

3. ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Під складною системою розуміється об'єкт, призначений для виконання заданих функцій, який може бути розчленований на елементи, кожен з яких також виконує певні функції і знаходиться у взаємодії з іншими елементами системи.

Поняття складної системи умовно. Воно може застосовуватися як до окремих вузлів і механізмів (двигун, система подачі палива до двигуна), так і до самої машини (верстат, трактор, автомобіль, літак).

3.1. Особливості складних систем

1. *Складна машина складається з великої кількості елементів, кожен з яких має свої характеристики надійності.*

Приклад: автомобіль складається з 15–18 тис. деталей, кожна з яких має свої характеристики надійності.

2. *Не всі елементи однаково впливають на надійність машини.* Багато з них впливають лише на ефективність її роботи, а не на її відмови. Ступінь впливу кожного елемента на надійність машини залежить від багатьох факторів, таких як:

призначення елемента,

характер взаємодії елемента з іншими елементами машини,

структура машини,

вид з'єднань елементів між собою.

Наприклад: несправність системи живлення автомобіля може викликати перевитрати палива, тобто несправність, а відмова системи запалювання може привести до відмови всього автомобіля.

3. *Кожен екземпляр складної машини має індивідуальні риси, тому що незначні варіації властивостей окремих елементів машини позначаються на вихідних параметрах самої машини. Чим складніше машина, тим більше індивідуальних особливостей вона має.*

Елементи складної машини

При аналізі надійності складних машин їх розбивають на елементи (ланки) з тим, щоб спочатку розглянути параметри і характеристики елементів, а потім оцінити працездатність всієї машини.

Теоретично будь-яку складну машину можна умовно розділити на велике число елементів, розуміючи під елементом вузол, агрегат або деталь.

Під елементом будемо розуміти складову частину складної машини, яка може характеризуватися самостійними вхідними та вихідними параметрами.

Класифікація елементів

При аналізі надійності складного виробу всі його елементи і деталі доцільно розділити на наступні групи:

1. *Елементи, працездатність яких за термін служби практично не змінюється.* Для автомобіля це його рама, корпусні деталі, малонавантажені елементи з великим запасом міцності.

2. *Елементи, працездатність яких змінюється протягом терміну служби машини.* Ці елементи, в свою чергу, підрозділяються на:

2.1. *Не лімітуючі надійність машини.* Термін служби таких елементів можна порівняти з терміном служби самої машини.

2.2. Лімітуючі надійність машини. Термін служби таких елементів менше терміну служби машини.

2.3. Критичні по надійності. Термін служби таких елементів не дуже великий, від 1 до 20% терміну служби самої машини.

Стосовно до автомобіля кількість цих елементів розподіляється наступним чином (табл. 3.1)

Классификация элементов машин

Номер элемента по классификации	Группа деталей	Количество	
		тыс.шт.	%
1	Практически не меняют свою работоспособность	8–9	50–53
2	Меняют свою работоспособность	7–9	47–50
2.1	Не лимитирующие надежность	4–5	27–28
2.2	Лимитирующие надежность	2,5–3,5	18–19
2.3	Критические по надежности	0,3–0,5	2–4

3.2. Структура складних систем

З позицій теорії надійності можуть бути наступні структури складних машин (рис. 3.1):

1) розчленовані - у яких надійність окремих елементів може бути заздалегідь визначена, так як відмову елемента можна розглядати як незалежне подію;

2) пов'язані - у яких відмова елементів є залежною подією, пов'язаною зі зміною вихідних параметрів всієї машини;

3) комбіновані - складаються з підсистем з пов'язаною структурою і з незалежним формуванням показників надійності для кожної з підсистем.

Для транспортної машини як складної системи характерна комбінована структура, коли надійність окремих підсистем (агрегатів, вузлів) може розглядатися незалежно.

З'єднання елементів у складній машині може бути *послідовним, паралельним і змішаним (комбінованим)*.

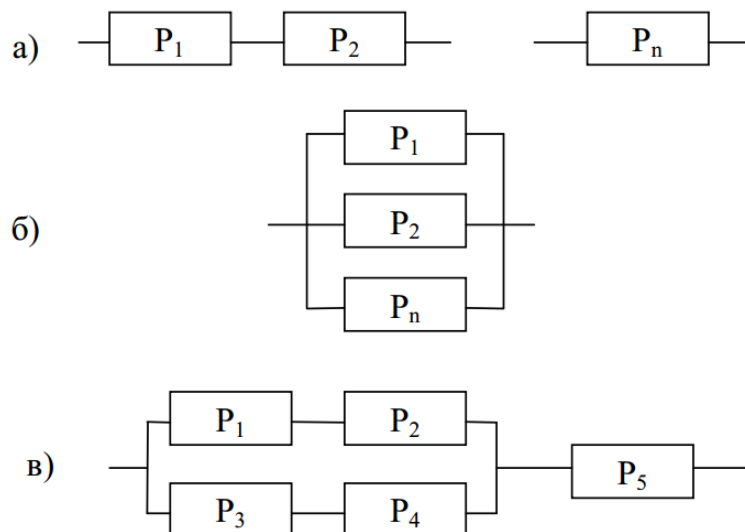


Рис. 3.1. Схеми з'єднань елементів: а) послідовне; б) паралельне; в) змішане; P_i – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента

У конструкції автомобіля мають місце всі види з'єднань, приклади яких наведені на рис. 3.2.

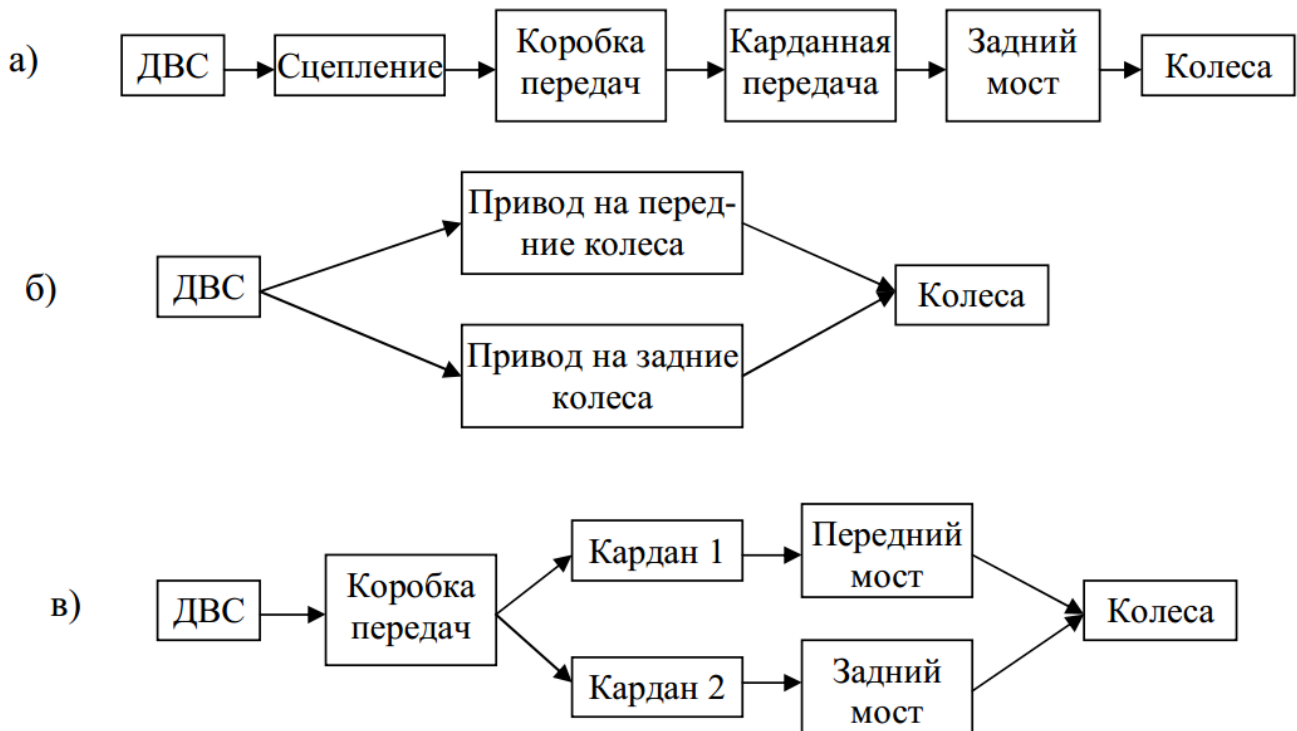


Рис. 3.2. Види з'єднань елементів в конструкції автомобіля:
а) послідовне; б) паралельне; в) комбіноване

3.3. Особливості розрахунку надійності складних систем

3.3.1. Розрахунок надійності системи при послідовному з'єднанні її елементів

Найбільш характерний випадок, коли відмова одного елемента виводить з ладу всю систему, як це має місце при послідовному з'єднанні елементів (рис. 3.2, а).

Наприклад, більшість приводів машин і механізми передач підкоряються цій умові. Так, якщо в приводі машини вийде з ладу будь-яка шестерня, підшипник, муфта і т.д., то весь привід перестане функціонувати. При цьому окремі елементи не обов'язково повинні бути з'єднані послідовно. Наприклад, підшипники на валу редуктора працюють конструктивно паралельно один з одним, однак вихід з ладу будь-якого з них призводить до відмови системи. Імовірність безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням елементів

$$P(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i.$$

З формули видно, що навіть якщо складна машина складається з елементів високої надійності, то в цілому вона має низьку надійність за рахунок наявності великої кількості елементів в її конструкції, з'єднаних послідовно. У конструкції автомобіля має місце в основному послідовне з'єднання елементів. У цьому випадку відмова будь-якого елемента викликає відмову самого автомобіля.

Приклад розрахунку з області автомобільного транспорту: у агрегаті автомобіля, що складається з чотирьох послідовно з'єднаних елементів, ймовірність безвідмовної

роботи елементів за певне напрацювання становить $P_1 = 0,98$; $P_2 = 0,65$; $P_3 = 0,88$ і $P_4 = 0,57$. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи за те ж напрацювання всього агрегату дорівнює $P_c = 0,98 \cdot 0,65 \cdot 0,88 \cdot 0,57 = 0,32$, тобто дуже і дуже низька.

Іншими словами, надійність автомобіля з послідовно з'єднаними елементами нижче надійності найслабшої його ланки. Тому при ускладненні конструкції автомобіля, його агрегатів і систем, одним з проявів якого є збільшення числа елементів в системі, вимоги до надійності кожного елемента і їх рівномірності різко зростають.

3.3.2. Розрахунок надійності системи при паралельному з'єднанні її елементів

При паралельному з'єднанні елементів ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i).$$

Наприклад: якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента $P = 0,9$, а кількість елементів дорівнює трьом ($n = 3$), то $P(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999$. Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи системи різко підвищується і стає можливим створення надійних систем з ненадійних елементів. Паралельне з'єднання елементів в складних системах підвищує її надійність.

3.4. Резервування

Для підвищення надійності складних систем часто застосовують структурне резервування, тобто введення в структуру об'єкта додаткових елементів, що виконують функції основних елементів в разі їх відмови.

Класифікація резервування

Класифікація різних способів резервування здійснюється за такими ознаками:

1. За схемою включення резерву:

- 1.1. Загальне резервування, при якому резервується об'єкт в цілому.
- 1.2. Роздільне резервування, при якому резервуються окремі елементи або їх групи.
- 1.3. Змішане резервування, при якому різні види резервування поєднуються в одному об'єкті.

2. За способом включення резерву:

- 2.1. Постійне резервування – без перебудови структури об'єкта при виникненні відмови його елемента.
- 2.2. Динамічне резервування, при якому при відмові елемента відбувається перебудова структури схеми. У свою чергу воно підрозділяється на:
 - резервування заміщенням, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного;
 - ковзне резервування, при якому декілька основних елементів резервується одним або декількома резервними, кожен з яких може замінити будь-який основний (тобто групи основних і резервних елементів ідентичні).

3. За станом резерву:

- 3.1. Навантажене (гаряче) резервування, при якому резервні елементи (або один з них) постійно приєднані до основних і знаходяться в однаковому з ними режимі роботи; воно застосовується тоді, коли не допускається переривання функціонування системи під час перемикання елемента, що відмовив на резервний.

3.2. Полегшене резервування, при якому резервні елементи (принаймні один з них) знаходяться в менш навантаженому режимі в порівнянні з основними, і ймовірність їх відмови в цей період мала.

3.3. Ненавантажений (холодне) резервування, при якому резервні елементи до початку виконання ними функцій знаходяться в ненавантаженому режимі. В цьому випадку для включення резерву необхідний відповідне пристрій. Відмова ненавантажених резервних елементів до включення замість основного елемента неможлива.

4. ЗНОШУВАННЯ

Від 80% до 90% рухливих сполучень машин виходять з ладу внаслідок зносу. При цьому знижуються ККД, точність, економічність, надійність і довговічність машин. Процес взаємодії поверхонь при їх відносному русі вивчає така науково-технічна дисципліна, як трибологія, яка об'єднує проблеми тертя, зносу і мастила.

4.1. Види тертя

Існують чотири види тертя:

1. *Сухе тертя* виникає при відсутності змащення і забруднень між поверхнями, що труться. Зазвичай сухе тертя супроводжується стрибкоподібним переміщенням поверхонь.

2. *Граничне тертя* спостерігається в тому випадку, коли поверхні, тіл, що труться розділені шаром змащення товщиною від 0,1 мкм до товщини однієї молекули, який називається граничним. Його наявність знижує сили тертя від двох до десяти разів у порівнянні з сухим тертям і зменшує знос сполучених поверхонь в сотні разів.

3. *Напівсухе тертя* – це змішане тертя, коли на площі контакту тіл тертя місцями граничне, а на іншій частині сухе.

4. *Рідинне тертя* характеризується тим, що труться поверхні повністю розділені товстим шаром змащення. Шари змащення, що знаходяться від поверхні на відстані понад 0,5 мкм, мають можливість вільно переміщатися один щодо іншого. При рідинному терті опір руху складається з опору ковзання шарів змащення відносно один одного по товщині мастильного шару і залежить від в'язкості мастильної рідини. Цей режим характеризується дуже малим коефіцієнтом тертя і є оптимальним для вузла тертя щодо його зносостійкості.

Слід зазначити, що іноді в одному і тому ж механізмі спостерігаються різні види тертя. Так, наприклад, в двигуні внутрішнього згоряння стінки циліндрів в нижній частині змащуються рясно, внаслідок чого під час руху поршня на середині ходу тертя кілець і поршня об стінку циліндра наближається до рідинного. При русі поршня поблизу верхньої мертвої точки (особливо при такті впуску) умови змащення кілець і поршня різко погіршуються, так як масляна плівка, яка лишилась на стінках циліндра зазнає зміни під впливом високої температури продуктів згоряння. Особливо погано змащується верхня частина циліндра. після пуску холодного двигуна можливе граничне і навіть сухе тертя компресійних кілець об стінки циліндра, що є однією з причин підвищеного зносу циліндрів у верхній частині.

4.2. Види зношування.

Зношуванням називають процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) накопичення його залишкової деформації при терті, яка проявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла.

Зношування зазвичай підрозділяється на дві групи:

1. Механічне – виникає в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих частинок, що знаходяться між поверхнями тертя:

1) абразивне – зношування поверхні деталі, яке відбувається в результаті ріжучого або дряпаючої дії твердих тіл або частинок;

2) ерозійне (гідроабразивне, газоабразивне, електроерозійне) – зношування відбувається в результаті впливу на поверхню деталі, що рухається з великою швидкістю потоку рідини, газу, твердих частинок, в результаті впливу розрядів при проходженні електричного струму;

3) кавітаційне – зношування виникає при відносному русі твердого тіла і рідини в умовах кавітації.

Примітка: кавітація – це процес утворення в рідині порожнин, заповнених газом і / або паром.

Кавітація спостерігається в рідині при падінні тиску в ній до тиску насичених парів, коли порушується суцільність потоку рідини і утворюються кавітаційні бульбашки. У момент досягнення граничного розміру вони починають закриватися з великою швидкістю, що призводить до гідравлічного удару об поверхню металу;

4) втомне – зношування під дією знакозмінних напруг. До нього схильні зубчасті передачі, підшипники кочення і ковзання;

5) адгезіоне – зношування (зношування при заїданні) відбувається при схоплюванні металів в процесі тертя з утворенням міцних металевих зв'язків в зонах безпосереднього контакту поверхонь;

6) зношування при фреттінгу – це механічне зношування місць прослизання поверхонь, що щільно контактують, та перебувають під навантаженням при коливальних, циклічних, зворотно-поступальних відносних переміщеннях з малими амплітудами.

2. Коррозійно-механічне – виникає при терті матеріалів, які вступають в хімічну взаємодію з навколишнім середовищем:

1) окислювальне зношування – відбувається в тому випадку, коли кисень, що міститься в повітрі або в мастилі, вступає у взаємодію з металом і утворює на ньому оксидну плівку, яка при терті стирається або відривається від металу і видаляється з мастилом, а потім утворюється знову (прикладом окисного зношування може служити зношування верхньої частини циліндрів двигуна внутрішнього згорання при дії кислотної корозії, яка відбувається при низькій температурі стінок, особливо при роботі непрогрітого двигуна);

2) зношування при фреттинг-корозії полягає в створенні на поверхнях взаємного торкання деталей і продуктів корозії у вигляді порошку або нальоту. Зношування при цьому залежить від мікросхоплювання, втомного, корозійно-механічного та абразивного впливу (які одночасно протікають).

4.3. Характеристики зношування

Основними кількісними характеристиками зношування є знос, швидкість зношування, інтенсивність зношування.

Знос – результат зносу, що визначається у встановлених одиницях. Знос (абсолютний або відносний) характеризує зміну геометричних розмірів (лінійний знос), маси (ваговий знос) або обсягу (об'ємний знос) деталі внаслідок зношування і вимірюється у відповідних одиницях.

Швидкість зношування V_z (м/год, г/ч, м³/ч) – відношення зносу U до інтервалу часу τ , протягом якого воно виникло:

$$V_u = \frac{U}{\tau}$$

Інтенсивність зношування J – відношення зносу до обумовленого шляху L , на якому відбувалося зношування, або обсягом виконаної роботи:

$$J = \frac{U}{L}$$

При лінійному зношуванні інтенсивність зношування є безрозмірною величиною, а при ваговому – вимірюється в одиницях маси, віднесеної до одиниці шляху тертя.

Властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя характеризується зносостійкістю – величиною, зворотною швидкості або інтенсивності зношування, у відповідних одиницях. В процесі роботи машини показники зношування деталей і сполучень не зберігають постійних значень. Зміни зносу деталей в часі в загальному випадку можна представити у вигляді моделі, запропонованої В.Ф. Лоренцо.

У початковий період роботи, званий періодом приробітку, спостерігається досить швидкий знос деталей (рис. 4.1, ділянка I). Тривалість цього періоду обумовлюється якістю поверхонь і режимом роботи механізму і становить зазвичай 1,5-2% ресурсу вузла тертя. Після приробітку настає період сталого режиму зношування (рис 4.1, ділянку II), що визначає довговічність сполучень. Третій період – період катастрофічного зношування (рис. 4.1, ділянка III) – характеризує граничний стан механізму і обмежує ресурс. Як видно з наведених графіків, процес зношування надає прямий, визначальний вплив на виникнення відмов і несправностей вузлів тертя машин. Зміна показників надійності в часі ідентична зміні показників зношування. Більш висока крутизна кривої $m=\varphi(\tau)$ на ділянці II пояснюється тим, що з напрацюванням виникають відмови, викликані, крім зносу, втомним, корозійним руйнуванням або пластичними деформаціями. Приробіткою називають процес зміни геометрії поверхонь тертя і фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, зазвичай виявляється при постійних зовнішніх умовах в зменшенні сили тертя, температури і інтенсивності зношування. Процес приробітку характеризується інтенсивним відділенням з поверхонь тертя продуктів зносу, підвищеною тепловіддачею і зміною мікрогеометрії поверхонь.

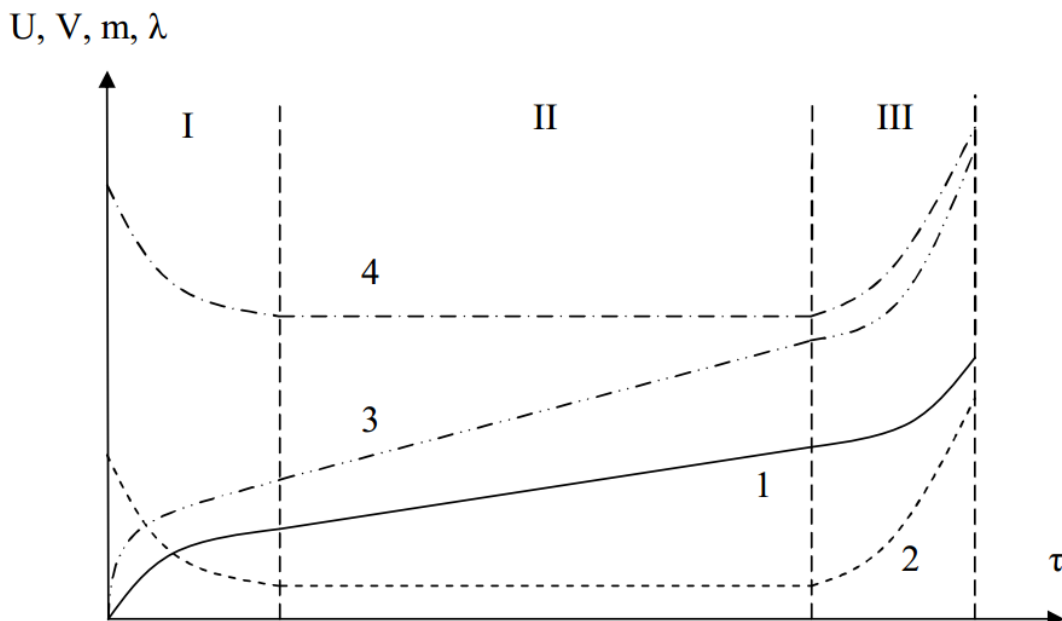


Рис. 4.1 – Зміна параметрів сполучення в процесі роботи: 1 – зносу U ; 2 – швидкості зношування V ; 3 – частоти відмов m ; 4 – інтенсивності відмов λ

При правильному виборі співвідношення твердості деталей і режимів приробітку досить швидко настає період так званого нормального, або усталеного зношування (рис. 4.1, ділянка II). Цей період характеризується невеликою, приблизно постійною, інтенсивністю зношування та триває до тих пір, поки зміни розмірів або форми деталей не вплинуть на умови їх роботи, або до настання межі втоми матеріалу. Накопичення змін геометричних розмірів і фізико-механічних властивостей деталей веде до погіршення умов роботи сполучення. Основним фактором при цьому є підвищення динамічних навантажень внаслідок збільшення зазорів в парах, що труться. В результаті настає період катастрофічного, або прогресивного зношування (рис. 4.1, ділянка III). Описана закономірність є умовною і служить лише ілюстрацією процесу зношування елементів машин.

4.4. Методи визначення зносу

1) Метод мікрометрірування. Метод заснований на вимірюванні при допомозі мікрометра або вимірювального приладу з індикатором параметрів до і після зношування.

Недоліки методу: неминуче розбирання та збирання виробів до і після роботи з метою вимірювання деталі; виявлення зміни розміру може бути наслідком не тільки зношування поверхні, але і результатом деформації деталі; розбирання та збирання виробів в процесі експлуатації різко знижує експлуатаційні якості машин.

2) Метод штучних баз. Полягає в тому, що на поверхні видавлюють або вирізують поглиблення заданої форми (піраміда або конус) і глибини. Спостерігаючи за зміною розміру відбитка, співвідношення якого з глибиною заздалегідь відомо, можна визначити місцевий лінійний знос. Використовуються спеціальні прилади, що дозволяють визначати з точністю від 1,5 до 2 мкм для отворів циліндрів двигунів, валів, а також плоских поверхонь. Недолік методу – також вимагає в більшості випадків попереднього розбирання виробів і тому має ті ж недоліки, що і метод мікрометрірування.

3) Метод вимірювання зносу по зменшенню маси. Заснований на зважуванні деталі до і після зношування. Зазвичай застосовується при випробуванні деталей невеликої маси. Недолік методу – може виявитися неприйнятним, коли знос відбувається внаслідок не тільки відділення частинок, але і пластичного деформування.

4) Метод аналізу вмісту заліза в маслі. Заснований на хімічному аналізі золи, одержуваної спалюванням проби масла. За період між двома послідовними відборами проб враховують загальну кількість масла в картері, його втрату і кількість доливаного масла. Даний аналіз є інтегральним, так як продукти зносу зазвичай відокремлюються одночасно від декількох деталей, що труться. Точне визначення кількості заліза ускладнюється тим, що великі частинки продуктів зносу можуть осідати на стінках картера.

5) Метод радіоактивних ізотопів. Полягає в тому, що в матеріал досліджуваної деталі вводять радіоактивний ізотоп. При цьому разом з продуктами зносу в масло буде потрапляти пропорційна їм кількість атомів радіоактивного ізотопу. За інтенсивністю їх випромінювання в пробі масла можна судити про кількість металу, що потрапив в масло за розглянутий період часу.

Переваги методу: визначається знос певної деталі, а не сумарний для декількох деталей; чутливість підвищується в сотні разів; прискорюється процес дослідження.

Недоліки методу: потрібна спеціальна підготовка зразків досліджуваних деталей; наявність спеціальної апаратури для вимірювання інтенсивності випромінювання і прийняття запобіжних заходів для охорони здоров'я людей.

5. КОРОЗІЙНІ РУЙНУВАННЯ

Корозією металів і сплавів називається їх мимовільне руйнування в результаті хімічної, електрохімічної взаємодії із зовнішнім середовищем, внаслідок якої вони переходять в окислений стан і змінюють фізико-механічні властивості. Автомобілі, які використовуються в умовах запиленості, високої вологості, температур, є яскраво вираженими об'єктами, схильними до корозійних руйнувань. При цьому найбільш характерними елементами є деталі з тонколистової сталі кузова, рами і підвіски, різьбові і зварні з'єднання, деталі паливної апаратури (випускні клапани, верхня частина гільз циліндрів і днища поршнів), газові трубопроводи.

5.1. Види корозії

Корозійні процеси в залежності від механізму взаємодії металу із середовищем діляться на два типи – хімічну і електрохімічну корозію, і 36 видів, найбільш часто зустрічаються з них наступні:

а) в залежності від характеру корозійного середовища:

– атмосферна, – газова, – рідинна, – підземна (грунтова), – біологічна;

б) в залежності від умов протікання корозійного процесу:

– структурна, – підповерхнева, – міжкристалічна, – контактна, – щілинна, – корозія під напругою, – корозійна кавітація, – фреттинг-корозія;

в) в залежності від виду корозійного руйнування:

– суцільна, – місцева (локальна).

Хімічна корозія – процес руйнування матеріалу в результаті безпосереднього впливу при високих температурах з киснем повітря, сірководнем, водяними парами.

Основною умовою виникнення хімічної корозії є відсутність електропровідного середовища, що нехарактерно для деталей автотранспортних засобів. Однак в деяких елементах кузова цю корозію можна спостерігати. Так руйнуються (прогорають) випускні труби і глушники, руйнуються елементи кузова, що безпосередньо примикають до випускного трубопроводу двигуна або до впускної труби.

Електрохімічна корозія виникає в результаті впливу на метал середовища (електроліту). Вона пов'язана з виникненням і перетіканням електричного струму з однієї поверхні на іншу. Інтенсивність процесу електрохімічної корозії залежить від доступу кисню до поверхні металу, хімічного складу сплаву, щільності продуктів корозії, які можуть різко сповільнювати електрохімічний процес структурної неоднорідності металу, наявності і розподілу внутрішніх напружень.

Газова корозія відбувається при високих температурах в середовищі агресивних газів при відсутності вологи.

Міжкристалічна корозія. Невидима неозброєним оком. Є руйнування металу між кристалами при дії знакозмінних навантажень.

Контактна корозія виникає при з'єднанні двох металів, мають різні потенціали, і при наявності електроліту.

Корозія під напругою виникає, коли деталь піддається корозії при динамічній або статичній напрузі.

Щілинна корозія особливо поширена в кузовах з огляду на те, що в них є велика кількість щілин і зазорів. Щілинна корозія розвивається в місцях постановки болтів, заклепок, в місцях точкового зварювання.

Корозійна кавітація характерна для тих деталей кузова, які піддаються впливу води, наприклад днище кузова.

Суцільна корозія виникає при експлуатації автомобілів в забрудненій атмосфері, починаючись на нижній поверхні днища, зсередини крил, і у внутрішніх порожнинах дверей і силових елементів (порогів, поперечок, підсилювачів). У середині салону вона зазвичай виникає під килимками підлоги.

Місцева корозія буває міжкристалічною і у вигляді виразок, точок, ниток. Корозія в вигляді виразок залишає на металі окремі осередки руйнування, в разі тонколистового металу – наскрізні.

Точкова корозія виникає на деталях, що мають плівки, і має вигляд точок.

5.2. Методи боротьби з корозією

Методи захисту від корозії умовно поділяються на три групи:

а) методи підвищення корозійної стійкості металів:

– нанесення лакофарбових, гальванічних (хромування, нікелювання, цинкування), хімічних (оксидування, фосфатування) або пластмасових (газополумневе, вихровий і інші способи напилення) захисних покриттів;

– використання сплавів, однорідних за складом або з легуючими добавками, наприклад, хрому, алюмінію, кремнію;

б) методи впливу на середу – герметизація сполучень, усунення зазорів, введення в середу експлуатаційних матеріалів антикорозійних присадок;

в) комбіновані методи.