

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Бельяас І.В.

**Конспект лекцій**  
навчальної дисципліни “Надійність

та довговічність обладнання” для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування за освітньо-професійною програмою Галузеве машинобудування

Затверджено редакційно-видавничою  
секцією науково-методичної ради ДДТУ  
19.10.2017р., протокол № 8

Кам’янське

**2017**

Конспект лекцій з навчальної дисципліни “Надійність та довговічність обладнання” для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування за освітньо-професійною програмою Галузеве машинобудування / укл. Бельмас І.В., Кам’янське: ДДТУ, 2017 р., стор. 38

Укладач: д.т.н., професор Бельмас І.В.

Відповідальний за випуск зав. каф. ТМ Бельмас І.В.

Рецензент зав каф. Бей гул О.О.

Затверджено на засіданні кафедри “Технологія машинобудування”  
20.09. 2017 р. Протокол № 3

Коротка анотація Конспект лекцій надає систематизовану теоретичну інформацію з питань надійності та довговічності механічного обладнання. Вміщують приклади розв’язання задач, контрольні питання. Матеріал викладено доступно, послідовно Конспект, разом з рекомендованою літературою дозволяє оволодіти питаннями надійності та довговічності в машинобудуванні.

ВСТУП	4
1. НАДІЙНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ	4
1.1 Терміни теорії надійності	5
1.2 Фактори, що впливають на надійність устаткування	6
1.3 Загальні відомості про методи оцінки надійності	9
1.4 Статистична оцінка параметрів розподілу випадкових величин	11
1.5 Надійність елементів	13
1.6 Надійність систем	15
1.7 Надійність у залежності від розподілу міцності та навантаження	17
1.8 Шляхи забезпечення надійності	17
1.9 Техніко-економічна ефективність надійності	22
Контрольні питання	24
2. ВИТРИВАЛІСТЬ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	25
2.1 Утрата працездатності машини внаслідок втоми матеріалу	
2.2 Основні характеристики циклу та межа витривалості	30
2.3 Розрахунки на витривалість	34
Контрольні питання	35
ЛІТЕРАТУРА	36

## ВСТУП

Згідно освітньої програми в процесі вивчення дисципліни «Надійність та довговічність обладнання» здобувачі вищої освіти мають здобути наступні компетентності

Здатність використовувати знання у практичних ситуаціях.

Здатність навчатися та оволодівати сучасними знаннями.

Здатність працювати самостійно та у складі команди, мотивуючи на досягнення спільної мети.

Здатність удосконалювати аналітичні методи та комп'ютерні програмні засоби для розв'язування інженерних завдань галузевого машинобудування, зокрема, в умовах технічної невизначеності.

Здатність застосовувати та вдосконалювати наявні кількісні математичні, наукові й технічні методи, а також комп'ютерні програмні засоби для розв'язування інженерних завдань галузевого машинобудування.

Здатність втілювати передові інженерні розробки для отримання практичних результатів.

Здатність застосовувати норми галузевих стандартів.

Здатність застосовувати системний підхід для розв'язання інженерних завдань.

На набуття здобувачами вищої освіти вказаних компетенцій разом з методичними вказівками, наведеною літературою і спрямований конспект

лекцій.

## 1. НАДІЙНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ

Виробом у машинобудуванні називається предмет виробництва, який є кінцевим продуктом машинобудівного процесу: машина, агрегат та ін. Вироби розділяють на деталі (елементарна, неподільна частина машини) і складальні одиниці (дві і більше з'єднаних між собою деталей) – вузли, механізми тощо.

Найбільш повною характеристикою машини (виробу) є якість, тобто сукупність властивостей виробу, які визначають його здатність задовольняти зумовлені потреби людини, виробництва тощо. Досі немає певних кількісних показників якості, тому її визначають непрямими показниками: технічними (потужність, продуктивність, ККД та ін.); технологічними (технологічність конструкції, тобто ступенем довершеності конструкції виробу з точки зору найбільш ефективного його виготовлення або ремонту; експлуатаційними (надійність, ергономічність, естетичні характеристики), які показують ступінь довершеності машини в експлуатації; економічними (собівартість, капіталовкладення на виробництво й експлуатацію виробу та ін.).

Важливим показником виробу (машини, складальної одиниці) є рівень якості – відносна характеристика, що ґрунтується на порівнянні показників якості відремонтованого виробу з відповідними показниками нового або кращого, обраного за взірець аналогічного виробу.

При ремонті машин необхідно підвищувати рівень якості за рахунок удосконалення технології й організації виробництва, впровадження нових, високоефективних способів відновлення і зміцнення деталей, прогресивного обладнання, наукової організації праці тощо.

### 1.1 Терміни теорії надійності

Основна з споживчих характеристик машини - це надійність - її властивість виконувати задані функції за умови виконання правил експлуатації, догляду, зберігання.

Теорія надійності вивчає причини й закономірності виникнення відмов, методи розрахунку показників, та забезпечення надійності виробу під час проектування, виготовлення та експлуатації виробу. Стандарт ГОСТ 13377-75 "Надійність у техніці. Терміни та значення". Установлює ряд понять надійності.

В теорії надійності всі вироби розглядаються, як:

система - сукупність сумісно діючих елементів виробу, які виконують конкретну технологічну функцію;

елемент - складова частина системи;

відновлювальна система - система, яка у випадку відмови може бути відновлена;

не відновлювальна система - система, яка у випадку відмови не піддається відновленню.

Решту термінів наведено в таблиці 1.1.

## 1.2 Фактори, що впливають на надійність устаткування

В існуванні машини можна виділити три основних періоди: проектування, виготовлення та експлуатації. Кожен із цих періодів впливає на надійність, яка проявляється лише на останній стадії.

Таблиця 1.1 – Окремі терміни теорії надійності

Термін	Значення	Примітка	Оцінка	
			статистична	імовірнісна
1	2	3	4	5
Відмова	Подія, яка полягає у втраті повністю, або частково працездатності	Відмова характеризується інтенсивністю частотою потоком	$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)}$ $a(t) = \frac{n}{N_0 \Delta t}$ $\omega(t) = \frac{n}{N' \Delta t}$ <p><math>N(t)</math> - кількість елементів на час <math>t</math> та <math>t + \Delta t</math>, відповідно, що не відмовили  <math>n</math> - кількість відмов за період <math>\Delta t</math>, <math>N_0</math> - кількість елементів на початок випробувань  <math>N'</math> - кількість відновлених після відмови <math>n</math> виробів</p>	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$
Напрацювання	Термін функціонування об'єкта	Визначається в обсягах виконаної роботи (за добу, місяць) до першої відмови або поміж відмовами	$\bar{t}_{\text{нб}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ <p><math>t_i</math> - напрацювання до відмови під час випробування <math>n</math> об'єктів</p>	$\bar{t}_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt$ <p><math>f(t)</math> - щільність ймовірностей відмов</p>
Безвідмовність	Властивість об'єкту зберігати працездатність	Ймовірність безвідмовності	$P(t) = \frac{N(t)}{N}$ <p><math>N(t)</math> - кількість виробів працездатними до кінця напрацювання</p>	$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt$ <p>для ремонтів за період від <math>t_1</math> до <math>t_2</math>;  <math>P(t_1 - t_2) = e^{[F(t_2) - F(t_1)]}</math></p>

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Довговічність	Властивість об'єкту зберігати працездатність	Ресурс середній	$\bar{t}_{\text{наб}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$	$\bar{t}_{\text{саб}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt$
Ремонтпридатність	Властивість об'єкту (з перервами на ремонт і технічне обслуговування)	Середній термін відновлення	$\bar{t}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$	
		Вартість експлуатації	$C_v = C_{\text{в1}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{від}}$ $C_{\text{в1}}$ - вартість, яка не залежить від відмов; $C_{\text{від}}$ - вартість усунення відмови	
Ресурс	Напрацювання від певного моменту до крайнього стану		$\bar{t}_{\text{наб}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$	$\bar{t}_{\text{наб}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt$
Імовірність безвідмовної роботи	Імовірність того, що при заданому напрацюванні відмови об'єкту не буде		$P(t) = \frac{N(t)}{N}$	$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt$ , де $f(t)$ - щільність ймовірності відмов

Реальні деталі мають складну форму, яка впливає на розподіл механічних навантажень. Тому при розрахунках форму деталей спрощують. А це також веде до зниження точності розрахунків.

З викладеного можна зробити висновок, що дійсні механічні напруження практично неможливо передбачити, що впливає на надійність виробу. Зважаючи на приведене треба пам'ятати, що збільшення коефіцієнтів запасу міцності не завжди призведе до зменшення напружень особливо у випадках динамічного навантаження (пуск, гальмування), оскільки при зростанні розмірів зростають і маси рухомих деталей. Крім того збільшення розмірів деталей призведе до збільшення їх вартості та масштабного фактору.

Велике значення при проектуванні машини має вибір матеріалу деталей. Загалом, міцніші матеріали менше пластичні, в цих матеріалах більше виникає тріщин особливо при циклічних та ударних навантаженнях. В той же час ці матеріали добре витримують контактні навантаження при статичних навантаженнях, зносостійкі. Матеріали з меншою міцністю практично мають

протилежні властивості. Тому вживаються в інших випадках. Але в практиці виникає потреба забезпечувати достатню міцність і придатність сприймати змінні навантаження. В цих випадках уживають спеціальне термічне або інше оброблення. В останні часи широко вживають композитні матеріали, властивості яких можна забезпечити під час їх виготовлення. Такими матеріалами є матеріали на основі високоміцних волокон.

При проектуванні машин та механізмів слід враховувати вплив різних конструктивних факторів таких, як проточки, галтелі, отвори, тобто таких конструктивних елементів, які зумовлюють зміну форми деталі в межах невеликого її обсягу. В таких місцях виникає нерівномірний розподіл механічних напружень, який у техніці враховують коефіцієнтом концентрації напружень. На значення коефіцієнта впливає не тільки зміна форми, а і зміна характеру навантаження. Так при посадках втулок із натягом між втулкою та валом виникають нормальні напруження. Вони мають місто між валом та втулкою. Та їх нема за межами втулки. Тобто на межі втулки буде мати місце різка зміна навантаження. Це і призведе до появи концентрації напружень. Водночас, для деталей машин, які працюють в умовах динамічного навантаження фіксація взаємного розташування деталей без посадок із натягом майже неможлива.

З метою попередження поломок деталей машин та механізмів на етапі проектування в машинах передбачають запобіжні пристрої. Пристрої можуть мати руйнівний елемент. Запас міцності цих елементів близький до одиниці. При перевантаженнях ці деталі першими виходять із ладу і тим самим не дають можливості перевантажитись іншим деталям. Запобіжні деталі роблять якомога простішими за формою та з не дуже дорогого матеріалу. До таких деталей слід віднести втулки, стакани, зрізні болти, муфти, шпинделі тощо. В електричних схемах приводів передбачають тепловий та максимальний захист, які захищають двигун від перевантаження та перегрівання.

Кожне з перерахованих явищ не детерміноване, воно випадкове. Тому на надійність обладнання впливає велика кількість випадкових факторів, які треба враховувати на стадіях проектування, виготовлення та експлуатації машин та механізмів.

З викладеного видно, що надійність машини повинна базуватися на використанні оптимального співвідношення властивостей матеріалу, конструкції машини.

На стадії виготовлення надійність суттєво залежить від якості виготовлення - від якості відлитих елементів (відсутність раковин, неметалевих домішків, які можуть сприяти зародженням тріщин втоми), забезпечення точних розмірів деталей, чистоти поверхні, якості термічної обробки, захисту деталей від шкідливого впливу агресивних середовищ.

Від того, як використовується механізм під час його експлуатації суттєво залежить і термін його роботи. Для того щоб надійно робила машина, треба виконувати правила технічної експлуатації, сировина за своїми властивостями повинна відповідати технічним можливостям машини, експлуату-

вати машину повинні люди, що знають правила її експлуатації, своєчасно та якісно виконували би огляд, технічне обслуговування та ремонт машини.

Сукупність властивостей машини, набутих нею при її створенні, характеризують її якість. Показники якості машини поділяють на дві групи - виробничо-технічні та експлуатаційні. Показники першої групи характеризують машину, як об'єкт виготовлення в реальних умовах машинобудівного підприємства. Показники другої групи характеризують експлуатаційні властивості машини. До їх складу входять показники технічного рівня, надійності, естетична та ергономічна характеристики.

### 1.3 Загальні відомості про методи оцінки надійності

Теорія надійності при розгляді властивостей випадкових процесів, з якими вона оперує, базується на математичному апараті теорії ймовірності та математичної статистики. Теорія ймовірності оперує поняттям "подія". Подія - це факт, який може відбутися або не відбутися. Ймовірність події А, яка позначається  $p(A)$  є співвідношення кількості сприятливих випадків  $m$  до можливих  $n$ :

$$p(A)=m/n. \quad (1.1)$$

На практиці вірогідність появи події визначають за результатами статистичних іспитів. Відношення кількості фактичних появ подій  $M$  до кількості іспитів  $N$  уявляє частоту  $W(A)$ :

$$W(A)=M/N. \quad (1.2)$$

При достатньо великій кількості іспитів частота близька до теоретичної ймовірності події.

Випадкові події бувають несумісні, єдино можливі, рівно можливі, залежні. Несумісні події це події, при яких виникнення однієї події унеможливує виникнення іншої. Єдиноможливі події - події, поява яких обов'язкова. Однаково можливі події - події, поява яких однаково ймовірна. Залежні події - події, які залежать від появи інших подій. Незалежні події не залежать від появи чи від не появи інших подій.

Якщо події А та В несумісні, то вірогідність їх суми дорівнює сумі ймовірностей:

$$p(A+B)=p(A)+p(B). \quad (1.3)$$

В частотах

$$W(A+B)=(M_1+M_2)/N=M_1/N+M_2/N =W(A)+W(B). \quad (1.4)$$

Випадкові величини бувають дискретними та неперервними. Дискретна випадкова величина - випадкова величина, яка може приймати окреме ізольоване значення з певною вірогідністю, називається дискретною. Всі можливі значення випадкової величини та відповідні їм ймовірності  $p$  уявляють собою закон розподілу.

Загальна кількість значень ймовірностей випадкової величини як системи несумісних подій дорівнює 1, тобто



$$\sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (1.5)$$

Закон розподілу дискретної випадкової величини подають у вигляді таблиць, графіків або гістограм. Функція розподілу випадкової величини має вигляд

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i < x} P_i. \quad (1.6)$$

Функція розподілу випадкової величини для фіксованих значень на працювання частіше описується біноміальним розподілом та розподілом Пуассона. Випадкова величина, розподілена за біноміальним законом якщо вона приймає цілі позитивні значення  $n$  з імовірністю  $p$  ( $m$ ), що визначається формулою Бернуллі. Вірогідність того, що випадкова величина  $m$  не перевершить заданого значення  $m'$ , визначається формулою

$$P(m \leq m') = \sum_{m=0}^{m'} C_n^m P^m (1-p)^{n-m}, \quad (1.7)$$

$$C_n^m = \frac{n!}{m! (n-m)!}.$$

Випадкова величина  $X$  розподілена за законом Пуассону, якщо ймовірність того, що вона прийме значення  $x$ , визначається рівнянням

$$P(x) = \frac{1}{x!} a^x e^{-a}, \quad (1.8)$$

де  $a$  - параметр розподілу.

Неперервна випадкова величина - випадкова неперервна величина називається неперервною, якщо вона може приймати всі значення з деякого кінченного або безкінченного проміжку. Для кількісного оцінювання розподілу неперервної випадкової величини використовують ймовірність того, що  $X=x$ , а ймовірність події  $X < x$ .

Інтегральна функція або функція розподілу

$$F(x) = P(X < x). \quad (1.8)$$

Неперервна випадкова величина характеризується кривою розподілу або графіком щільності ймовірності (диференційним законом розподілу), уявляє собою похідну від функції розподілу

$$f(x) = F'(x). \quad (1.9)$$

Функція розподілу через щільність імовірності

$$F(x) = \int f(x) dx. \quad (1.10)$$

Імовірність того, що  $X$  попаде на відрізок від  $a$  до  $b$

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx. \quad (1.11)$$

Успішне розв'язання питань надійності обладнання можливе лише за умови проведення досліджень із відбором та аналізом статистичної інформації про відмови обладнання. Більш об'єктивні данні дає дослідження надійності виконане безпосередньо в процесі експлуатації обладнання. В цьому випадку дослідження зводиться до збору даних про відмови обладнання, встановлення вигляду закону розподілу відмов до якого дійсний закон мож-

на віднести, оцінки відповідності між цими законами, визначенню параметрів закону відмов та оцінки надійності дослідженого об'єкту.

Оцінку надійності можливо виконувати звітним, кореспондентським, анкетним способом та способом безпосереднього спостереження.

Звітний спосіб полягає у використанні відомостей відмов за звітний період складений працівниками виробництва. Кореспондентський спосіб використовується для дослідження поодиноких об'єктів за результатами письмових відповідей підприємства, яке використовує обладнання на запитання того, хто виконує дослідження надійності. Анкетний спосіб схожий з попереднім, але запитання надсилаються на якомога більшу кількість підприємств. Спосіб безпосереднього спостереження полягає в дослідженні та спостереженні за попередньо розробленою програмою.

#### 1.4 Статистична оцінка параметрів розподілу випадкових величин

Отримані результати спостережень випадкові. У своїй сукупності характеризують явище, що підлягало дослідженню опосередковано через параметри розподілу випадкової величини. Основні параметри розподілів наведено в таблиці 1.2.

Отримані дані про відмови систематизують у вигляді варіаційного ряду. Для чого діапазон значень випадкової величини розділяють на інтервали (в основному на 7-12). Інтервали краще прийняти рівними.

Для кожного інтервалу  $\Delta t$  визначають:  $n_i$  - кількість випадкових величин, що потрапили у інтервал; частоту попадання до інтервалу  $P_i^* = n_i / N$ ;  $N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$ .

За значеннями  $P_i^*$  будують гістограму (рис. 1.1)

З урахуванням характеру розподілу випадкової величини висувають гіпотезу про найбільше придатний для розподілу випадкової величини теоретичний закон розподілу. На основі визначених параметрів розподілу визначають закон розподілу. Найбільш уживані закони розподілу наведені у таблиці 1.3.

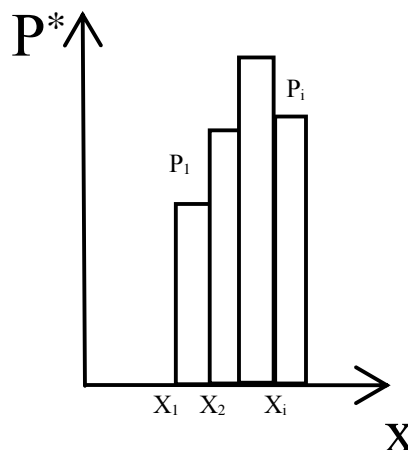


Рис. 1.1 Гістограма статистичного ряду випадкової величини

Таблиця 1.2 - Основні параметри розподілу випадкової величини

Кількісна характеристика	Визначення	Позначення	Формула дискретної величини	Формула неперервної величини
Математичне сподівання	Сума добутків усіх можливих величин на ймовірність їх появи	$m_x$	$\sum_{i=1}^N x_i P_i = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$	$\int_{-\infty}^{\infty} x_i f(x) dx$
Мода	Значення випадкової величини, щільність ймовірності якої максимальна	$M$	-	$f(x)=\max$
Медіана	Середнє значення випадкової величини, для якої однаково ймовірно, буде вона меншою або більшою за медіану	$M_e$	-	$P(x < M_e) = P(x > M_e)$
Дисперсія	Ступень розсіювання випадкової величини навколо математичного сподівання	$D(x)$	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 P_i}{N-1}$	$\int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_x)^2 \times f(x) dx$
Середньо квадратичне відхилення	Характеристика розсіювання випадкової величини	$\sigma(x)$	$\sqrt{D(x)}$	$\sqrt{D(x)}$

Відповідність між фактичним та обраним теоретичним законом перевіряють за критеріями відповідності законів розподілу.

Перевірку відповідності можна робити, як для дискретних так і для безперервних розподілів. Існують декілька методів.

Графічний метод з використанням імовірнісного паперу, на якому криволінійні величини розподілу  $F(x)$  можна зобразити в вигляді прямих з допомогою імовірнісних шкал. Якщо емпірична функція близька до теоретичної, то експериментальні точки розташовуються навколо деякої прямої, яка відповідає теоретичному закону розподілу.

Перевірка за критерієм Пірсона ґрунтується на тому, що деяка величина  $U$ , яка залежить от квадратів розходження поміж теоретичним та емпіричними значеннями при кількості опитів  $n$  с величиною розподіленою за  $\chi^2$  - розподілом із  $k$  ступенями вільності:

$$U = n \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_i^*)^2}{P_i}$$

З урахуванням статистичних даних

$$U = \chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(m_i - nP_i^*)^2}{nP_i}$$

де  $m_i$  - кількість попадань випадкової величини в  $i$ -тий інтервал;  $k=n-1$ ;  $n$ -кількість інтервалів.

### 1.5 Надійність елементів

Елементи поділяють на не відновлювальні, для яких розглядають тільки первинні відмови та відновлювальні, для яких розглядають первинні та повторні відмови. Якщо для відновлювальних об'єктів розглядають тільки первинні відмови, то для них прийнятні формули для не відновлювальних об'єктів.

Таблиця 1.3 - Закони розподілу випадкової величини

Параметри	Закон				
	Показниковий	Нормальний	Вейбула	Гама-розподіл	Рівномірний
Інтегральна функція або функція розподілу, F(t)	$1 - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma(t)^2}} dt$	$1 - \left(\frac{t}{a}\right)^b$	$\frac{\lambda^m}{\Gamma(m)} \int_0^t m^{-1} e^{-\lambda t} dt$	$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_1}$
Щільність ймовірностей f(t)=F'(x)	$\lambda e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma(t)^2}}$	$\frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$	$\frac{\lambda^m t^{m-1}}{(m-1)!} e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{t_2 - t_1}$
Імовірність відмов, Q(t)	$1 - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma(t)^2}} dt$	$e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$	$1 - e^{-\lambda t} \times \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}$	$\frac{t - t_1}{t_2 - t_1}$
Функція надійності, P(t)	$1 - Q(t)$	$1 - Q(t)$	$1 - Q(t)$	$1 - Q(t)$	$1 - Q(t)$
Дисперсія, D(t)	$\frac{1}{\lambda^2}$	$\int_0^t t^2 f(t) dt$	$(ac_m)^2, c_m = \frac{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{b} + 1\right)}}{-b_m^2}$	$m/\lambda^2$	$\frac{(t_2 - t_1)^2}{12}$
Інтенсивність, $\lambda(t)$	$\lambda$ const	$\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \times \left[0,5 - \Phi\left(\frac{t-m}{s}\right)\right]^{-1}$	$\frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$	$\lambda(t) = f(t)/p(t),$	-

Надійність не відновлювальних об'єктів характеризується наступними показниками: ймовірністю безвідмовної роботи, середнім напрацюванням до відмови та інтенсивністю відмов, а також показником гама-процентного ресурсу.

*Приклад.* Спостерігали за відмовами  $N = 10$  підшипників кочення. Працювали вони до відмови відповідно 21, 42, 68, 36, 18, 49, 16, 22, 74 та 19 годин. Розрахувати ймовірність безвідмовної роботи на протязі 40 годин, інтенсивність відмов в період між 20 та 50 годинами та середнє напрацювання до відмови підшипника.

*Розв'язання.* Імовірність безвідмовної роботи для не відновлювальних об'єктів

$$P(t) = N(t)/N$$

Оскільки до терміна 40 годин проробило 4 підшипника 42, 68, 49 та 74

години то  $N(t) = 4$ . Загальна кількість підшипників 10, тобто  $N = 10$ .

З урахуванням величин маємо

$$P(t) = 4/10 = 0,4.$$

Інтенсивність відмов за період між 20 та 50 годинами

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t},$$

Оскільки до 20 та 50 годин відробило відповідно 7 та 2 підшипники, то  $N(t) = 7$ , а  $N(t + \Delta t) = 2$ . Параметр  $t = 30$  годин. З урахуванням цих величин маємо

$$\lambda(t) = \frac{7 - 2}{7 \cdot 30} = 0,0238 \text{ година}^{-1}.$$

Середнє напрацювання до відмови

$$T_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{21 + 42 + 68 + \dots + 74 + 19}{10} = 36,5 \text{ годин.}$$

*Приклад.* При дослідженні на знос  $N = 100$  зубцевих коліс на протязі  $t = 300$  годин вийшли з ладу 8 коліс. Визначити ймовірність безвідмовної роботи коліс на протязі 300 годин та 90 % ресурс роботи коліс за умовою, що час їх безвідмовної роботи підкоряється експоненційному (показниковому) закону з параметром  $\lambda = 0,03$  1/годину.

*Розв'язання.* Імовірність безвідмовної роботи коліс на протязі 300 годин

$$p(t) = N(t)/N,$$

В нашому випадку  $N(t) = 100 - 8$ .

З цього маємо

$$p(t) = 92/100 = 0,92.$$

90% ресурс роботи коліс  $t = t_{90}$  визначають за формулою

$$P(t_{90}) = \exp(-0,03t_{90}) \geq 90/100; \text{ звідки } \ln 0,9 = -0,03t_{90},$$

$$\text{а } t_{90} \geq 3,51 \text{ год.}$$

Це означає, що за час роботи 100 зубцевих коліс, на протязі якого ймовірність їх безвідмовної роботи буде не менше 0,9 складе не менше ніж 3,51 години.

## 1.6 Надійність систем

Розрізняють системи з двома видами сполучення елементів - основним (послідовним) та паралельним (резервуванням). Звернемо увагу на те, що ми в цьому випадку маємо справу не з кінематичною схемою, а з схемою взаємного впливу, яка дає змогу уявити умови за яких настає відмова системи.

При основній схемі сполучення (послідовній) відмова будь-якого елемента призведе до відмови системи. При паралельному сполученні елементів відмова відбудеться тільки тоді коли відмовлять один основний та паралельні йому елементи.

В деяких випадках система складається з декількох підсистем з основним та паралельним сполученням елементів. Такі системи комбіновані.

За характером обслуговування розрізняють не відновлювальні, відновлювальні, не обслуговувані та обслуговувані (періодично, випадково та з комбінованим обслуговуванням) системи.

Надійність не відновлювальних систем. При розрахунках надійності систем з основним сполученням елементів вважають, що відмови елементів не залежні. Тому ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку відповідних ймовірностей усіх її елементів

$$P_c(t) = P_1(t) P_2(t) \dots = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (1.12)$$

*Приклад.* Роторна (молоткова) дробарка (кінематична схема наведена на рис. 2.2) складається з 5 елементів, які поміж собою сполучаються послідовно та мають ймовірність безвідмовної роботи на протязі часу  $t$ : двигун  $P(t) = 0,98$ ; муфта швидкохідна  $P(t) = 0,99$ ; редуктор  $P(t) = 0,97$ ; муфта повільної ходи  $P(t) = 0,985$ ; ротор машини  $P(t) = 0,975$ . Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи.

*Розв'язання.* Відповідно до кінематичної схеми машини будуємо її структурну схему (рис. 2.3). На схемі позначені наступні елементи 1 – двигун, муфта швидкохідна - 2; редуктор - 3; муфта повільної ходи - 4; ротор дробарки - 5.

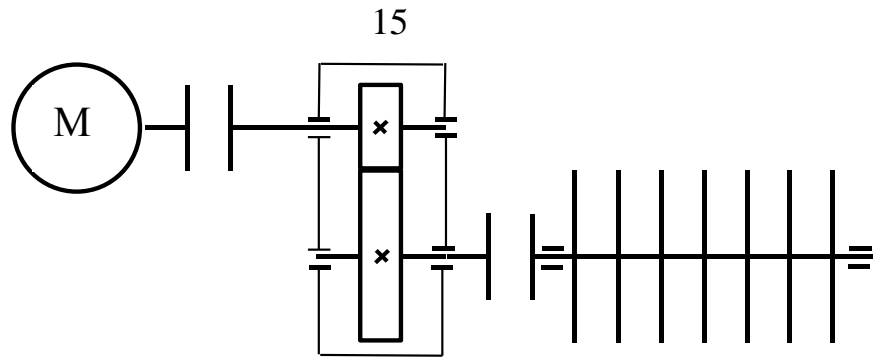


Рисунок 1.2 – Кінематична схема роторної дробарки

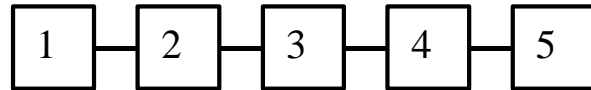


Рисунок 1.3 - Структурна схема роторної дробарки

Згідно схеми (рис. 1.3) усі елементи системи поєднані послідовно. Тому її надійність може бути розрахована за формулою (1.12).

$$P_c(t) = P \prod_{i=1}^5 P_i(t) = 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,985 \cdot 0,975 = 0,9.$$

При розрахунках безвідмовності систем із паралельним сполученням елементів спочатку визначають імовірність відмови системи, вважаючи, що надійність системи та останніх елементів не залежить від відмови одного з них. Тому ймовірність відмови за час  $t$  дорівнює

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \dots = \prod_{i=1}^N Q_i(t), \quad (1.13)$$

а ймовірність безвідмовної роботи

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t).$$

Окрім паралельного сполучення елементів, при якому відмова системи настає тільки у разі відмови усіх елементів, використовуються системи безвідмовності яких забезпечується за умови працездатності не менш, як  $r$  елементів із загальної кількості елементів  $n$ , а ймовірність безвідмовної роботи за час  $t$  визначається формулою

$$P_c = \sum_{i=r}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} P(t)^i [1-P(t)]^{n-i}. \quad (1.14)$$

*Приклад.* Розрахувати ймовірність безвідмовної роботи машини, яка налічує 6 паралельно встановлених елементів. Мінімальна кількість таких елементів, яка забезпечує безвідмовність роботи машини  $r=2$ , а ймовірність безвідмовної роботи кожного елементу  $P(t)=0,95$ .

*Розв'язання.* Згідно формули (1.14)

$$P_c(t) = \sum_{i=2}^6 \frac{6!}{i!(6-i)!} 0,95^i (1-0,95)^{6-i} = 0,999.$$

Наведений приклад показує, що при паралельному з'єднанні надійність системи вища за надійність окремих елементів, а при послідовному менша.

При розрахунках систем із комбінованим сполученням елементів спочатку розраховують надійність підсистем сполучених паралельно, а потім розраховують надійність системи, як складеної з елементів з'єднаних послідовно.

Надійність відновлювальних систем. Відновлювальні системи як і не відновлювальні можуть мати різну структурну побудову - з основним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів.

Відмова системи з основним з'єднанням настає при відмові одного з  $n$  її елементів; елемент після відмови відновлюється і таким чином відновлюється працездатність всій системі. В більшості випадках можна рахувати, що відмови та відновлення елементів незалежні. Тоді будемо мати  $n$  незалежних потоків відмов ( $i$  стільки ж відновлень), котрі складаючись, утворюють потік відмов та потік її відновлень.

Імовірність виникнення  $n$  відмов системи в проміжок часу від напруження  $t_1$  до  $t_2$  підраховується за формулою Пуассона

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{[\Omega(t_2) - \Omega(t_1)]^n}{n!} \exp\{-[\Omega(t_2) - \Omega(t_1)]\}, \quad (1.15)$$

$$\Omega(t_2) = \sum_{i=1}^k \Omega_i(t_2), \Omega(t_1) = \sum_{i=1}^k \Omega_i(t_1),$$

де  $\Omega(t_2), \Omega(t_1)$  - математичне сподівання кількості відмов;  $k$  - кількість елементів у системі.

Імовірність безвідмовної роботи системи у тому ж проміжку часу дорівнює

$$P_n(t_1, t_2) = \exp\{-[\Omega(t_2) - \Omega(t_1)]\}. \quad (1.16)$$

### 1.7 Надійність у залежності від розподілу міцності та навантаження

При звичайних розрахунках на міцність деталей машин на основі методів теорії опору матеріалів вважають, що деталь буде безвідмовно працювати, коли навантаження не більші за міцність. Але навантаження та міцність залежать від багатьох факторів. Тому і навантаження  $Q$  і міцність  $R$  є випадкові величини. Тому треба знати закони їх розподілу (рис. 1.4).

Заштрихована частина перетину розподілів і буде областю, яка характеризує ймовірність відмови деталі. Імовірність безвідмовної роботи  $P(R > Q)$  визначається законом розподілу випадкової величини  $L = R - Q$



$$P(R>Q) = \int_{m_R - m_Q}^{\infty} f(t) dt. \quad (1.11)$$

де  $m_R, m_Q$  - математичне сподівання  $R, Q$ .

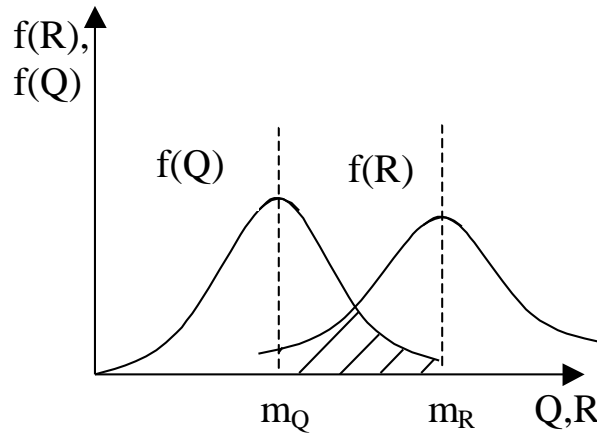


Рис. 1.4 – Щільність розподілу навантажень  $Q$  та міцності  $R$

Якщо  $R$  та  $Q$  підкоряються нормальним законам розподілу, то щільність ймовірності

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(t)2\pi} e^{-\left(\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma^2}\right)},$$

де  $m_t$  - математичне сподівання та дисперсія випадкової величини  $t$ ;

$$m_t = m_R - m_Q, \quad \sigma^2 = \sigma_R^2 + \sigma_Q^2,$$

$\sigma_R^2$  та  $\sigma_Q^2$  - дисперсія  $R$  та  $Q$ .

Імовірність безвідмовної роботи

$$P(R > Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_R^2 - \sigma_Q^2)}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{[t - (m_R - m_Q)]^2}{2(\sigma_R^2 - \sigma_Q^2)}\right) dt. \quad (1.19)$$

Для визначення інтеграла користуються нормованою функцією Лапласа, яка подається у табличному вигляді.

$$\hat{O}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{(-z^2/2)}, \quad (1.20)$$

$$\text{де } z = \frac{(m_R - m_Q)}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_Q^2}}. \quad (1.21)$$

$$\text{Тоді } P(R>Q) = 0,5 + \Phi(z). \quad (1.22)$$

Коли до формули внести співвідношення

$$n_\sigma = \frac{m_R}{m_Q},$$

що відповідає запасу міцності, та коефіцієнти варіації навантажень  $\rho_Q = \frac{\sigma_Q}{m_Q}$

і міцності  $\rho_R = \frac{\sigma_R}{m_R}$ , отримаємо залежність безвідмовної роботи від запасу

міцності

$$P(R > Q) = 0,5 + \Phi \left( \frac{n_\sigma - 1}{\sqrt{\rho_R^2 n_\sigma^2 + \rho_Q^2}} \right)$$

*Приклад.* Спостереженнями встановлено, що розподіл обертального моменту на валу підкоряється нормальному закону з параметрами  $m_Q = 90$  Мпа,  $\sigma_Q = 10$  Мпа. Механічні властивості вала  $m_R = 125$  Мпа,  $\sigma_R = 16$  Мпа. Визначити ймовірність безвідмовної роботи вала.

*Розв'язання.* За формулою (2.21) визначаємо значення аргументу

$$z = \frac{(m_R - m_Q)}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_Q^2}} = (125 - 90) / (16^2 - 10^2) = 1,855.$$

За значенням аргументу згідно [10] маємо, що коли  $z = 1,85$   $\Phi = 0,4682$ . За формулою (2.22) визначаємо

$$P(R > Q) = 0,5 + \Phi(z) = 0,5 + 0,4682 = 0,9682.$$

Остаточно маємо: ймовірність безвідмовної роботи вала становить 0,9682.

## 1.8 Шляхи забезпечення надійності

Надійності обладнання поділяють на два типи - базову та експлуатаційну. Необхідний рівень експлуатаційної надійності устаткування досягається як за рахунок забезпечення необхідної базової надійності в процесі проектування та виготовлення, так і експлуатації устаткування.

Надійність роботи машини забезпечується, починаючи з її конструювання. До основних критеріїв працездатності деталі належать: міцність, жорсткість, витривалість, зносостійкість.

Міцність, витривалість деталей машин забезпечують у процесі проектування шляхом розрахунку деталей на міцність. Жорсткість забезпечують добором матеріалу, конструкції (розташуванням опор, раціональною формою перерізів), обмеженням застосування зварних конструкцій у яких з'єднуються більше ніж три деталі в одному вузлі, уникнення застосування статично невизначених конструкцій, термічною обробкою. Темпи зношування деталей можна зменшити шляхом зменшення тиску на поверхні тертя,

рівномірного розподілу тиску, надання деталям форми, яку вони набувають при зносі, добором мастил, запобіганням попаданню в зону тертя забруднювачів. Для деталей, які підлягають абразивному зношенню можна зменшити поверхню тертя, застосовувати змінні елементи та само футерівку. Для збільшення терміну використання деталі доцільно вживати компенсування зносу в парах тертя, наприклад в клинових, конічних ущільненнях, гідравлічне притиснення половини підшипника, пружинні компенсатори зносу, то що.

Значно впливає на роботу машини та її вузлів матеріал із якого вони виготовлені. Для виготовлення деталей уживають сталь, чавун, кольорові метали, пластмаси, композитні матеріали.

У деталей виготовлених із сталі з низьким умістом вуглецю осердя деталі не змінює своїх властивостей під час загартовування. Цементация дозволяє збільшити твердість поверхневого прошарку. Середньовуглецеві сталі (0,25-0,30% вуглецю) застосовують для виготовлення деталей які підлягають термічній обробці не весь їх обсяг. Загартовування та висока відпустка суттєво покращують властивості сталі. Сталі з високим вмістом вуглецю (0,5-0,7%) із добавками марганцю, кремнію використовують для ресор, пружин.

Мається група високоміцних сталей, які після відповідної термічної обробки мають міцність вищу за конструкційну. Це хромонікелеві сталі, додатково леговані в різних сполученнях та співвідношеннях молібденом, вольфрамом, ванадієм. Їх використовують для виготовлення відповідальних деталей з великою площиною перерізу для яких треба забезпечити високу міцність. Вуглецю до 0,03%, нікелю 8-26%.

В деяких випадках (литі колінчасті вали, сепаратори підшипників, зубчаті, черв'ячні колеса, втулки) уживають графітизовані сталі. Загартовані графітизовані сталі вживають для виготовлення корпусів та лопаток дрібнострум'яних пристроїв.

Поліпшити властивості металів можливо й шляхом термічної обробки. В основі термічної обробки лежить зміна властивостей матеріалу під час її нагрівання та охолодження. Загартовування може бути наскрізним та поверхневим. Поверхнєве загартовування виконують із нагрівом у газовому полум'ї, струмами високої частоти, лазером. Нагрівання для загартовування по усьому обсягу проводять у печах. Застосовують також хіміко-термічну обробку цементацию, азотування, нітроцементацию та нітроазотування. Широко вживають дифузійну металізацію: алітування, борування, хромування, сульфідкування – методи, що значно зменшують корозійний знос.

Ефективним способом підвищити механічні властивості матеріалу є поверхнєве пластичне деформування. Цей метод не потребує великих витрат енергії, та робочого часу. Застосовують його для обробки сталі чавуну, сплавів. Суттєво метод зменшує вплив концентраторів напруги, поліпшує шорсткість поверхні, збільшує контактну міцність та стійкість проти зносу. Реалізувати цей метод можливо роликком, кулькою, механічною чеканкою, надклепуванням, розкатування роликком.

Вище названі заходи не охоплюють заходів по підвищенню терміну роботи обладнання при виконанні монтажу, наладки, експлуатації,

Забезпечення базової надійності включає наступні основні стадії. Перша стадія - попередні дослідження, порівняльний аналіз надійності різних варіантів конструкції устаткування. На цій стадії аналізують вимоги до обладнання, вивчають умови його використання, інформацію щодо надійності схожого обладнання. На основі аналізу вибирають остаточний варіант.

Друга стадія - економічний аналіз надійності остаточного варіанту. Аналіз полягає у виборі такого варіанта, при якому досягається мінімум загальних витрат на проектування, виготовлення та експлуатаційні витрати.

Третя стадія - робоче проектування, виготовлення та випробовування устаткування. Етап робочого проектування найбільш відповідальний. На цьому етапові передбачають: рішення по забезпеченню терміну роботи обладнання, ремонтпридатність, засоби контролю стану вузлів та деталей при експлуатації, пристрої та обладнання для інспектування та обслуговування обладнання, засоби захисту від перевантаження, максимальну стандартизацію та уніфікацію вузлів та деталей та інші заходи по збільшенню надійності. На третій стадії розробляють документацію на технічне обслуговування та ремонт.

Надійність машини при її використанні суттєво залежить від організації роботи ремонтної служби. Імовірність безвідмовної роботи обладнання на момент початку чергового ремонту

$$P(t_1 + T_p) = \exp\left(-\int_0^{t_1+T_p} \lambda(t) dt\right). \quad (1.23)$$

Оскільки

$$P(t_1 + T_0) = P(t_1) P(t_1/T_0) + P_{тр},$$

вважаючи, що на час  $t_1$  надійність обладнання дорівнює одиниці маємо

$$P(T_{0\delta}/t_i) = \exp\left(-\int_0^{t_i+T_p} \lambda(t) dt\right). \quad (1.24)$$

Враховуючи, що  $P(t_1/T_0) + P_{тр}$ ,

маємо

$$-\ln P(T_p) = \left(\int_0^{t_1+T_0} \lambda(t) dt\right).$$

При показниковому законів розподілу ( $\lambda = \text{const}$ ) маємо

$$T_p = -1/\lambda \ln P_{тр}.$$

Потрібний рівень надійності устаткування забезпечують:

- а) удосконаленням методів експлуатації обладнання;
- б) технічним обслуговуванням та ремонтом;
- в) шляхом усунення недоліків на основі зібраної та обробленої інформації щодо стану обладнання, заміною менш надійного обладнання або його вузлів та деталей більш надійним;
- г) модернізацією обладнання.

### 1.9 Техніко-економічна ефективність надійності

Відповідно до вимог ГОСТ 14.205-83 «Єдина система технологічної підготовки виробництва. Технологічність конструкції виробу. Терміни та визначення» матеріаломісткість виробів визначається як кількість матеріальних ресурсів, потрібних для виготовлення, експлуатації та ремонту виробу. Оскільки цей термін не враховує ресурс, то стандарт передбачає «питому матеріаломісткість продукції», яка характеризується співвідношенням матеріаломісткості до отриманого ефекту або до номінального значення основного параметра.

У структурі матеріаломісткості продукції загальну питому матеріаломісткість продукції уявляють як суму виробничої  $M_B$  та експлуатаційної  $M_e$ .

$$M = M_B + M_e$$

$$M_B = M_{и} / W,$$

де  $M_{и}$  - витрати на виріб,  $W$  - корисний ефект.

$$M_{и} = \sum_{i=1}^n M_i + M_{тв} + M_{мет},$$

$$\sum_{i=1}^n M_i$$

де  $\sum_{i=1}^n M_i$  - сумарна маса  $n$  деталей за кресленнями,

Експлуатаційна матеріаломісткість

$$M_e = M_з / W,$$

де  $M_з$  - збитки матеріалів на експлуатацію виробу.

Таким чином показник  $M$  враховує раціональну конструкцію виробу, технологічність, рівень технології виготовлення.

Економію матеріальних ресурсів отриману внаслідок зниження матеріаломісткості можна визначити за формулою

$$E = (M_б M_n) W_n V_n,$$

де  $M_б$ ,  $M_n$  - питомі матеріаломісткості базового та нового виробів.

$W_n$  - показник, який характеризує споживчі властивості нового виробу (продуктивність, вантажопідймальність...),  $V_n$  - обсяг виробництва нових виробів за запланований період.

Вибір метода відновлення та зміцнення деталей визначається характером дефекту, матеріалом деталі, особливостями її експлуатації та конструкції. Технологічний процес зміцнення деталей повинен забезпечувати можливість виконання вимог технічної документації на виготовлення (міцність, якість обробки,...) та економічну ефективність. Економічна ефективність характеризується наступними показниками:

1. Співвідношення основного технологічного часу (часу витраченого безпосередньо на ремонт)  $T_о$  до всього  $T_{ш}$

$$T_o / T_{шт} = T_o / (T_o + T_d),$$

де  $T_{шт} = T_o + T_d$ ,  $T_d$  - допоміжний час (час, що витрачається на демонтаж, транспортування, встановлення на місце, пуск, налагодження).

2. Відношення підготовчо-заключного часу  $T_{пз}$  до загального часу відновлення та зміцнення  $N$  деталей партії

$$T_N = N T_{шт} + T_{пз} \quad \text{тобто}$$

$$\frac{T_{пз}}{N T_{шт} + T_{пз}}$$

3. Коефіцієнт завантаження обладнання відображає вплив запроєктованого процесу відновлення (зміцнення) деталей на завантаження обладнання та дорівнює часу виконання робіт із ремонту та відновлення до загального фонду часу цього обладнання.

4. Показник економічності варіанта відновлення (зміцнення) деталі - показник доцільності

$$K_e + (C_n - C_v) / C_n,$$

де  $C_n$  - вартість нової деталі,  $C_v$  - вартість відновленої (зміцненої) деталі.

5. Показник підвищення працездатності (коефіцієнт експлуатаційної надійності)

$$K_{сн} = L_n / L_v,$$

де -  $L_n$ ,  $L_v$  - термі роботи нової та відновленої (зміцненої) деталі..

Вибір оптимального варіанта відновлення (зміцнення) деталей виконують в три етапи: установити доцільність, метод, можливі варіанти.

Відновлення (зміцнення) деталей ефективно коли її відносна собівартість не перевищуватиме відповідного показника виготовлення деталі

$$C_v / T_v \leq C_n / T_n,$$

де  $T_v$ ,  $T_n$ , - термін служби відновленої (зміцненої) деталі та нової.

Для швидкозношуваних деталей враховують й втрати з-за простоїв під час заміни деталі

$$C_v \leq T_v C_n / T_n + C_{сп} (T_v / T_n + 1).$$

Чинники, які впливають на довговічність роботи обладнання можна поділити на дві групи - ті, що її підвищують або зменшують .

Підвищенню сприяють технічний рівень виробництва, форми обслуговування та ремонту, конструкція деталей та вузлів, модернізація....

Зниженню сприяє фізичний знос та як наслідок збільшення обсягів ремонтних робіт.

Питома вага збитків на ремонт та використання машини для будь якої і-тої кількості циклів експлуатації за весь термін її використання

$$Z = \frac{S + \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n L_i} + \frac{\sum_{i=2}^{n-1} R_{i-1}}{\sum_{i=1}^n L_i};$$

де  $S$  - вартість придбання та монтажу машини за вилученням її ліквідаційної вартості,  $E_i$  - загальні видатки на технічне обслуговування та поточковий ремонт,  $R_i$  - видатки на капітальні ремонти на протязі  $i$ -того циклу,  $t_i$  - час  $i$ -того ремонтного циклу,  $n$  - кількість циклів експлуатації.

Кількість циклів, яке відповідатиме найменшій питомій вазі - оптимальне.

#### Контрольні питання

- 1 Задачі технічної служби із забезпечення надійної роботи обладнання.
- 2 Вплив надійності на форму організації ремонтів.
- 3 Поняття системи.
- 4 Елемента системи.
- 5 Відновлювальна система.
- 6 Невідновлювальна система.
- 7 Вартість експлуатації.
- 8 Фізичний та моральний зноси.
- 9 Технічний ресурс.
- 10 Гарантований термін роботи.
- 11 Терміни теорії надійності.
- 12 Чинники, що впливають на надійність устаткування.
- 13 Стадії припрацювання деталей.
- 14 Відомості про роботу, якість, надійність устаткування.
- 15 Типи з'єднань елементів в системі.
- 16 Надійність системи при послідовному з'єднанні елементів.
- 17 Надійність системи при паралельному з'єднанні елементів.
- 18 Надійність системи при змішаному з'єднанні елементів.
- 19 Подія.
- 20 Імовірність події.
- 21 Неперервна випадкова величина.
- 22 Дискретна випадкова величина.
- 23 Імовірність попадання випадкової величини в заданий інтервал.
- 24 Дисперсія.
- 25 Щільність.
- 26 Показниковий закон розподілу.
- 27 Нормальний закон розподілу.
- 28 Гама розподіл.
- 29 Розподіл Вейбула.
- 30 Збирання статистичної інформації.
- 31 Критерії відповідності законів розподілу.
- 32 Оцінка параметрів розподілу випадкових величин.

## 2. ВИТРИВАЛІСТЬ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 2.1 Утрата працездатності машини внаслідок втоми матеріалу

Деталі та вузли устаткування, які підпадають під дією різних навантажень, зношуються та руйнуються. Обладнання виходить з ладу в основному з трьох причин: унаслідок зносу, поломки, які виникли знезапечно, виникненням, зростанням тріщин від втоми матеріалу та поломкою деталі в решті решт.

Несподівані поломки виникають від одноразових перевантажень, які в основному виникають при порушеннях технологічного процесу внаслідок недостатньої кваліфікації або недогляду технологічного персоналу, невідповідністю сировини технологічним вимогам.

Іншою причиною несподіваної поломки деталі може бути її руйнування внаслідок так званої втоми матеріалу деталі. Руйнування деталі від втоми спостерігається коли в деталі виникають змінні напруження, екстремальні значення яких не перевищують напруження що можуть призводити до руйнування матеріалу. Так наші життєві спостереження доводять, що при змінних навантаженнях після незначної кількості циклів, наприклад при згині дроту, він може зруйнуватися тоді, як при постійному навантаженні (розтягу) дріт залишається не ушкодженим.

Питаннями вивчення причин виходу з ладу деталей у яких напруження не перевищують межі міцності займається наука про довговічність (витривалість). Основні поняття витривалості матеріалу подано у таблиці 2.1.



Таблиці 2.1. - Поняття витривалості

Терміни	Поняття
Втома	Процес поступового накопичення пошкоджень матеріалу під дією змінних напружень
Опір втомі	Властивість матеріалу протистояти втомі
Малоциклова втома	Втома матеріалу при пружно-пластичному навантаженні (при кількості навантажень до 50000 циклів)
Багатоциклова втома	Втома матеріалу при пружному навантаженні (при кількості навантажень не менше ніж 50000 циклів)
Іспит на втому	Експериментальне визначення кількісних характеристик втоми матеріалу
База іспитів	Попередньо задана кількість навантажень, до якої виконують іспити
Пошкодження внаслідок втоми: Тріщина втоми Злам від втоми	Часткове розділення матеріалу деталі Повне розділення матеріалу деталі
Навантаження	Сукупність послідовних значень напружень за період навантаження
Частота циклу	Кількість циклів за одиницю часу
Період циклів	Час реалізації одного циклу
Напруження: номінальне максимальне мінімальне середнє	напруження без врахування концентрацій найбільше за алгебраїчним значенням середнє зменшене на значення амплітуди статична складова
Цикл: симетричний асиметричний знакозмінний	максимальні та мінімальні напруження дорівнюють одне одному за абсолютними значеннями максимальні та мінімальні напруження не дорівнюють одне одному напруження змінюють свої знаки

Продовження таблиці 2.1

1	2
Характеристики опору втомі довговічність Поточна кількість циклів	кількість навантажень, яку деталь спроможна витримати до руйнуван- ня Кількість навантажень деталі
Відносне число циклів	Співвідношення поточної кількості циклів та довговічності
Крива втоми	Графік залежності максимальних напружень від довговічності
Межа втоми	Значення максимального напружен- ня, яке відповідає заданій циклічній довговічності

Багато деталей обладнання навантажені напруженнями, що циклічно змінюються з часом. Вісь (рис. 2.1) звичайного візка навантажена циклічно, тоді як зовнішні сили зберігають свої значення.

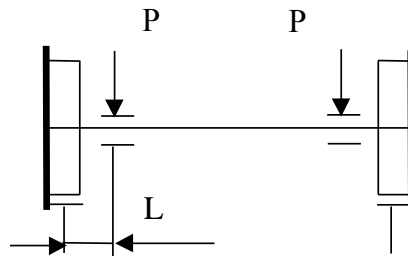


Рисунок 2.1 – Колісна пара візка

Для осі візка побудуємо епюру моментів. Максимальний момент  $M=PL$ . Напруження в перерізі дії максимальних моментів

$$\sigma = \frac{MY}{I},$$

де  $I$  – момент інерції перерізу осі;  $Y$  – відстань від площини симетрії згину вала до точки, для якої визначаємо напруження.

В наслідок обертання осі, відстань  $Y$  змінюється з часом

$$Y = d/2 \sin \omega t,$$

де  $d$  - діаметр осі,  $\omega$  - кутова швидкість обертання осі.

Таким чином, нормальні напруження в перерізах вісі машини змінюються за синусоїдою з амплітудою, що дорівнює максимальним напруженням

$$\sigma = \frac{Md}{2I} = \frac{M}{W}.$$

Кількість циклів навантаження до моменту поломки залежить від величини напруження та змінюється в широких межах. При великих напруженнях, для руйнування досить декілька циклів. При менших напруженнях деталь витримує мільйони навантажень, а при ще менших напруженнях може працювати практично безмежно.

В першому випадку на місці зламу можна віднайти дві зони. В одній зоні кристали майже непомітні, поверхня зламу згладжена. У другій зоні мають місце ознаки крихкого зламу. Кристали загострені, мають блискучу поверхню. В загалі складається враження, що такий злам став у наслідок зміни структури матеріалу. Цим попервах і пояснювали руйнування при циклічних навантаженнях. Таке явище назвали втому матеріалу. Точка зору на це явище в подальшому стала іншою, але термінологія залишилась. Зараз встановлено - структура металу при циклічних навантаженнях не змінюється. Початок руйнування має місцевий характер. В зоні підвищених напружень, зумовлених конструктивними, технологічними або структурними факторами, може виникнути мікро тріщина. При багатократному навантаженні, розташовані в зоні максимальних навантажень, кристали починають руйнуватися. Тріщина поширюється. Поверхні в зоні тріщини торкаються одна одної, кристали, що виступають стираються.

Виникнення тріщини зменшує площину перерізу, чим ще збільшує навантаження. Теоретичний аналіз міцності при втомі занадто складний. Схема суцільного середовища, яка застосовується в опорі матеріалів, теорії пружності, не прийнятна для розрахунку на втому матеріалу. Тому втомленість визначають через накопичення експериментальних результатів.

Поломки від втоми матеріалу мають свої характерні особливості, їх неважко виділити серед поломок з інших причин. Для зломів від втоми характерна наявність чітко позначених двох зон поломок з дрібнозернистою структурою, парцеляноподібною, навіть шліфованою, та статичного (швидкого) порушення рештки перерізу з волокнистою для м'яких та з великими зернами для твердих (крихких) матеріалів. Оскільки тріщини розвивались поступово, то в зоні поломки можна виявити зону зародження тріщини, зону розвитку та остаточної поломки. Наявність такого характеру злomu свідчить про злам в наслідок дії змінних напружень.

Аналіз зломів є об'єктивним методом, який дає змогу визначити перевантаження, місце концентрації напружень, умови розвитку тріщин тощо. Аналіз дозволяє конструкторам та виробничникам оцінювати міцність деталей та попереджувати поломки. На основі отриманих результатів вжити заходи з попередження поломок.

Характер зламу визначається рівнем напружень: чим більше перевантаження тим менша зона розповсюдження тріщини. При великих перевантаженнях може бути декілька місць зародження тріщин. Блиск зони порушення від втоми збільшується із збільшенням циклів навантаження до поломки.

Напрямок розвитку тріщин залежить від напруженого стану та напрямку дії головних напружень. При розтягу, стисканні, згині тріщини розвиваються по площинам дії головних нормальних напружень, а при скручуванні спочатку в зоні дії дотичних напружень, а потім у зоні дії нормальних.

На шорсткість зламу, головним чином, впливають структура та властивість матеріалу, швидкість навантаження, наявність концентратора напружень, величина

Тріщина розвивається, проникає в глиб деталі, утворює лінію фронту її

просування. На швидкість просування впливають рівень і характер діючих напружень. За розташуванням ліній втоми можна наближено визначати режими роботи деталі.

На шорсткість зламу впливають головним чином структура і властивості матеріалу, швидкість навантаження, наявність концентратора, рівень і характер навантажень, що прикладаються. Шорсткість характеризує вид руйнування (крихкий і пластичний) і швидкість розповсюдження тріщини. Зміна шорсткості не обов'язково може плавно. Вона може розвиватися стрибкоподібно. За низьких рівнях напружень спостерігається гладка поверхня, із збільшенням рівня напружень шорсткість зламу зростає, а за наявності концентраторів напружень зменшується.

Умовні схеми зламів через втоми при різних видах і характерах навантажень, показаних в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Схеми зламів деталей круглого перерізу від втоми при різних видах і характерах навантаження

Тип навантаження	Характер навантаження						
	Помірний			Зависокий			
	Природний локальний концентратор напружень	Незначний концентратор напружень розташований по колу	Значний концентратор напружень розташований по колу	Природний локальний концентратор напружень	Незначний концентратор напружень розташований по колу	Значний концентратор напружень розташований по колу	
	1	2	3	4	5	6	7
Розтяг							
Асиметричний згин							
Симетричний згин							
Згин, що обертася							

На схемах показані особливості зародження тріщин і характер просу-

вання лінії фронту тріщини (стрілками) залежно від вигляду і характеру навантаження. Заштриховані площі відповідають стадії остаточного доламу деталі.

Відповідність характерів зламів деталей в процесі їх використання зламам зображеним в 5-7 колонках свідчить про завищений рівень напружень розрахованих без урахування впливу концентраторів напружень. У такому разі доцільно вживати заходи спрямовані або на зменшення напружень шляхом збільшення перерізів, або на підвищення допустимих напружень шляхом застосування іншого матеріалу, підвищення його механічних характеристик.

Коли характери зламів відповідають зламам наведеним в 2-4 колонках доцільно в конструкції деталі змінити елементи конструкції, що зумовлюють концентрацію напружень.

## 2.2 Основні характеристики циклу та межа витривалості

Розглянемо випадок одновісного навантаження. Закон зміни головного напруження задамо кривою (рис. 2.2)

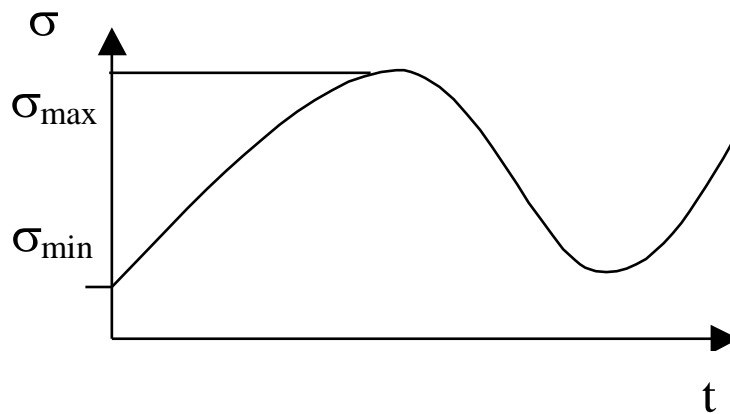


Рисунок 2.2 – Можлива форма зміни напружень в часі

Екстремальні напруження позначимо  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ . Їх співвідношення має назву коефіцієнт циклу

$$r = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}. \quad (2.1)$$

Якщо  $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$  то  $r = -1$  цикл симетричний. Такий цикл має місце при навантаженні осі розглянутого вище візка.

Якщо  $\sigma_{\max} = 0$ , або  $\sigma_{\min} = 0$  цикл пульсуючий ( $r = 0$ ).

Кожний цикл можна уявити як суму постійного  $m$  та змінного навантаження. Тоді

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 ; \quad \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2. \quad (2.2)$$

Вважається, що форма циклу не впливає на міцність.

Несуттєвий для конструкційних матеріалів (окрім гуми, полімерних матеріалів ) вплив швидкості зміни навантажень.

Перейдемо до механічних характеристик. Найбільше поширені дослідження в умовах симетричного циклу. При цих дослідженнях в основному використовують принцип, так званого, чистого вигину. Навантаження відповідає навантаженню осі візка в перерізах поміж прикладеними силами. Для навантаження несиметричними напруженнями вживають інші методи. При навантаженнях деталей фіксують кількість циклів до поломки. За цими даними будують графік (рис. 2.3).

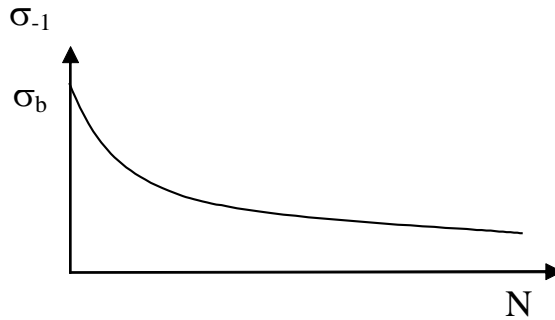


Рисунок 2.3 - Крива втомленості

Оскільки із зменшенням рівня напружень кількість навантажень значно зростає, то замість кількості навантажень  $N$  вживають  $\log N$ . Графік побудований у координатах  $\log N$  називають графіком у напівлогарифмічних координатах. Якщо графік побудувати в координатах  $\log \sigma_{-1}, \log N$  - в логарифмічних. В логарифмічних координатах крива втомленості близька до прямої. Пряму приймають до напружень, що відповідають межі витривалості. Напруження, відповідні цьому значенню, позначають  $N_0$ . На ділянці, що перевищує кількість циклів навантажень  $N_0$ , лінію проводять горизонтально (рис. 2.4).

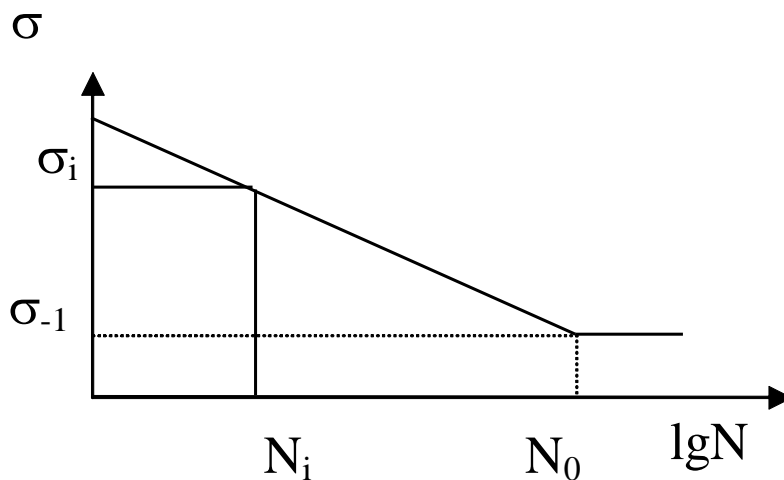


Рисунок 2.4 - Крива втомленості в напівлогарифмічних координатах

Досвід свідчить, що для більшості чорних металів можна віднайти таке найбільше навантаження, при якому матеріал не буде зруйновано, за

будь якої кількості навантажень. Таке напруження називають межею витривалості. Для кольорових металів та для сталей загартованих до високої міцності не вдається віднайти таку кількість навантажень витримав яку зразок не зруйнувався б і при подальших навантаженнях. В таких випадках вводять поняття умовної межі витривалості, прийнявши  $N=10^8$  циклів.

Визначення межі витривалості вимагає значних витрат. Тому користуються емпіричними залежностями.

Для сталей

$$\sigma_{-1}=(0,4-0,5) \sigma_{вр},$$

для високоміцних сталей

$$\sigma_{-1}=400+1/6 \sigma_{вр},$$

для кольорових металів

$$\sigma_{-1}=(0,25-0,5) \sigma_{вр}.$$

Аналогічно можна віднайти при скручуванні

$$\sigma_{-1}=(0,2-0,3) \sigma_{вр}.$$

Припустимо, що ми маємо машину для іспитів на втомленість. Задавши постійне  $\sigma_m$ , шляхом іспитів зразків знаходимо таке значення амплітуди  $\sigma_a$ , при якій матеріал здатен витримати необмежену кількість навантажень.

В результаті будемо мати  $\sigma_a$  та  $\sigma_m$ , за якими побудуємо графік. Для кожної точки сума координат буде відповідати максимальному напруженню  $\sigma_r$ ,

$$\text{де} \quad r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = (\sigma_m - \sigma_a) / (\sigma_m + \sigma_a). \quad (2.3)$$

Продовживши іспити будемо мати багато точок, за якими зможемо побудувати криву - діаграму міцності при втомі. Побудова такої діаграми вимагає великого обсягу іспитів. Тому, практично, будують спрощені діаграми (рис. 2.5). При цьому використовують значення межі витривалості при симетричному циклові  $\sigma_{-1}$ , значення межі міцності  $\sigma_b$ , та значення межі текучості  $\sigma_T$ . Через точку, що відповідає початку координат проводять лінію під кутом  $45^\circ$  до точки, з ординатою  $\sigma_b$ . З цієї точки проводять прямі до перетину з віссю ординат у точках, що відповідають межі витривалості при симетричному циклові  $\sigma_{-1}$ . На цьому можна було б і завершити побудову діаграми аби в деталях, при навантаженнях, що сягають межі текучості  $\sigma_T$  матеріалу, не спостерігалися б залишкові деформації. Щоб такого не сталося, приймають додаткове обмеження по величині  $\sigma_T$ . Виділений багатокутник показує, що деталь з напруженнями  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$ , розташованими вище ламаної лінії буде працювати обмежений час. У протилежному випадкові - безмежно довго.

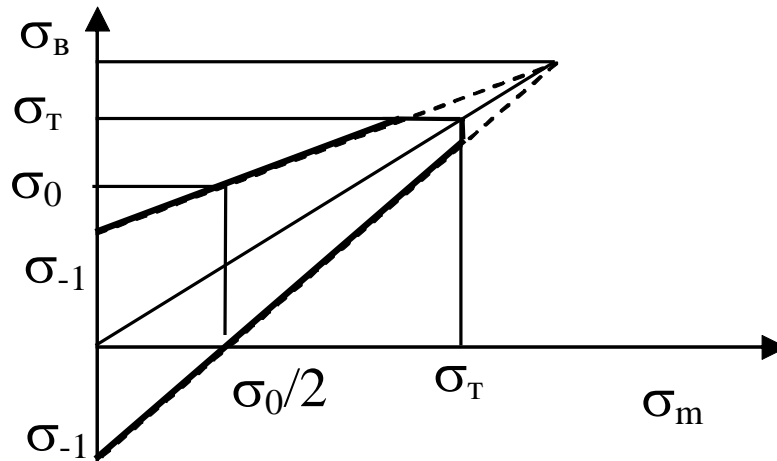


Рисунок 2.5 – Діаграма граничних напружень для асиметричних циклів навантаження

### 2.3 Розрахунки на витривалість

Найпростіше розв'язуються питання розрахунків на витривалість та довговічність при усталених режимах навантаження та напруженнях, менших за межу витривалості. Основною формою розрахунку є розрахунок запасу міцності

$$n = \frac{\sigma_{\text{граничне}}}{\sigma_{\text{дійсне}}} \geq n_{\text{доп.}} \quad (2.4)$$

У разі симетричних циклічних навантажень формула (3.4) набуває форми

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} k_{\Sigma\sigma}, \quad (2.5)$$

де  $\sigma_{-1}$  - межа витривалості при стандартних іспитах;  $\sigma_a$  - амплітуда нормальних напружень;  $k_{\Sigma\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує сумісний вплив на межу витривалості.

За аналогією з формулою (2.5) для дотичних напружень

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a} k_{\Sigma\tau}. \quad (2.6)$$

Запас міцності, за умови сумісної дії нормальних та дотичних напружень

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}. \quad (2.7)$$

Деталь вважають працездатною, якщо  $n_{\sigma\tau} \geq [n] = 1,5 \div 2,5$ .



У разі коли дотичні та нормальні напруження діють з однаковою частотою та однаковою фазою, наприклад, при сумісному крученні та згині

$$\sigma_{\sigma\delta a} = \sqrt{\sigma_a^2 + 2\tau_a^2}. \quad (2.8)$$

У разі асиметричних циклічних навантажень

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{k_{\Sigma\sigma}\sigma_i \left(1 - \psi_{\sigma} \frac{\sigma_m}{k_{\Sigma\sigma}\sigma_a}\right)}, \quad (2.9)$$

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{k_{\Sigma\tau}\tau_i \left(1 - \psi_{\tau} \frac{\tau_m}{k_{\Sigma\tau}\tau_a}\right)}, \quad (2.10)$$

де  $\psi_{\sigma}, \psi_{\tau}$  - коефіцієнти впливу асиметрії циклу.

Для сталі коефіцієнт впливу асиметрії циклу

$$\psi_{\sigma} = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B, \quad (2.11)$$

де  $\sigma_B$  – границя міцності, Мпа.

При крученні

$$\psi_{\tau} = 0,5\psi_{\sigma}. \quad (2.12)$$

Запас міцності, за умови сумісної дії нормальних та дотичних напружень визначається за формулою (2.7).

При нестаціонарних режимах використовують рівняння кривої витривалості в логарифмічних координатах, що має вигляд

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_{-1}^m N_0 = \text{const}, \quad (2.13)$$

де  $\sigma_i$  - напруження в деталі;  $\sigma_{-1}$  - межа витривалості;  $N_i$  - відповідні цикли навантажень;  $N_0$  – кількість циклів навантажень, що відповідає точці зламу кривої втомленості в логарифмічних координатах;  $m$  - параметр, який відповідає кутові нахилу кривої втоми.

Скориставшись наведеною формулою та гіпотезою лінійного складання пошкоджень

$$\frac{\sum n_i}{N_s} = a \quad (n_i - \text{кількість циклів навантажень напруженнями } \sigma_i \text{ у за-}$$

планований період експлуатації деталі), знаходять приведені напруження

$$\sigma_{i\delta} = \frac{1}{\sqrt[m]{a}} \sqrt[m]{\frac{\sum \sigma_i^m n_i}{N_0}} \quad (2.14)$$

та запас міцності

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{пр}}} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{1}{\sqrt[m]{a}} \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^m n_i}{N_0}}}$$

Для сталей значення «m» лежить у межах 6-20, величина «a» в межах 1-3, відповідно  $\sqrt[m]{a} \approx 1$ . Тому, у разі відсутності експериментальних результатів слід приймати  $\sqrt[m]{a} = 1$ .

#### Контрольні питання

1. Причини руйнування деталей у разі циклічного навантаження.
2. Максимальні та мінімальні напруження.
3. Яким чином характеризують характер циклу навантаження.
4. Які напруження називають амплітудними.
5. Які напруження називають середніми.
6. За якими даними будують діаграму граничних напружень для асиметричних циклів навантаження.
7. Характер кривої втомленості.
8. Вигляд кривої втомленості в логарифмічних координатах.
9. Як за характером зламу орієнтовно встановити характер навантаження деталі, що мав місце в процесі її роботи.
10. Втрата працездатності. Руйнування.
11. Знос. Аналіз зламів внаслідок втомленості.
12. Вплив конструктивних факторів на міцність при втомленості деталей машин.
13. Шляхи підвищення міцності на втомленість.
14. Добір коефіцієнтів запасу міцності.
15. Криві втомленості в різних системах координат.
16. Испити на втомленість.
17. Визначення запасу довговічності та терміну роботи.
18. Використання заводської статистичної інформації про терміни роботи та причини виходу з ладу деталей машин. Планування ремонтів, парку запчастин та термінів роботи деталей машини.
19. Методи підвищення надійності та довговічності машин.
20. Фактори, що впливають на економічну ефективність підвищення надійності та довговічності машин.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Канарчук В.С., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. – Либідь, 2003 – 424 с.
2. Барнік М.А., Афтаназів І.С., Сівак Ш.О. Технологічні методи забезпечення надійності деталей машин К.:КИ\, 2004 – 148 с.
- 3.Зенкін М.А., Піпа Б.Ф. Методи підвищення надійності та довговічності деталей та вузлів машин легкої промисловості. К.: КНУДТД,2004 -264с.
4. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв К.: НУХТ, 2010. – 547 с.
5. Гребенник И.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования: Справочник , - М.: Металлургия, 1989.- 590 с.

## Навчальне видання

Конспект лекцій з навчальної дисципліни “Надійність та довговічність обладнання” для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування за освітньо-професійною програмою Галузеве машинобудування

Укладач: Бельмас Іван Васильович

Підписано до друку \_\_\_\_\_ 2017 року

Формат \_\_\_\_\_ А4 \_\_\_\_\_, обсяг \_\_\_\_\_ др. арк.

наклад \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ прим. Замовлення \_\_\_\_\_

51918, м. Кам’янське, вул.Дніпробудівська, 2