей матеріалів деталей. При цьому також враховується вплив масштабного фактора, фактора часу і характеру навантаження – статичного або динамічного.

Можливості чіткого розмежування зношування і пошкоджуваності виявляються при аналізі видів руйнування деталей різних машин (які експлуатуються в сільському господарстві, переробній і харчовій промисловості, авіації і на транспорті, металорізальному обладнанні тощо). Залежно від умов тертя, середовища і матеріалів спостерігаються певно визначені провідні (ведучі) процеси. Поряд з ними можуть існувати супутні явища, що здійснюють менш значний вплив на руйнування поверхонь. Положення про провідні й супутні процеси руйнування є фундаментальною основою класифікації видів зношування і пошкоджуваності професором Б.І. Костецьким (рис. 8.1).

З точки зору надійності роботи всі види трансформації у відповідності з класифікацією поділяють на дві великі групи – допустимі й патологічні (недопустимі). До допустимих відносять велику групу явищ, пов'язаних із процесами мінімізації пластичної деформації, активізації тонких поверхневих шарів металу, миттєвої їх взаємодії з агресивними компонентами навколишнього середовища (газовим і рідинним) і утворення рівномірно розміщених на поверхні вторинних структур, які періодично руйнуються і знову утворюються. Процес встановленого тертя і зношування в таких умовах має властивості саморегулювання.

Простою і найбільш розповсюдженою різновидністю допустимого зношування є окисне (окислювальне) зношування. Воно має кілька форм, а його кількісні параметри можуть змінюватися в певних межах.

Взаємодія активованих пластичною деформацією поверхневих шарів металів з різними агресивними компонентами рідких і газових середовищ може призвести до утворення вторинних захисних структур іншого складу – на основі сірки, фосфору, азоту, вуглецю тощо. Цей загальний комплекс явищ, пов'язаних з деформацією, текстуруванням поверхневих об'ємів металу, подальшою взаємодією з хімічно активними компонентами робочого середовища і руйнуванням утворених структур, складає механохімічне

зношування.

До проміжних процесів руйнування можна віднести деякі форми абразивного зношування без зняття стружки і пошкодження дряпанням.

До патологічних процесів руйнування поверхонь відносять: процеси, які безпосередньо пов'язані з тертям (схоплення I і II роду, абразивне зношування з пошкодженням поверхонь контакту – зняттям мікростружки, втомне пошкодження, фретінг-процес) і побічно пов'язані з тертям (зминання, корозія, кавітація, ерозія). Патологічні явища – це своєрідні, яскраво виражені види руйнування поверхні, що виникають при порушенні нормальних умов зовнішнього тертя. Перехід до патологічних процесів відбувається стрибкоподібно при досягненні деяких критичних умов.

Класифікація видів зношування і пошкоджуваності деталей машин



При цьому виді зношування швидкість окислення ($V_{ок}$) перевищує швидкість інших процесів, що протікають на поверхнях тертя, тобто окислення, є переважаючим (домінуючим). Міцність плівок вторинних структур, що утворюються, забезпечує стале протікання цього виду зношування, швидкість руйнування плівок не перевищує швидкість окислення ($V_{ок} > V_{руйн.}$). Спільним для вторинних структур обох основних типів є їхня поверхнева локалізація, високоміцна ультра дисперсна будова, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару й екранувати неприпустимі процеси схоплювання, втомленості, корозії тощо.

Окисне (окислювальне) зношування характеризує нормальні умови

експлуатації вузлів тертя. Окисні процеси як супутні спостерігаються і при інших видах зношування і пошкоджуваності поверхонь тертя. Деформаційні й окислювальні процеси відбуваються в дуже тонких поверхневих шарах порядку 10...100 нм.

Найчастіше механохімічне зношування спостерігається при терті сполучених деталей, виготовлених з різних металів і сплавів на основі твердих розчинів з гетерогенною структурою або підвищеними твердістю і границею текучості. Цей вид зношування характерний для деталей шарнірно-болтових з'єднань, калібрів, металевих коліс, фрикційних передач, чашок варіаторів, тяги механізмів керування тощо.

Окисне зношування має кілька форм. Залежно від умов, виду тертя, швидкості відносного переміщення, тиску, динамічності навантаження, температури, складу середовища, механічних і хімічних властивостей матеріалів, що труться, характер та інтенсивність окисних процесів змінюється. Перша форма окисного зношування характеризується утворенням на поверхнях тертя твердих розчинів кисню і тонких евтектик його з'єднань з металом. Друга форма – утворенням хімічних з'єднань кисню з металом (для сталі – FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4). У першому випадку характерне в'язке руйнування поверхонь контакту, в другому – в'язко-крихке.

В умовах наявності абразивного середовища окислення і руйнування поверхонь інтенсифікується внаслідок великої концентрації напружень у локальних об'ємах металу. Особливості цієї форми окисного зношування розглянуто далі.

Нормальне окисне зношування виникає при терті ковзання і кочення, при сухому терті і граничному змащуванні.

Питомі тиски при окисному зношуванні не перевищують критичних значень, за яких відбувається руйнування мастильної плівки при граничному терті, або величин, які визивають інтенсивне руйнування захисних вторинних структур окислів і контактування ювінільних поверхонь при сухому терті.

Інтенсивність зношування може бути значною, але поверхні тертя зберігають малу шорсткість. Це пояснюється тим, що окисли перешкоджають схоплюванню поверхонь. При значних температурах окислення поверхня характеризується пластичною деформацією. Тому одним із методів боротьби з окисним зношуванням є створення поверхонь тертя з високою твердістю.

Підвищення температури до певних значень сприяє утворенню і зростанню окисних плівок, а вібрації – їх руйнуванню. У випадку циклічного руйнування окислів високої твердості зношування буде носити характер абразивного.

Окисне зношування може виникати при терті металів і сплавів з різними механічними й хімічними властивостями. Основні кількісні характеристики –

інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя, за різних форм і умов окисного процесу, залежить від специфіки окисних змін.

Окисне зношування є найважливішою різновидністю механохімічного зношування, загальною особливістю якого є те, що в усіх випадках воно зумовлене механічним процесом деформації тонких поверхневих шарів і одночасною взаємодією активних деформованих шарів з агресивними компонентами середовища.

Поряд з окисним існує ряд різновидів механохімічного зношування, які відрізняються утворенням у процесі тертя сульфідних, фосфатних та інших видів плівок вторинних структур, які виконують таку ж роль, як і плівки окислів.

7.3. Абразивне зношування

Абразивним матеріалом називають мінерал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і мають здатність різати.

Абразивне зношування і пошкоджувальність – процеси руйнування поверхонь деталей машин у результаті їх взаємодії з твердими частинками (абразивним середовищем), за наявності відносної швидкості. У ролі таких частинок виступають:

а) нерухомо закріплені тверді зерна, які входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом до поверхні деталі;

б) не закріплені частинки, які входять у контакт з поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі при їх транспортуванні відповідними засобами, абразивні частинки в ґрунті при роботі сільськогосподарських машин і т.п.);

в) вільні частинки, які перебувають у зазорах спряжень деталей; г)

вільні абразивні частинки, які затягуються в потік рідиною або газом.

Абразивному зношуванню підлягають деталі сільськогосподарських машин, дорожньо-будівельних, гірничих, транспортних машин і засобів транспортування, вузли металургійного обладнання, металорізальних верстатів, шасі літаків, робочі колеса турбін, труби і насоси земснарядів, лопатки газових турбін, труби водяних економлайзерів і парових котлів, обладнання нафтової і газової промисловості, підшипники валів гребних коліс, підшипники гребних валів суден і т.п.

На процес абразивного зношування може впливати природа абразивних частинок, агресивність середовища, властивості поверхонь, що зношуються, ударна взаємодія, нагрівання та інші фактори. Загальним для абразивного зношування є механічний характер руйнування поверхні.

Абразивне зношування виникає при контактуванні з ґрунтом, рудою, вугіллям і породою, золою, попелом, пилом, які потрапляють на поверхню тертя, металічною стружкою, окисними плівками, які закріпилися на поверхні тертя або руйнування, нагаром і продуктами зношування.

Абразивні частинки можуть мати різноманітну форму і бути по-різному

зорієнтовані відносно поверхні спряження. Здатність абразивного зерна втискуватися у поверхню залежить не тільки від співвідношення його твердості, але й від геометричної форми зерна. Зерно з випуклою поверхнею або гострим ребром може бути втиснене, навіть без пошкодження, в плоску поверхню твердішого тіла. Це пояснює факт зношування металу абразивними частинками з твердістю, меншою його твердості.

Іноді твердість окисних плівок більша твердості самих металів. Вид зношування визначається характером взаємодії абразивних частинок із поверхневим шаром матеріалу. На деталях сільськогосподарських машин спостерігається абразивне зношування трьох видів, у кожному з яких є два підвиди. Існують дві чітко виражені форми прояву абразивних процесів, які відрізняються характером взаємодії частинок із поверхнею металу:

I – з переважаючим механічним руйнуванням (пластичне деформування поверхневих об'ємів, їх окислення з наступним руйнування окисних плівок). Ця форма є різновидністю механічного зношування.

II – з переважаючим механічним руйнуванням металу поверхневих шарів (проникнення абразивних частинок і руйнування поверхневих об'ємів без відокремлення частинок основного металу або зі зняттям мікростружки). Ця форма є недопустимим процесом пошкоджуваності при зовнішньому терті.

Механізм зношування відбувається у випадку, коли абразивні частинки входять у контакт із поверхнею металевої деталі по дотичній. Абразивні частинки пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуються. Залежно від структури абразивного матеріалу і середовища зерна можуть втискуватися в це середовище, повернутися або навіть вийти із зони контакту, як, наприклад, частинки кварцу в ґрунті під тиском ножа грейдера. Абразивна частинка втискується в метал деталі, якщо вона має більшу твердість, аніж металічне зерно, і міцністю, достатньою для сприйняття навантаження, необхідного для втискування в метал і якщо її достатньо підтримує основа. Впроваджена частинка при русі відносно поверхні може дряпати або зрізувати мікроскопічну стружку. Різання може початися тільки при певному відношенні глибини проникнення абразива до радіуса заокруглення його граней. Дно рівчака наклепується. Коли вся робоча поверхня наклепується, опір упровадженню підвищується. Після багатократної пластичної деформації настає крихкість матеріалу. Встановлено, що відносна зносостійкість чистих металів знаходиться в лінійній залежності з мікротвердістю.

Механізми абразивного зношування полімерних матеріалів визначають ступенем їх еластичності. У високопластичний матеріал – гуму, вулкан, поліуретановий вулканізатор та інші, абразивні частинки легко втискуються, не викликаючи пластичної деформації навіть при глибокому контакті.

Абразивне зерно переміщується по поверхні. Сили тертя спереду зерна викликають стиснення, а позаду нього – розтяг. Під дією багатократних напружень на розтяг відбуваються мікроривы, частина матеріалу з поверхні виноситься з утворенням хвиляподібного рельєфу з виступів і впадин у напрямку, перпендикулярному руху абразиву. При дослідженні зношування пластмас незакріпленим абразивом розмірами 0,075...1,5мм на пружній підкладці було встановлено:

1. Абразивні частинки розміром 0,075мм практично не викликають зношування. Відносно еластичні полімери, такі, як поліаміди, мало зношуються при розмірі зерна 0,015мм. При збільшенні розміру абразивних частинок більше 0,1мм інтенсивність зношування всіх полімерів зменшується.

2. При терті пластмас по шліфувальній шкірці зношування прямо-пропорційне тиску, що зберігається тільки до певної межі. У подальшому інтенсивність зношування зі зростанням тиску не збільшується.

3. Збільшення швидкості ковзання до 0,5м/с не впливає на інтенсивність зношування. Зі зменшенням швидкості інтенсивність зношування падає, а потім зростає.

Експериментально встановлено: якщо розмір абразивних частинок, які знаходяться в маслі або іншій рідині, не перевищує 5мкм, то вони адсорбують на себе продукти окислення мастила, що може зменшити інтенсивність зношування деталей. Частинки більших розмірів починають наносити шкоду. За наявності в мастилі частинок менше 5мкм швидкість зношування становить 0,3 мг/год, а при частинках 10мкм – 0,92 мг/год.

Особливу небезпеку частинки великих розмірів становлять для гідросистем, де деталі з твердих сталей працюють при малих зазорах. У гідросистемах завжди є фільтри тонкого очищення, але все ж у системах присутні частинки з розмірами більше 5мкм. Фірма “Вікерс” (Великобританія) наводить для гідросистем наступний розподіл по розмірах частинок: 0...5мкм –

39%, 5...10мкм – 18%, 10...20мкм – 16%, 20...40мкм – 18%, 40...80мкм – 9%.

Абразивні частинки, які потрапили в зазори пар тертя, беруть участь у сприйманні прикладеного навантаження і можуть, залежно від умов, вклинюватися в поверхні тертя, подрібнюватися на м'якші фракції, перекочуватися вздовж поверхні зношування, пружно і пластично деформуючи її.

Абразивні частинки можуть потрапити в робочі порожнини машин і на поверхні тертя з повітря разом із паливом і змащувальними матеріалами, а також іншими шляхами.

Із абразивних частинок, що потрапляють із повітря, найбільшу дію створюють частинки кварцу, твердість яких досягає 11...12 ГПа. Ці частинки розміром 1...30 мкм можуть тривалий час знаходитися в повітрі при його русі (в результаті вітру або руху транспорту). Повітряні фільтри двигунів автомобілів і багатьох інших машин можуть затримувати лише крупні частинки пилу. Дрібні частинки проникають у двигун разом із повітрям.

7.4. Схоплювання і заїдання поверхонь при терті

Під час роботи машин і механізмів, вузли тертя яких передають великі навантаження за високих швидкостей ковзання і температур, виникає заїдання

– процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхонь тертя внаслідок схоплювання і перенесення матеріалу.

Схоплювання – явище місцевого з'єднання двох твердих тіл (металів) у результаті взаємного тертя або сумісного деформування при температурі, нижчій від температури рекристалізації. При цьому утворюються міцні кристалічні зв'язки в зонах безпосереднього контакту поверхонь. У місцях схоплювання зникає межа між тілами, що дотикаються, і відбувається зношування металів. Процеси схоплювання безпосередньо зв'язані з адгезією і когезією. Адгезія супроводжується перенесенням матеріалу і спостерігається в усіх металів під час контакту їхніх незабруднених поверхонь.

Вивченню явища схоплювання і методів боротьби з ним присвячено праці Б.І. Костецького, В.Д. Кузнєцова, М.Л.Голего, І.В. Крагельського, М.О. Буше тощо. Встановлено, що на інтенсивність розвитку процесів схоплювання впливають фізичні, хімічні, механічні властивості матеріалів, геометрія поверхонь тертя, фізико-хімічні властивості середовища.

На явищі схоплювання при сумісному пластичному деформуванні металів базуються технологічні процеси холодного зварювання металів і отримання біметалів методом холодного прокатування тощо.

В умовах вакууму без газового або рідинного середовища зовнішнє тертя приводить до міцної адгезійної взаємодії двох поверхонь – їх зварювання. У зв'язку з цим з'явився технологічний процес зварювання у вакуумі, а з 1936 р. почалися роботи із забезпечення працездатності вузлів тертя, експлуатованих в умовах вакууму.

Задир – пошкодження поверхні тертя і утворення в результаті схоплювання широких і глибоких борозен (рівчаків) з витісненням металу як в сторони, так і в напрямку ковзання. На поверхнях тертя може утворитися і кілька борозен.

Розрізняють процеси схоплювання I і II родів, відмінних умовами роботи. Схоплювання I роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя в результаті виникнення локальних металічних зв'язків, їх

деформації і руйнування з відокремленням частинок металу або налипанням на поверхню контакту. При цьому виді пошкоджуваності швидкість процесу утворення металічних зв'язків перевищує швидкість інших процесів і стає переважаючим. Виникнення металічних зв'язків відбувається при інтенсивній деформації поверхневих об'ємів металу, зумовленої термічною пластичністю.

Пластична деформація в цих умовах призводить до зміни стану поверхні, руйнування плівок окислів і адсорбованих плівок мастила, виходу на поверхню ювенільних ділянок. У результаті деформації відбувається активізація металу поверхневих шарів. Унаслідок схоплювання частинки металу вириваються на одних ділянках поверхонь і налипають на інші ділянки, що призводить до зношування поверхні деталей, а в окремих випадках відбувається їх заїдання. Заїдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхні тертя внаслідок схоплювання і перенесення матеріалу.

Схоплювання I роду або холодний задир виникає при терті ковзання з малими швидкостями відносного переміщення і питомим тиском, які перевищують границі плинності (текучості) металу на ділянках фактичного контакту за відсутності шару мастила або захисних плівок окислів в умовах незначного підвищення температур, які призводять до інтенсивного пластичного деформування, руйнування й вдосконалення частинок металу з поверхонь тертя, внаслідок схоплювання металів, що являє собою процес міцного зеднання контактних ділянок сполучених поверхонь. У вакуумі, починаючи від ступеня розрідження ($1,33 \cdot 10^{-3}$), цей вид пошкоджуваності може виникати і при терті кочення. Процес схоплювання суттєво залежить від механічних і фізичних властивостей матеріалів, їх співвідношень, міцності, твердості, типу кристалічної ґратки, взаємного розчинення, електронної будови і т.п.

Схоплювання I роду або холодний задир є один з найнебезпечніших і різко виражених видів пошкоджуваності деталей машин.

У практиці роботи деталей машин цей патологічний процес зовсім небажаний. Для його усунення необхідні дані про критичні значення величин тиску, швидкості та природи процесу. Особливо небезпечні прояви атермічного схоплювання, що виникають при динамічному навантаженні поверхонь і розвитку фретінг-процесу.

Схоплювання II роду – процес недопустимого пошкодження поверхонь тертя, викликаний утворенням місцевих металічних зв'язків, їх деформацією і руйнуванням, який виражається в утворенні тріщин, намащуванні, перенесенні металу і відокремленні частинок з поверхонь тертя. Виникнення металічних зв'язків при цьому зумовлене нагріванням, пом'якшенням, деформацією і контактуванням ювінільних поверхонь. Виділення теплоти вище значень, допустимих для даних матеріалів, зумовлює їх деформацію, вихід ювінільних ділянок і наближення поверхонь на відстань міжатомних радіусів.

Схоплювання II роду, або гарячий задир, виникає й розвивається при терті ковзання за великих швидкостей відносно руху і підвищених питомих тисків, що зумовлює високий градієнт й інтенсивність зростання температури в поверхневих шарах металів та їх термічну пластичність. Термічна пластичність викликає втрату міцності, явища відпуску і плавлення. При цьому утворюються структури рекристалізації, відпуску, гартування і вторинного гартування, структурних змін і фазових перетворень, до різкої зміни механічних властивостей. Схоплювання II роду може проявлятися при сухому терті і граничному змащуванні. При граничному терті воно виникає при високих швидкостях ковзання й тиску і пов'язано з попередніми процесами десорбції мастила. Схоплювання II роду більшою мірою залежить від теплофізичних властивостей матеріалів, теплостійкості, твердості, тепломісткості й теплопровідності. Воно виникає при терті металів з різними механічними властивостями. У групі сталей цей вид схоплювання найхарактерніший для загартованих матеріалів.

У практиці роботи деталей машин схоплювання II роду найчастіше виникає в тих спраженнях, робота яких пов'язана зі стійким граничним змащуванням. Ця умова порушується при припиненні регулярного підведення мастила.

7.5. Зминання

Зминання – макроскопічна об'ємна пластична деформація металу деталей машин. Воно пов'язане зі зміною форми при навантаженнях, вищих за границю текучості. Деформація і зминання можуть розповсюджуватися на весь об'єм деталей або на його значну частину. При цьому розміри деталей змінюються, але їх вага залишається постійною. Зминання деталей може виникати при терті і може бути викликане передаванням зусиль, безпосередньо не пов'язаних із коченням або ковзанням поверхонь.

Деформація мікрооб'ємів металу являє собою дуже суттєвий фактор у випадках, коли деталі виготовлені з кольорових сплавів – бронзи, латуні, бабітів, алюмінієвих сплавів. Можливі також випадки зминання сталевих деталей – бандажів, коліс залізничного транспорту і т.п. У цих випадках об'ємна деформація може бути пов'язана з перевищенням допустимих навантажень. Явище зминання слід відрізняти від пластичної деформації в тонких шарах поверхонь тертя.