

значення вихідних параметрів машини залежить від параметрів, що характеризують стан її окремих вузлів.

Вихід параметрів вузла за допустимі межі означає необхідність його заміни, ремонту або регулювання, тобто зупинки всієї машини. Тому параметрична відмова елементу або частини машини означає відмову функціонування для всієї машини або системи.

ТЕМА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ

3.1. Зміна властивостей і стану матеріалів

Зміна початкових властивостей і стану матеріалів з яких виконано виріб є першопричиною втрати ним працездатності, оскільки ці зміни можуть призвести до пошкодження виробу і до небезпеки виникнення відмови.

Чим досконаліше вивчені закономірності, які описують процеси зміни властивостей і стану матеріалів, тим достовірніше можна прогнозувати поведінку виробу в даних умовах експлуатації і забезпечити збереження показників надійності в необхідних межах.

В основі втрати машиною працездатності завжди лежать фізичні закони, але через велику різноманітність і перемінність діючих факторів, ці залежності мають імовірнісний характер.

Швидкість деякого процесу пошкодження матеріалу γ є функцією цілого ряду параметрів z_1, z_2, z_3 і часу t ,

$$\gamma = \frac{dU}{dt} = \phi(z_1; z_2; \dots; z_n; t)$$

Параметри z характеризують умови експлуатації (навантаження, швидкість, температуру) – зовнішні фактори і стан матеріалу (твердість, міцність, якість мікроструктури та поверхневого шару) – внутрішні фактори, що впливають на протікання процесу пошкодження матеріалу.

Знання фізичної закономірності процесу дає значно кращі можливості оцінки процесу у порівнянні з оцінкою цього процесу лише на основі статистичних спостережень.

Функціональна залежність зазвичай абстрагує дійсність і відображає фізичну суть процесу з певним ступенем наближення, але в той самий час дозволяє передбачити можливий хід процесу при різноманітних ситуаціях.

Так, підстановка в рівняння середніх значень аргументів дає уяву про математичне сподівання випадкової функції, що описує процес, а за дисперсією випадкових аргументів можна оцінити дисперсію випадкового процесу.

3.2. Фізична природа виникнення відмов

Як фізичні закони, так і одержані на їх основі часткові залежності, що описують зміну властивостей і стану матеріалів, можна розділити на дві основні групи.

По-перше, це закономірності, що описують взаємозв'язки процесів, які не є незворотними, коли після припинення дії зовнішніх факторів матеріал (деталь) повертається до вихідного стану. Ці залежності називають *законами стану*.

По-друге, є закономірності, які описують незворотні процеси і, відповідно, дозволяють оцінити ті зміни початкових властивостей матеріалу, які відбуваються в процесі експлуатації виробу. Ці залежності називають *законами старіння*.

Закони стану поділяються на *статичні*, коли у функціональну залежність, що описує зв'язок між вхідними і вихідними параметрами, фактор часу не входить, і на *перехідні процеси*, де враховується зміна вихідних параметрів у часі.

Типовими законами статичних законів стану є закон Гука, закон теплового розширення твердих тіл та інші.

Так, для найпростішого випадку визначення деформації Δl однорідного стержня довжиною l , який розігріто до надлишкової температури θ , при його розтягненні силою P одержимо:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} + l\alpha\theta,$$

де E – модуль пружності матеріалу стержня;

F – площа поперечного перерізу;

α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стержня.

Після зняття зовнішніх впливів (температури і навантаження) стержень повернеться у вихідне положення ($\Delta l = 0$). Якщо стержень є елементом конструкції, то його деформація не повинна перевищувати допустимого значення $\Delta l < \Delta l_{\text{доп}}$.

Статичні закони, які описують зміни стану виробу, хоч і не включають фактор часу, можуть бути використані для розрахунків надійності, якщо відомі зміни характеристик виробу в процесі експлуатації.

Так, якщо з причини зносу окремих спряжень машини через деякий час збільшується тепловиділення і зростають навантаження в окремих ланках, тобто $\theta = \theta(t)$ і $P = P(t)$, то відповідно буде змінюватись і деформація $\Delta l(t)$, яка може бути визначена за допомогою вищезгаданої формули.

Закони стану, що описують перехідні процеси, наприклад, коливання пружних систем, процеси теплопередачі та інші хоча і враховують фактор часу, але не враховують тих змін, що відбуваються при експлуатації виробу. Зазвичай вони відносяться до категорії процесів, що протікають швидко, або процесів середньої швидкості. Лише при відомій зміні рівня зовнішніх впливів їх можна використовувати для вирішення задач надійності.

3.3. Закони старіння

Для оцінки втрати виробом працездатності головне значення мають закони старіння, які розкривають фізичну суть незворотних змін, що протікають в матеріалах виробу.

Хоча закони старіння завжди пов'язані з факторами часу, у деяких із них час безпосередньо не фігурує, а враховується вплив інших факторів (наприклад енергії), яка в свою чергу проявляється в часі. Такі залежності називають законами перетворення. Типовим прикладом законів перетворення можуть служити залежності, що описують процеси корозії. Вивести залежності, які безпосередньо відображають зміну величини корозії в часі досить важко, оскільки велика кількість факторів протилежно впливає на інтенсивність пошкодження, а сама корозія може мати багато проявів (рівномірна, місцева, міжкристалічна).

Закони старіння, що оцінюють ступінь пошкодження матеріалу у функції часу дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, оцінювати можливі його реалізації і виявляти найбільш вагомні фактори, які впливають на інтенсивність процесу.

Типовим прикладом таких залежностей є закони зношування матеріалів, які на основі розкриття фізичної картини взаємодії поверхонь дають методи для розрахунку інтенсивності процесу зношування, або величини зносу у функції часу і оцінюють параметри, що впливають на хід процесу.

3.4. Поверхневий шар і його параметри

Будова поверхневого шару і його стан визначають процеси, що виникають при взаємодії з іншим тілом або з навколишнім середовищем, наприклад, при зношуванні, контактній деформації, втомі, корозії та ін. Крім того, багато видів руйнувань всього тіла деталі починається з поверхні і залежить від її стану.

Вплив параметрів поверхневого шару на працездатність деталі викликаний наступними причинами:

1. Поверхневі шари твердого тіла мають надлишок енергії, оскільки молекули і атоми, що знаходяться біля поверхні мають вільні зв'язки, які сприяють виникненню таких явищ як поглинання (адсорбція), зчеплення (когезія), прилипання (адгезія), та інших видів взаємодії з об'єктами зовнішнього середовища.

2. Поверхневий шар формується в результаті різноманітних технологічних процесів, які не тільки утворюють необхідну форму поверхні і змінюють властивості матеріалу, але і викликають рід побічних явищ біля його поверхні. Фізико-хімічні параметри поверхневого шару, його структура і напружений стан, як правило, відчутно відрізняються від властивостей всього матеріалу

3. В процесі експлуатації відбувається безперервна зміна параметрів поверхневого шару, зі значно вищою інтенсивністю, ніж зміни, що відбуваються у решті об'єму.

Тому більшість відмов пов'язані з процесами, що протікають в поверхневих шарах і їх природа не може бути пояснена без аналізу тих змін, які відбуваються в поверхневому шарі під час експлуатації виробу.

3.5. Поверхневі явища, при наявності змащування

Для характеристики стану поверхневого шару необхідно враховувати поверхневі явища, які мають місце при наявності змащувальних і поверхнево-активних речовин. Шар мастила утворює біля поверхні твердого тіла особливу структуру.

Змащувальні речовини утворюють тонкі плівки газів, парів з орієнтованими шарами молекул, які адсорбуються на поверхні твердого тіла.

Адсорбційні плівки призводять до ефекту пластифікації, тобто полегшують пластичну текучість зерен, що розміщені у поверхневому шарі, оскільки адсорбований шар знижує поверхневий натяг металу.

Крім того, потрапляючи в мікротріщини, мастило чинить розклинюючу дію і може знизити міцність твердого тіла.

Таким чином, поверхневі шари твердого тіла мають складну структуру в наслідок процесів виробництва і процесів взаємодії з навколишнім середовищем при експлуатації виробу.

Параметри, які характеризують стан поверхні, включають її геометричні, механічні, фізичні, хімічні структури та інші показники і їх зміни в процесі експлуатації при протіканні різноманітних процесів старіння, багато в чому визначають надійність виробу.

3.6. Класифікація процесів старіння

Оскільки процеси старіння характеризуються складними та різноманітними явищами, що відбуваються у матеріалах деталей машин, їх класифікацію доцільно проводити в залежності від зовнішніх проявів до яких призвів даний процес. За зовнішнім прояву процесу (деформація, знос, зміна властивостей) можна судити про ступінь пошкодження матеріалу деталі, а також оцінити близькість виробу до граничного стану.

Класифікуючи незворотні процеси старіння, необхідно також визначити ту зону, в якій проявляється даний процес, тобто, чи він охоплює весь об'єм матеріалу деталі, чи проявляється лише у поверхневих шарах чи протікає при контакті двох спряжених поверхонь.

В табл. 3.1. приведена класифікація процесів старіння за їх зовнішнім проявом та вказані основні різновиди кожного процесу

Таблиця 3.1 – Класифікація процесів старіння за їх зовнішнім проявом

Об'єкт		Зовнішній прояв процесу	Різновиди процесу
Тіло деталі (об'ємні явища)		Руйнування	Крихке руйнування, в'язке руйнування
		Деформація	Пластична деформація, короблення
		Зміна властивостей матеріалу	Зміна: структури, механічних властивостей, хімічного складу, магнітних властивостей, газопроникливості, забрудненість рідини (паливо, мастило)
Поверхня деталі (поверхневі явища)	Деталь	Роз'їдання	Корозія, ерозія, кавітація, прогар, утворення тріщин
		Наріст	Налипання (адгезія, когезія, адсорбція, дифузія), нагар
		Зміна властивостей поверхневого шару	Зміна: шорсткості, твердості, відбиваючої спроможності, напруженого стану
	Пара	Знос	Знос (стирання), втома поверхневих шарів, зминання, перенос матеріалу

		Зміна умов контакту	Зміна: площі контакту, глибини проникнення мікронерівностей, суцільності змащувального шару
--	--	---------------------	---

3.7. Типові закономірності протікання процесів старіння

Оцінка швидкості протікання процесу пошкодження деталі в часі $\gamma = \frac{dU}{dt}$ є необхідним етапом при розв'язанні задач надійності. Знаючи часову характеристику $\gamma(t)$ можна визначити ступінь пошкодження як функцію часу, яка, в свою чергу буде визначати зміни у часі вихідного параметра виробу

$$U(t) = \int_0^t \gamma(t) dt.$$

Оскільки при старінні відбуваються незворотні процеси, то залежність, як правило, буде монотонно неспадаючою функцією. Виключенням є випадок, коли ступінь пошкодження характеризується зміною фізико-хімічного фактору, що оцінює властивість матеріалу: твердість, границя міцності, хімічний склад, структура. В цьому випадку величина пошкодження U може як зростати, так і спадати, а швидкість процесу змінювати знак.

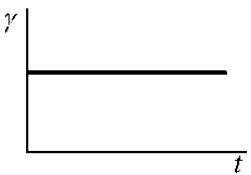
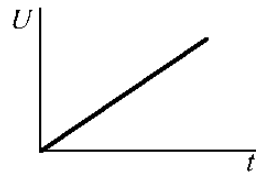
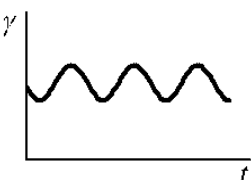
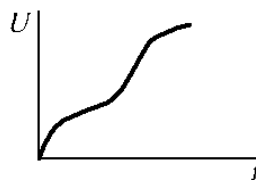
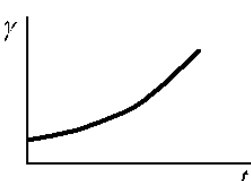
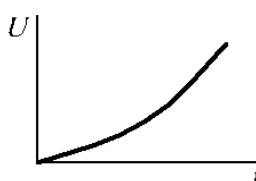
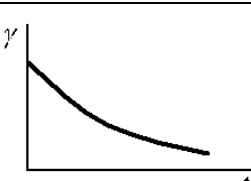
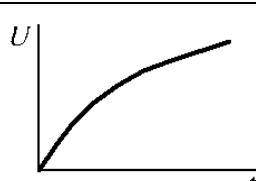
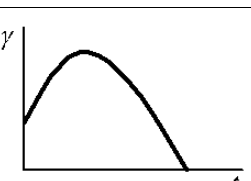
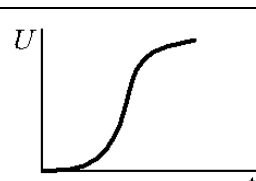
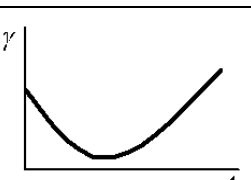
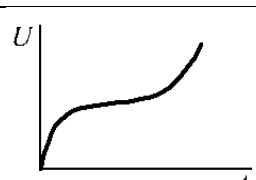
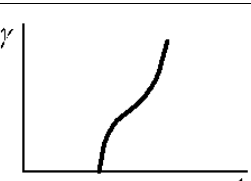
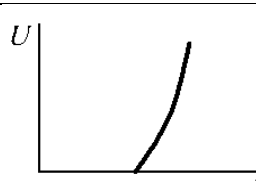
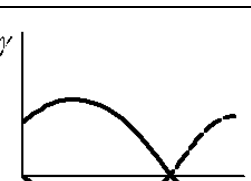
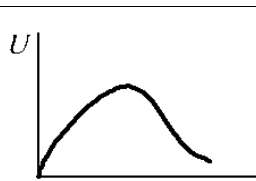
Слід пам'ятати, що процеси старіння є випадковими і закономірність їх протікання – це математичне сподівання даної випадкової функції або її реалізації.

Типові закономірності протікання процесів старіння у часі, що представлені в таблиці 3.2 відносяться до одностадійних процесів, коли на протязі періоду, який розглядає фізико-хімічна картина процесу не змінюється.

Найбільш просто протікають стаціонарні процеси, коли швидкість процесу постійна, або коливається відносно середнього значення. Це відбувається у випадку коли всі фактори, що впливають на інтенсивність процесу стабілізувались.

В цьому випадку залежність $U(t)$ має лінійний, або близький до нього характер.

Таблиця 3.2 – Типові закономірності протікання в часі процесів старіння

Процеси за γ характеристикою		$\gamma(t) = \frac{dU}{dt}$	$U(t)$	Приклади
Стационарні	Постійні			Знос $U = kt$
	Псевдо-стационарні			Знос при змінних режимах
Монотонні	Зростаючі			Знос при засміченні поверхонь $U = kt^n, n \geq 1$ $U = A(e^{kt} - 1)$
	Спадаючі			Знос в період припрацювання $U = kt^n, n \leq 1$ $U = A(1 - e^{-kt})$
Екстремальні	З максимумом			Корозія, короблення $\gamma = ate^{-bt}$
	З мінімумом			Повзучість, знос, корозія
Із запізненням				Втома, крихке руйнування
Знакозмінні				Зміна механічних характеристик

Якщо при старінні виникають фактори, які прискорюють або уповільнюють швидкість протікання зносу, тобто γ змінюється монотонно,

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 $\chi(t)$ 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.