

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Галузевого машинобудування»

В авторській редакції

**НАДІЙНІСТЬ, РЕМОНТ ТА МОНТАЖ МАШИН
ТА УСТАТКУВАННЯ**

**ЙМОВІРНІСНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ ДЕТАЛЕЙ
МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ
НА ОБМЕЖЕНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ**

Навчально-методичні рекомендації
до практичних занять

ДНІПРО
2025

Упорядники:

Г. І. Толстіков, В. В. Поворотній, С. В. Білодіденко, В. І. Гануш

Електронний аналог
друкованого видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
133 «Галузеве машинобудування»
Протокол № 1 від 04.09.2024 р.

Н 17 Надійність, ремонт та монтаж машин та устаткування. Ймовірнісні методи розрахунків деталей металургійного обладнання на обмежену довговічність : навчально-методичні рекомендації до практичних занять / упоряд. Г. І. Толстіков, В. В. Поворотній, С. В. Білодіденко, В. І. Гануш ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 32 с.

В навчально-методичних рекомендаціях викладено методи розрахунків деталей металургійного обладнання на обмежену довговічність. Наведений приклад застосування методу розрахунку деталей металургійного обладнання на базі станин робочих клітей станів холодної прокатки труб.

Навчально-методичні рекомендації призначені для опанування освітньої компоненти «Надійність, ремонт та монтаж машин та устаткування» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» для ОПП «Галузеве машинобудування» освітнього рівня бакалавр.

Іл. 8, табл. 3, бібліогр. 9 назв.

ЗМІСТ		стор.
ВСТУП		4
1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МОЖЛИВОГО РОЗРАХУНКУ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ НА ОБМЕЖЕНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ		4
1.1 Параметри, необхідні для ведення розрахунку деталей металургійного обладнання на втомну довговічність у імовірнісному аспекті		5
1.1.1 Характеристики кривої втоми та їх розсіювання		5
1.1.2. Імовірна оцінка параметрів кривої втоми		7
1.1.3. Визначення середніх значень та розсіювання характеристик втомної міцності		10
1.1.4. Режими навантаження та методи статистичної обробки дослідних даних		12
2. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ СИМЕТРИЧНИХ ЦИКЛАХ НАПРУГИ		14
3. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ АСИМЕТРИЧНИХ ЦИКЛАХ НАПРУГ		17
4. ІМОВІРНІСНА ТРАКТОВКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ		18
5. ВИЗНАЧЕННЯ РІВНІВ НАПРУГ, ЩО ВРАХОВУЮТЬСЯ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ДЕТАЛЕЙ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ У ІМОВІРНОМУ АСПЕКТІ		21
6. ПРИКЛАДИ МОЖЛИВОГО РОЗРАХУНКУ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ		23
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		31

ВСТУП

Однією з найбільш відповідальних та актуальних задач, що стоять перед машинобудівниками, є створення надійного, довговічного та економічного металургійного обладнання, експлуатація якого супроводжується великою кількістю поломок та відмов деталей, що призводить до його простоїв та зниження продуктивності.

У зв'язку з цим останнім часом все більше уваги приділяється питанням підвищення надійності та довговічності металургійного обладнання загалом, а також його механізмів, вузлів та деталей.

Під впливом змінних навантажень основні деталі устаткування накопичують втомні ушкодження, які найчастіше призводять до поломок. Причому, поломки відбуваються незважаючи на передбачені багаторазові розрахункові запаси міцності за статичними механічними характеристиками, оскільки діючі в деталях напруги перевершують за своїми фактичними значеннями межі витривалості цих деталей. Тому для таких деталей потрібний розрахунок на обмежену довговічність.

Однак визначення за умовами втомної міцності терміну служби будь-якої деталі металургійного обладнання з задовільною точністю з використанням методів розрахунку за середніми значеннями втомної міцності і навантаження дуже ускладнено. Це пояснюється тим, що експлуатаційна довговічність деталей металургійного обладнання при втомному руйнуванні носить випадковий характер, пов'язаний з розкидом реальної навантаженості, властивості матеріалу деталей, а також інших факторів і повинна визначатися з імовірнісних позицій, оскільки різні фактори неоднаково впливають на довговічність і оцінити сумарну їх дію практично неможливо.

Імовірнісні методи за наявності необхідних даних, в принципі, можуть оцінювати очікувану довговічність роботи конкретних деталей або вузлів із заданою достовірністю, а їх використання стосовно розрахунку металургійного обладнання є дуже важливим, оскільки виявляє можливості інтенсифікації виробничих процесів і підвищення продуктивності обладнання.

У цих методичних вказівках розглянуто деякі питання ймовірності оцінки обмеженої довговічності деталей металургійного обладнання, а також конкретні приклади розрахунку, що були розроблені на кафедрі Машин та агрегатів металургійного виробництва (зараз кафедра Галузевого машинобудування) під керівництвом доктора технічних наук, професора Гребеника Віктора Михайловича.

Віктора Михайловича Гребеника, без перебільшення, можна вважати одним із основоположників теорії надійності металургійного обладнання. Його праці, що базувалися на глибокому аналізі умов експлуатації та причин відмов металургійних машин та агрегатів, заклали фундамент для розвитку науково обґрунтованих методів забезпечення надійності. Він не лише розробив теоретичні основи, але й активно впроваджував їх у практику металургійного виробництва, сприяючи підвищенню ефективності та безпеки роботи підприємств. Саме завдяки його зусиллям у Дніпропетровському металургійному інституті (ДМетІ) було створено наукову школу, що займалася питаннями надійності, а імовірнісні методи розрахунку стали невід'ємною частиною інженерної практики[1].

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МОЖЛИВОГО РОЗРАХУНКУ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ НА ОБМЕЖЕНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ

Імовірнісні методи розрахунку на обмежену довговічність, як і взагалі всі методи розрахунку на міцність, дають результати з деяким ступенем наближення та їх застосування виправдане в тому випадку, якщо у розпорядженні розрахувальника є достатній обсяг

статистичної інформації про умови навантаження та втомних характеристик деталей обладнання.

В результаті розрахунків оцінюють ймовірність руйнування в межах заданого терміну служби або визначають термін служби залежно від заданої ймовірності руйнування (функцію розподілу терміну служби). При цьому розрахункове значення ймовірності руйнування порівнюють з рівнем ймовірності, призначеним виходячи з умов експлуатації та виду обладнання, а також наслідків руйнування.

Наявність функції розподілу терміну служби дозволяє раціональніше вибрати розміри деталей, оцінювати їхню поведінку в експлуатації, правильно планувати парк запасних частин та інструменту, організувати планово-попереджувальні ремонти, визначати міжремонтні періоди.

1.1. Параметри, необхідні для ведення розрахунку деталей металургійного обладнання на втомну довговічність у імовірнісному аспекті

Методи розрахунку деталей обладнання на втомну міцність і довговічність можуть бути різними в залежності від вибору критерію втомної міцності (тріщиноутворення або руйнування).

Для металургійного обладнання як критерій втомної міцності зазвичай приймають повне руйнування деталі. Це робить завдання цілком визначеним, дозволяє надійно оцінити втомну міцність і визначити реальні терміни служби деталі або ймовірність безвідмовної роботи.

Для оцінки втомної довговічності у ймовірнісному аспекті необхідно мати математичну модель, що відображає фізичний характер втомного руйнування. Така модель повинна пов'язувати фізичні характеристики матеріалу деталі, що визначають його несучу здатність, режими навантаження, що характеризують рівень зовнішніх навантажень та умов експлуатації деталей, а також умови накопичення циклічного пошкодження, що є законом пошкодження матеріалу деталі під впливом зовнішніх навантажень[2].

Отже, розрахунок обмеженої довговічності деталі передбачає наявність наступних статистично оброблених даних:

- втомних характеристик (залежностей або графіків, що дозволяють визначати втомні характеристики із заданою ймовірністю);
- умов навантаження (кривих щільності розподілу діючих напруг і параметрів, що характеризують їх);
- закону накопичення пошкоджень з урахуванням умов навантаження та властивостей матеріалу.

При цьому має бути забезпечене одержання не тільки середніх значень зазначених даних (відповідних ймовірності руйнування 50%), але й будь-якої заданої ймовірності.

1.1.1 Характеристики кривої втоми та їх розсіювання

Як характеристики втомної міцності використовують параметри кривої втоми, що є залежністю між напругами σ і числом циклів до руйнування N . Криву втоми зображують у логарифмічній ($\lg \sigma - \lg N$) або напівлогарифмічній ($\sigma - \lg N$) системах координат.

Рівняння кривої втоми відповідно в логарифмічній та напівлогарифмічній системах координат мають вигляд:

$$N_i \sigma_i^m = N_0 \sigma_{-1}^m \quad (1.1)$$

$$N_i 10^{\frac{\sigma_i}{K}} = N_0 10^{\frac{\sigma_{-1}}{K}} \quad (1.2)$$

При цьому параметрами кривої втоми є: σ_{-1} - межа витривалості; N_0 - абсциса точки перелому кривої втоми; m і K - параметри, що визначають кут нахилу кривої втоми відповідно в логарифмічній та напівлогарифмічній системах координат.

Перехід з однієї системи координат до іншої може бути здійснений за допомогою співвідношення:

$$km = \frac{\sigma_i - \sigma_{-1}}{\lg \sigma_i - \lg \sigma_{-1}} \quad (1.3)$$

Порівняння кривих втоми, побудованих у логарифмічній та напівлогарифмічній системах координат, показує правомірність їх побудови у цих системах координат. Однак відзначається перевага кривих втоми, побудованих у напівлогарифмічних координатах, тому в цих методичних вказівках ми користуватимемося напівлогарифмічною системою координат.

При звичайних методах розрахунку деталей обладнання на довговічність припускають, що для серії ідентичних зразків, що випробовується, існує цілком певна крива втоми, яка може бути знайдена шляхом стандартних втомних випробувань, як найбільш ймовірна.

Однак залежність між напругою σ та числом циклів N до руйнування навіть при найсуворішому дотриманні однорідних умов випробувань має яскраво виражений випадковий характер, що зумовлює неминучий розкид результатів випробувань як за кількістю циклів, так і за витривалістю[3].

Експериментально встановлено, що внаслідок значного розкиду по довговічності на рівнях напруг, що випробовуються, який зростає з їх зниженням, отримують істотний розкид також по куту нахилу і точці перелому кривої втоми. Тому кривої втоми, як детерміністичної кривої, немає; є сенс говорити про сімейство кривих, кожна з яких відповідає деякій, цілком визначеній ймовірності руйнування P .

Випадковий характер параметрів кривої втоми обумовлений впливом різних умов виготовлення та випробування зразків на втому, режимів термо- та механічної обробки, величини навантаження тощо. Крім того, розсіювання виникає також внаслідок впливу факторів, пов'язаних зі статистичною природою процесу втомного руйнування, структурної неоднорідності металу, зокрема, різними розмірами, формою та орієнтуванням зерен, наявністю різних включень та дефектів кристалічних решіток та ін.

Необхідно відзначити, що розсіювання властивостей при втомному руйнуванні значно перевищує розсіювання властивостей при тендітному і в'язкому руйнуванні.

У зв'язку з цим статистичний аналіз втомних властивостей матеріалу дозволяє відхилити їх імовірнісну природу, що є основним фактором надійності деталей в умовах тривалої експлуатації.

В результаті статистичної обробки даних втомних випробувань зразків, мета якої встановити вид функціональної залежності між σ , N та P (P - ймовірність того, що зразок, що випробовується при напрузі σ , руйнується при кількості циклів N), набувають середні значення параметрів кривої втоми та їх розсіювання.

В даний час поширений метод визначення втомних характеристик деталі за результатами випробування лабораторних зразків, виготовлених з того ж матеріалу, що і деталь.

Врахування розсіювання щодо довговічності дозволяє з достатньою мірою достовірності гарантувати відсутність втомних руйнувань протягом встановленого терміну служби у конкретних умовах експлуатації. Гарантійний термін служби, що відповідає малій ймовірності руйнування деталі залежить не тільки від середньої довговічності деталі, а й від розсіювання довговічності. Деталі можуть мати однаковий середній термін служби, але різне розсіювання. Відповідно, гарантійні терміни служби цих деталей будуть різними і призначаються, з економічних міркувань. Для деталей обладнання металургійної промисловості гарантійний термін можна призначати, виходячи з ймовірності руйнування приблизно $P = 20 + 25\%$.

Слід зазначити, що поширена думка про оцінку впливу різних факторів на працездатність металів у виробі лише за даними натурних випробувань не є обґрунтованим, так як натурні випробування безпосередньо і недеференційно відображають конструктивні особливості виробу і не можуть дати даних для порівняльної оцінки та прогнозування витривалості сталей у різних станах та за різних умов роботи. Крім того, режими натурних випробувань зазвичай є форсованими і нееквівалентно відбивають характер та особливості накопичення ушкоджень, властивих справжнім експлуатаційним режимам. І, нарешті, натурні випробування дозволяють отримувати дані для оцінки працездатності виробу не на стадії його проектування та пошуку оптимальних варіантів вирішення задачі (вибору належного матеріалу, його обробки та ін.), а лише після того, коли виріб виготовлено з цілком певної марки сталі з застосуванням відповідних методів термо- та механічної обробки[4].

Враховуючи це, а також складності проведення випробувань на витривалість великої кількості натурних деталей або їх моделей через великі розміри та різноманітність форм деталей та умов виникнення в них концентрації напруг, в даний час є обмежена кількість експериментальних даних щодо розсіювання втомних характеристик натурних деталей.

Розсіювання числа циклів, при яких руйнується деталь, зменшується зі збільшенням розмірів перерізів та рівня напруженості. Так як розсіювання з рівнем концентрації напруг, то при випробуванні натурних деталей іноді зі зміною рівня навантаження є місце руйнування, а у зв'язку з цим зона розсіювання за кількістю циклів. Доречно припустити, що зменшення розсіювання за кількістю циклів призведе до зменшення розкиду значень параметрів кривої втоми.

Справді, зменшення розсіювання характеристик міцності втоми в деталях (торсіони) в порівнянні зі зразками відомий факт. Разом з тим, відзначають, що для конструкції з підвищеною неоднорідністю стану поверхні дисперсія довговічності може досягти і перевищувати дисперсію довговічності лабораторних зразків, що, у свою чергу, або не змінить розсіювання характеристик міцності втоми в порівнянні зі зразками, або призведе до його збільшення.

Таким чином встановлено, що при переході зразків до деталей також має місце розсіювання характеристик міцності втоми (межі витривалості, кута нахилу і абсциси точки перелому).

Наявність даних про розсіювання всіх характеристик міцності втоми має велике практичне значення, так як дозволяє здійснити ймовірнісний підхід до розрахунків деталей на довговічність не тільки в процесі експлуатації, але і на стадії проектування.

1.1.2. Імовірна оцінка параметрів кривої втоми

При вивченні закономірностей розсіювання параметрів кривої втоми зазвичай виготовляють досить велику (порядку 80 - 100) кількість зразків з металу однієї плавки, які випробовують на витривалість при кількох рівнях амплітуд напруг і отримують при цьому числа циклів до руйнування. Дослідження показують, що закони розподілу довговічності при випробуваннях можуть бути різними, проте найімовірнішими слід вважати логарифмічно - нормальним закон розподілу даних про довговічність на різних рівнях напруги, який, як правило використовують на практиці. У цьому випадку логарифми отриманих чисел циклів до руйнування розташовують у зростаючому порядку, утворюючи таким чином варіаційний ряд, що є вихідною інформацією для статистичної обробки та побудови функцій розподілу випадкової величини $X = \lg N$, тобто

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_i \leq \dots \leq X_n \quad (1.4)$$

При цьому будують або емпіричну або теоретичну функцію розподілу довговічності або криві щільності розподілу довговічності.

Емпіричну функцію розподілу довговічності будують зазвичай на логарифмічно нормальному ймовірнісному папері. По осі абсцис відкладають значення $X_i = \lg N_i$ в рівномірному масштабі, по осі ординат - оцінки ймовірності руйнування (накопичені частоти), обчислені за виразом[1]:

$$P = \frac{i - 0.5}{n} \cdot 100\% , \quad (1.5)$$

в якому i - порядковий номер зразків у варіаційному ряду; n - кількість зразків, випробуваних при даному рівні напруги.

У разі побудови теоретичної функції розподілу довговічності визначають довговічність зразків для різних ймовірностей руйнування на кожному з рівнів напруг, що випробовуються, в припущенні нормального закону її розподілу за виразом:

$$(\lg N)_p = \lg N + U_p S_{\lg N} , \quad (1.6)$$

Де $\lg N$ - середнє значення довговічності в варіаційному ряду, що відповідає ймовірності руйнування $P = 50\%$; U_p - квантиль нормального розподілу; $S_{\lg N}$ - середньоквадратичне відхилення довговічності, що визначається за формулою:

$$S_{\lg N} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})^2} \quad (1.7)$$

Потім будують криві щільності розподілу довговічності (рис.2.1).

Як у випадку емпіричної, так і у випадку теоретичної щільності розподілу, точки, що відповідають однаковій ймовірності, тобто $\lg N_p = const$, обробляють методом найменших квадратів за рівнянням [16]:

$$y = a + bx \quad (1.8)$$

де y – логарифм довговічності, що відповідає рівню напруги $\sigma = X$;

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})};$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x};$$

Де

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i .$$

Кутовий коефіцієнт кривої втоми визначається з виразу:

$$K = -\frac{1}{b} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1.9)$$

У виразі (1.9) – кут нахилу кривої втоми до осі абсцис. Слід мати на увазі, що в спеціальній літературі, що стосується питань втомої міцності, часто оперують виразом "кут нахилу кривої втоми", маючи на увазі під цим кутовий коефіцієнт K .

Знак "-" у виразі (1.9) визначає напрямок нахилу кривої втоми до осі абсцис[5].

За рівнянням (1.9) можна отримати розподіл середнього значення параметра D_0 в інтервалі ймовірностей від 1 до 99% (рис.1.1), яке практично виявляється близьким до нормального.

Середньоквадратичне відхилення величини K , S_K , визначається при перевірці розподілу параметра K на нормальність за відомою методикою.

Оцінка межі витривалості здійснюється методом ступінчастої зміни навантаження ("вгору - вниз"), для чого на рівні передбачуваної межі витривалості випробовують близько 30 зразків. Основу випробувань приймають 10^7 циклів.

Середнє значення та середньоквадратичне відхилення межі витривалості визначається за формулами:

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left(\frac{\sum_i n_i}{N} + 0.5 \right) \quad (1.10)$$

$$S_{\sigma_{-1}} = 1.62d \left[\frac{N \sum_i i^2 n_i - (\sum_i i n_i)^2}{N^2} + 0.029 \right] \quad (1.11)$$

де σ_0 - найменший рівень напруги; d - інтервал між рівнями напруги; n_i - число незруйнованих зразків на рівні i -ї напруги; $N = \sum n_i$ – загальна кількість неруйнувань.

Припускаючи нормальність розподілу рівня витривалості в інтервалі зміни ймовірностей від 1 до 99% і задаючи ймовірність руйнування, визначають функцію розподілу межі витривалості за рівнянням[1]:

$$\sigma_{-1p} = \bar{\sigma}_{-1} + U_p S_{\sigma_{-1}} \quad (1.12)$$

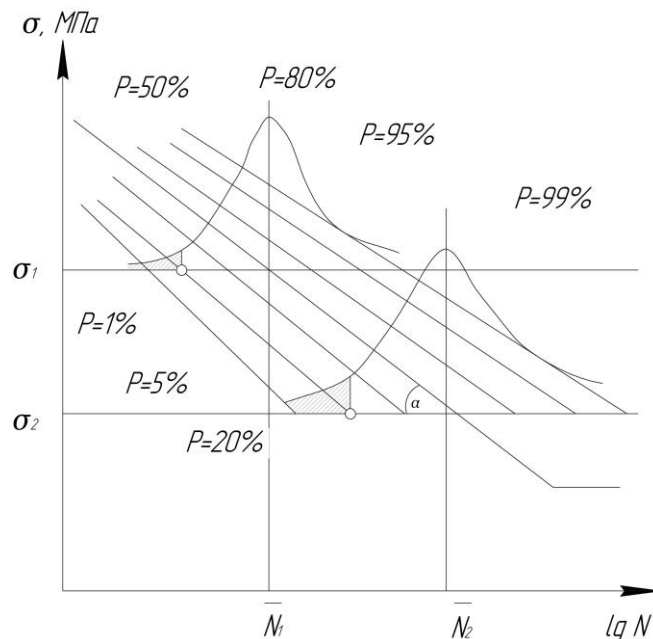


Рис.1.1. Криві втоми рівної ймовірності руйнування. Цифри біля кривих – значення P , %

де σ_{-1p} – значення σ_{-1} , що відповідають заданій ймовірності руйнувань p ; σ_{-1} – середнє значення межі витривалості відповідної ймовірності $P = 50\%$; $S\sigma_{-1}$ – середньоквадратичне відхилення межі витривалості.

Число циклів, відповідне точці перелому кривої втоми N_0 , визначається перетином похилої ділянки кривої втоми з кутом нахилу α ($K = tg \alpha$) і горизонтальної ділянки кривої, що лежить на рівні $\sigma = \sigma_{-1}$.

Число циклів, що відповідає точці перелому для різних ймовірностей руйнування, таким чином, може бути визначено з рівняння кривої втоми в напівлогарифмічній системі координат[1]:

$$10^{\frac{\sigma}{K_p}} N_p = 10^{\frac{\sigma_{-1p}}{K_p}} N_{0p} \quad (1.13)$$

Або по рівнянню (1.8), в якому $X = \sigma_{-1p}$.

Таким чином, знаючи середні значення кута нахилу (параметра K_p) та межі витривалості σ_{-1p} для заданої ймовірності руйнування P , можна за рівнянням (1.8) або (1.12) оцінити з цією ж ймовірністю значення числа циклів, що відповідає точці перелому кривої втоми. Довірчі інтервали параметрів кривої втоми можуть бути визначені з виразу.

$$\bar{X}_p - t_q S_{\bar{X}_p} < X_p < \bar{X}_p + t_q S_{\bar{X}_p}$$

В якому X виступають по чергово параметри кривої втоми: σ_{-1} ; K ; N_0 або $\lg N_0$.

У цьому виразі t_q – коефіцієнт Стюдента; q – рівень значущості; \bar{X}_p – середньоквадратичне відхилення величини \bar{X}_p відзначають з виразу:

$$S_{\bar{X}_p} = S_X \sqrt{\frac{2 + Up^2}{2n}} \quad (1.14)$$

Де S_X – середньоквадратичне відхилення величини X .

Значення статистичних оцінених параметрів кривої втоми та законів їх розподілу дозволяє перейти до розрахунку деталей обладнання на обмежену довговічність у ймовірнісному аспекті.

1.1.3. Визначення середніх значень та розсіювання характеристик втомної міцності

У результаті статистичної обробки даних втомних випробувань отримують наступні характеристики втоми зразків: σ_{-1} ; \bar{K} ; \bar{N}_0 ; $\lg \bar{N}_0$; $S_{\sigma_{-1}}$; S_K ; S_{N_0} ; $S_{\lg N_0}$, також встановлюють закони розподілу параметрів кривої втоми.

При переході від зразків до натуральної деталі необхідно знати ці характеристики для деталі. Встановлено, що при переході від зразків до деталі відбувається зниження межі витривалості, у той час як середні значення кута нахилу та абсциси точки перелому практично не змінюються і можна приймати для деталі такими ж, як і для зразків. Таким чином, можна прийняти рівність середніх значень кутів нахилу і абсцис точки перелому зразків і деталей, тобто $\bar{K} = \bar{K}_g$; $\bar{N}_0 = \bar{N}_{од}$, а середнє значення межа витривалості натурної деталі - знайти за допомогою рівняння подібності втомного руйнування:

$$\sigma_{-1\theta} = \frac{0.5\bar{\sigma}_{-1}}{\alpha_\sigma} \left[1 + \left(\frac{1}{88.3} \cdot \frac{L}{G} \right)^{-\nu_\sigma} \right] \quad (1.15)$$

Де $\bar{\sigma}_{-1\theta}$ і $\bar{\sigma}_{-1}$ - середні значення меж витривалості відповідно до натурної деталі та гладкого лабораторного зразка діаметром 7,5 мм; ν_σ - постійна, що характеризує чутливість матеріалу до концентрації напружень та масштабного фактора; α_σ - теоретичний коефіцієнт концентрації напруг; L - периметр робочого перерізу деталі або його частина, що прилягає до зони найбільшої напруженості; G - відносний градієнт першої головної напруги в точці найбільшої напруженості[6].

Величина $\frac{L}{G}$ названа критерієм подібності втомного руйнування. Фізичний зміст його полягає в тому, що якщо зразок, модель і деталь мають різні розміри та конфігурацію, але однакове співвідношення $\frac{L}{G}$, то вони матимуть збігаються функції розподілу меж витривалості.

Слід зазначити, що рівняння (1.15) справедливе лише певних рівнів концентрації напруг.

За рівнянням (1.15) обчислюють середнє значення межі витривалості деталі, а потім у припущенні нормального закону розподілу межі витривалості деталі обчислюють його коефіцієнт варіації:

$$\nu_{\sigma-1\theta} = \sqrt{\nu_{\sigma_{\max}}^2 + \nu_{\bar{\sigma}_{-1}}^2 + \nu_{\alpha\sigma}^2}, \quad (1.16)$$

Де $\nu_{\sigma_{\max}}$ - коефіцієнт варіації, що характеризує внутрішньоплашкове розсіювання меж витривалості деталей без урахування відхилень розмірів від номінальних; $\nu_{\bar{\sigma}_{-1}}$ - міжплавочний коефіцієнт варіації середніх значень меж витривалості гладких лабораторних зразків діаметром 7,5 мм; $\nu_{\alpha\sigma}$ - коефіцієнт варіації, що характеризує відхилення фактичних розмірів деталей у зоні концентрації напруг від номінальних у межах допусків.

Знаючи $\bar{\sigma}_{-1\theta}$ та $\nu_{\sigma-1\theta}$, знаходять функцію розподілу межі витривалості за виразом (1.12), задаючись законом його розподілу.

Розсіювання межі витривалості натурної деталі, яке характеризується його середньоквадратичним відхиленням $S_{\sigma-1\theta}$, може бути отримано:

$$S_{\sigma-1\theta} = \bar{\sigma}_{-1\theta} \cdot \nu_{\sigma-1\theta}, \quad (1.17)$$

Де $\nu_{\sigma-1\theta}$ визначається по виразу (1.16).

Характеристики розсіювання кута нахилу $S_{K\theta}$ та абсциси точки перелому $S_{\lg N_{\theta\theta}}$ можна визначити наступним чином. Враховуючи, що досліджень щодо визначення розсіювання параметрів кривих втоми деталей проводилося вкрай мало, а також встановлений факт зниження розсіювання довговічності при переході від зразків до деталі, що призводить до зменшення розсіювання параметрів кривої втоми, в першому наближенні можна вважати, що співвідношення величин $S_{K\theta}$; $S_{\sigma-1\theta}$; $S_{\lg N_{\theta\theta}}$ в деталі такі ж, як у зразків. Тоді знаючи $S_{\sigma-1\theta}$, можна записати:

$$S_{\lg N_{\theta\theta}} = \frac{S_{\sigma-1\theta} \cdot S_{\lg N_{\theta}}}{S_{\sigma-1}} \quad (1.18)$$

$$S_{K_0} = \frac{S_{\sigma-10} \cdot S_K}{S_{\sigma-1}} \quad (1.19)$$

Знаючи втомні характеристики деталі, їх розсіювання та закони розподілу, можна розрахувати термін служби деталі за параметром ймовірності руйнування.

1.1.4. Режими навантаження та методи статистичної обробки дослідних даних

Для розрахунку деталей металургійного устаткування обмежену довговічність, крім характеристик втомної міцності, необхідно знати діючі навантаження.

Експлуатаційна навантаженість деталей металургійного обладнання є безперервним випадковим процесом.

Статистична обробка результатів експерименту передбачає заміну випадкового процесу навантаження еквівалентним йому впорядкованим процесом.

Допустимість такої заміни обумовлюється тим, що для сучасних методів розрахунку на втомну міцність характер чергування амплітуд напруг залежно від часу є малоістотним. В результаті обробки експериментальних даних отримують спектр амплітуд напруги в певних умовах експлуатації деталей[7].

Розрізняють дві групи способів систематизації: однопараметричну та двопараметричну. Основними методами однопараметричної систематизації є метод максимумів (рис.2.2.а) та метод розмахів (рис.2.2.б).

Напруги в деталі, що визначаються методом максимумів, виходять дещо завищеними в порівнянні з фактичними, тому що насправді коливання не завжди відбуваються відносно загального середнього навантаження.

При систематизації процесу методом розмахів не враховується середнє значення амплітуди циклу, що зумовлює заниження напруженості деталі і завищення у кілька разів розрахункової довговічності проти фактичної. Це пояснюється тим, що помилка, яка виходить при використанні методу максимумів, мало змінюється при зміні нерівномірності процесу, у той час як при використанні методу розмахів помилка є змінною і залежить від нерівномірності процесу.

Тому зазначається, що при обробці осцилографічних даних для відповідальних деталей слід брати режими із завищенням їх пошкоджуючої дії (метод максимумів).

Більш точний опис імовірнісного характеру реального процесу зміни напруги виходить при застосуванні двопараметричної систематизації (рис.2.2в).

Для двопараметричної систематизації параметрами є амплітуда σ_{ai} та середнє для циклу значення σ_{mi} . Обробка у даному разі зводиться до набору відповідних повторень $\sigma_{ai} - \sigma_{mi} - n_{ji}$, де n_{ji} - число повторень значень σ_{ai} для кожного значення σ_{mi} . Ці значення можуть бути в деякому взаємозв'язку, характер тісноти якої встановлюється за допомогою кореляційної залежності, що містить інформацію про спільну щільність розподілу $f(\sigma_{max}; \sigma_{min})$ або $f(\sigma_a; \sigma_m)$.

Існують і інші методи систематизації, що мають свої особливості та припущення. Вибір того чи іншого методу систематизації залежить передусім від умов роботи досліджуваної деталі і може бути заздалегідь визначений як найкращий.

Оброблені за одним із перерахованих методів систематизації дані про режим навантаження можуть бути використані для розрахунків на обмежену довговічність. При цьому необхідно знати загальну кількість циклів дії кожної напруги.

Слід зазначити, що точно відтворити режими навантаження протягом усього періоду експлуатації деталі при експериментах неможливо. Це стосується й отримання функціональних залежностей для їх опису. Тому на практиці поділяють всі режими навантаження та описують їх функціональні залежності на найбільш типові спектри та криві розподілу, що дає можливість використовувати вже достатньо вивчені закони розподілу для опису режимів навантаження та приймати статистичні методи для їх оцінки та аналізу.

Результатом статистичної обробки даних про навантаження деталей металургійного обладнання є криві щільності ймовірності розподілу напруг та їх характеристик[1].

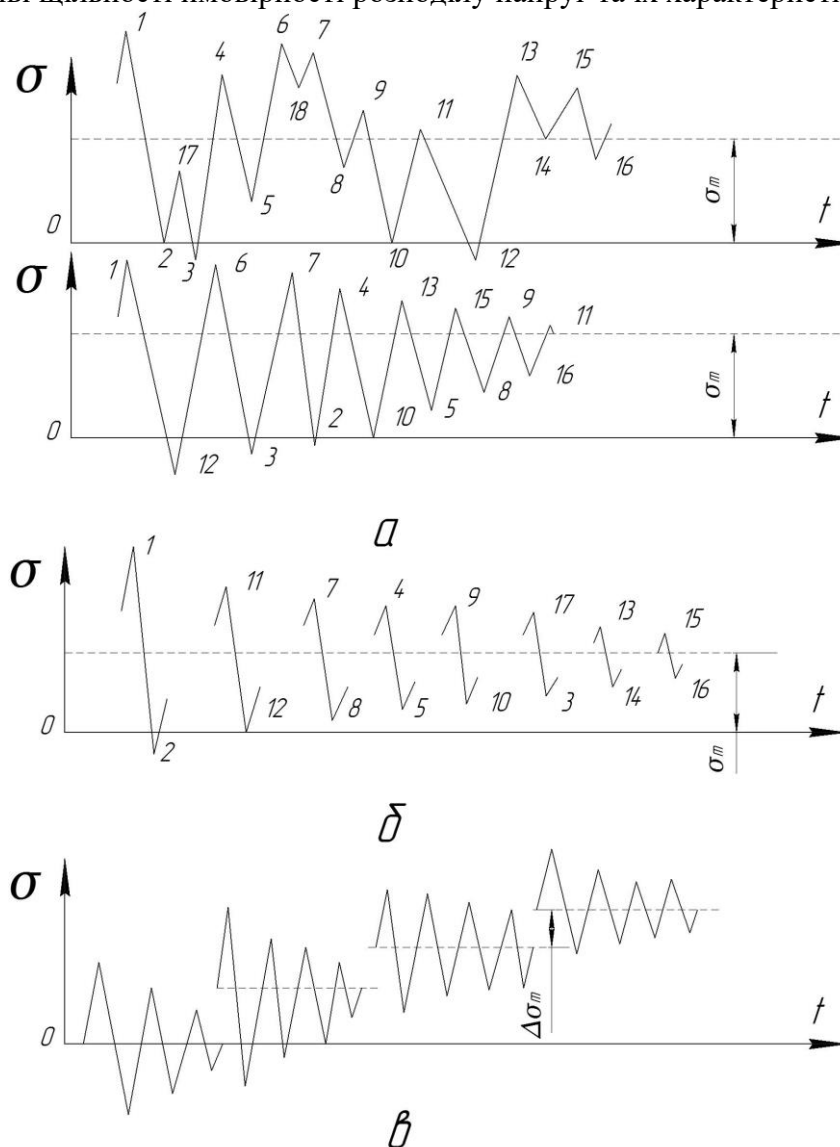


Рис. 1.2 Способи систематизації: а – по максимумам; б – по розмахам; в – двопараметрична; $\Delta\sigma_m$ – величина розрядів або ступені, на які розбивається область середніх напружень циклів

Питання для самоперевірки

1. Чому при розрахунку на втомну довговічність в металургійному обладнанні важливо враховувати імовірнісний аспект?
2. Які основні параметри необхідно знати для ведення розрахунку деталей на втомну довговічність в імовірнісному аспекті? Назвіть не менше 5.
3. Які типи навантажень характерні для металургійного обладнання і як їх враховують при розрахунку на втомну довговічність?
4. Що таке крива втоми? Які параметри вона характеризує?
5. Які основні фактори впливають на розсіювання характеристик кривої втоми?
6. Які статистичні характеристики використовуються для опису розсіювання параметрів кривої втоми?
7. Які методи використовуються для імовірнісної оцінки параметрів кривої втоми?

8. Як враховується вплив масштабного фактору при імовірнісній оцінці параметрів кривої втоми?
9. Які існують моделі накопичення пошкоджень при втомному руйнуванні, що враховують імовірнісний характер процесу?
10. Які методи використовуються для визначення середніх значень характеристик втомної міцності?
11. Як визначається розсіювання характеристик втомної міцності на основі експериментальних даних?
12. Які існують критерії оцінки втомної міцності, що враховують розсіювання характеристик матеріалу?
13. Які режими навантаження можуть виникати в металургійному обладнанні? Наведіть приклади.
14. Які методи статистичної обробки дослідних даних використовуються для аналізу режимів навантаження?
15. Як результати статистичної обробки режимів навантаження використовуються при розрахунку деталі на втомну довговічність в імовірнісному аспекті?

2. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ СИМЕТРИЧНИХ ЦИКЛАХ НАПРУГИ

В якості математичної моделі для визначення терміну служби деталі найбільш часто використовують вираз[1]:

$$T_g = \frac{aN_{od} \cdot 10^{\frac{\sigma-1d}{K_o}}}{n_i I}, \quad (2.1)$$

де

$$I = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 10^{\frac{\sigma}{K_o}} f(\sigma) d\sigma$$

Обчислення інтеграла I для різних законів розподілу амплітуд напруг:

$$f(\sigma) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\sigma-d}{2S^2}}, \quad (2.2)$$

Обчислення інтегралу має вид:

$$I = e^{-\frac{d^2-d^2}{2S^2}} [\Phi_0(Z_2) - \Phi_0(Z_1)], \quad (2.3)$$

$$Z_1 = \frac{\sigma_{\min} - d}{S}; \quad Z_2 = \frac{\sigma_{\max} - d}{S}; \quad (2.4)$$

$$d = d + \frac{S^2}{M_k}, \quad (2.5)$$

Де d - математичне очікування амплітуд напруг; S - середньоквадратичне відхилення амплітуд напруг; $\Phi_0(Z)$ - функція Лапласа; $M = \frac{1}{\lg 10}$ - модуль переходу від натуральних логарифмів до десяткових.

Експериментально встановлено, що при багаторазовій зміні рівнів напруг, що діють, практично $a = 1$. Тому вираз для T_g матиме вигляд[1]:

$$T_g = \frac{N_{od} 10^{\frac{\sigma_{-1d}}{K_g}}}{n_t I}, \quad (2.6)$$

З виразу (2.6) видно, що термін служби деталі є функцією випадкових аргументів $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$, так як n_t (кількість циклів роботи деталі, наприклад, за рік) і I приймаємо постійними.

При нормальному законі розподілу величин $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$ (вважаємо, що закони розподілу параметрів кривої втоми для зразків і деталі ідентичні) щільність розподілу терміну служби є спільною щільністю розподілу параметрів $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$ у припущенні їх незалежності

$$f(T_g) = f_1(N_{od}) \cdot f_2(\sigma_{-1d}) \cdot f_3(K_g) = \frac{1}{(2\pi)^2 S_{N_{od}} \cdot S_{K_g} \cdot S_{\sigma_{-1d}}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(N_{od} - \bar{N}_{od})^2}{S_{N_{od}}^2} + \frac{(K_g - \bar{K}_g)^2}{S_{K_g}^2} + \frac{(\sigma_{-1d} - \bar{\sigma}_{-1d})^2}{S_{\sigma_{-1d}}^2} \right]} \quad (2.7)$$

З виразу (2.7) видно, що $f(T_g)$ являє собою нормальний закон у просторі трьох вимірів.

Таким чином, для терміну служби деталі T_g можна прийняти нормальний закон розподілу. Насправді, проте, частіше приймають логарифмічно нормальний розподіл терміну служби. як досить добре відповідне досвідченим даним і зручне в розрахунках, тобто

$$(\lg T_g)_p = \lg \bar{T}_g + U_p S_{\lg T_g}, \quad (2.8)$$

Де $(\lg T_g)_p$ - середнє значення логарифму довговічності, що відповідає заданій ймовірності руйнування P ; $\lg \bar{T}_g$ - середнє значення логарифму довговічності, що відповідає ймовірності руйнування $P = 50\%$; U_p - квантиль нормального розподілу; $S_{\lg T_g}$ - середньоквадратичне відхилення логарифму терміну служби.

Для того, щоб визначити розподіл $(\lg T_g)_p$ потрібно знати величину $S_{\lg T_g}$.

Про логарифмувавши вираз (2.8) і використовуючи відому з теорії ймовірностей формулу для дисперсії функції, коли аргументи незалежні, матимемо:

$$S_{\lg T_g}^2 = S_{\lg N_{od}}^2 + \frac{S_{\sigma_{-1d}}^2}{K_g^2} + \frac{\bar{\sigma}_{-1d}^2}{K_g^4} S_{K_g}^2$$

Звідки визначаємо середньоквадратичне відхилення логарифму терміну служби деталі:

$$S_{\lg T_g} = \sqrt{S_{\lg N_{oo}}^2 + \frac{1}{K_g^2} \left[S_{\sigma_{-1\theta}}^2 + \left(\frac{\sigma_{-1\theta}}{K_g} \right)^2 S_{K_g}^2 \right]} \quad (2.9)$$

Аналіз виразу (2.9) показує, що середньоквадратичне відхилення логарифму терміну служби деталі залежить не тільки від розсіювання кута нахилу кривої втоми, межі витривалості та абсцис точки перелому, а й від їх середніх значень.

Задаючись ймовірністю руйнування P , тобто знаючи квартиль U_p і приймаючи $\lg \bar{T}_g \approx \lg T_g$, можна за виразом (2.8) визначити термін служби деталі з цією ймовірністю. Довірчий інтервал для кожного значення визначимо як:

$$(\lg \bar{T}_g)_p - tq S_{(\lg \bar{T}_g)_p} < (\lg T_g)_p < (\lg \bar{T}_g)_p + tq S_{(\lg \bar{T}_g)_p}, \quad (2.10)$$

Де $S_{(\lg \bar{T}_g)_p}$ - середньоквадратичне відхилення середнього значення параметра $\lg T_g$, що відповідає заданій ймовірності руйнування P , визначається з виразу:

$$S_{(\lg \bar{T}_g)_p} = S_{\lg T_g} \sqrt{\frac{2 + U_p^2}{2n}}, \quad (2.11)$$

У виразі (2.6) величини n_t та I прийняті детермінованими для певної, наприклад, річної програми виробництва. Однак програма виробництва рік у рік змінюється, внаслідок чого змінюються режими навантаження обладнання та як наслідок величини n_t та I .

Таким чином ці величини є випадковими і мають розсіювання[8].

Спектри навантажень можуть бути визначені шляхом обробки експериментальних даних щодо вимірювання навантажень у деталях обладнання для кожної програми виробництва. Маючи подібні спектри, можна отримати варіаційний ряд для I та встановити закон розподілу, та його параметри: середнє значення і середньоквадратичне відхилення.

На підставі виразу (2.6) визначимо середньоквадратичне відхилення логарифму довговічності з урахуванням розсіювання величин n_t та I .

$$S_{\lg T_g} = \sqrt{S_{\lg N_{oo}}^2 + S_{\lg n_t}^2 + S_{\lg I}^2 + \frac{1}{K_g^2} \left[S_{\sigma_{-1\theta}}^2 + \left(\frac{\sigma_{-1\theta}}{K_g} \right)^2 S_{K_g}^2 \right]} \quad (2.12)$$

Величина дисперсії $S_{\lg I}^2$ може бути визначена з виразу:

$$S_{\lg I}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\lg I - \lg \bar{I})^2}{n-1} \quad (2.13)$$

Аналогічно може бути визначена дисперсія величини $\lg n_t$.

Таким чином формула (2.12) дозволяє визначити середньоквадратичне відхилення довговічності деталі з урахуванням розсіювання як параметрів кривої втоми, а й характеристик навантаження. За відсутності даних розсіювання величин n_t та I формула (2.12) зводиться до формули (2.9).

Питання для самоперевірки

1. Що таке "ресурс" деталі металургійного обладнання?

2. Що таке "функція розподілу" і як вона описує ресурс деталі?
3. Який тип напружень називається "симетричним циклом напруги"? Наведіть приклад.
4. Які статистичні характеристики використовуються для опису функції розподілу ресурсу?
5. Які фактори впливають на функцію розподілу ресурсу деталі при симетричних циклах напруги?
6. Які існують типові закони розподілу, що використовуються для опису ресурсу деталей металургійного обладнання? (Назвіть хоча б 2)
7. Як експериментальні дані використовуються для визначення функції розподілу ресурсу?
8. Що таке "гістограма" і як вона пов'язана з функцією розподілу?
9. Як можна оцінити ймовірність безвідмовної роботи деталі на певний термін, знаючи функцію розподілу її ресурсу?
10. Чому важливо знати функцію розподілу ресурсу деталей металургійного обладнання?

3. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ АСИМЕТРИЧНИХ ЦИКЛАХ НАПРУГ

Розрахунок на довговічність, за виразом (2.2), справедливий у разі, коли деталь працює при симетричних циклах навантаження. Однак більшість деталей металургійного обладнання працює при асиметричних циклах навантаження, у зв'язку з чим розрахунок довговічності можна проводити [1]:

При цьому термін служби при $a = 1$.

$$T_g = \frac{N_{od} \cdot 10^{\frac{\sigma_{-1d} - \sigma_{np}}{K_g}}}{n_i} \quad (3.1)$$

Де σ_{np} - приведена до симетричного циклу напруга.

Визначення наведеного до симетричного циклу напругу σ_{np} здійснюють наступним чином.

Спочатку визначають загальне чи еквівалентне число циклів, яке може витримати деталь до руйнування при заданому режимі навантаження.

$$N_{ac} = \frac{1}{\sum \frac{C_i}{N_i}} = \frac{1}{\frac{C_1}{N_1} + \frac{C_2}{N_2} + \dots + \frac{C_i}{N_i}}, \quad (3.2)$$

де C_1, C_2, C_i – відносні числа циклів для діючих напруг.

Числа циклів визначених по (4.2), відповідає напруга:

$$\sigma_{ac} = \sigma_{-1d} + K_g (\lg N_{od} - \lg N_{ac}) \quad (3.3)$$

Приведення пульсуючого циклу до симетричного здійснюють за виразом:

$$\sigma_{np} = \sigma_{ac} + \psi_\sigma \sigma_{ma}, \quad (3.4)$$

Де ψ_σ - коефіцієнт асиметрії циклу; σ_{ma} - еквівалентне значення середніх напруг, що визначається з урахуванням заданого їх співвідношення:

$$\sigma_{ma} = \sigma_{m1} C_1 + \sigma_{m2} C_2 + \dots + C_{mj} C_i, \quad (3.5)$$

Наведена кількість циклів до руйнування, що відповідає напрузі σ_{np} .

$$N_{np} = N_{od} 10^{\frac{\sigma_{-1d} - \sigma_{np}}{K_g}}, \quad (3.6)$$

Прологарифмувавши вираз (3.1), за аналогією з вищевикладеним визначимо середньоквадратичне відхилення логарифму довговічності:

$$S_{lg T_g} = \sqrt{S_{lg N_{od}}^2 + \frac{1}{K_g^2} [(S_{\sigma_{-1d}}^2 + S_{\sigma_{np}}^2) + \frac{\sigma_{-1d}^2 + \sigma_{np}^2}{K_g^2} S_{K_g}^2] + S_{lg N_t}^2} \quad (3.7)$$

Практичне визначення величин $S_{\sigma_{np}}^2$ та $S_{lg N_t}^2$ може бути здійснено звичайними методами теорії ймовірностей за наявності експериментальних даних про навантаження та числа циклів їх дії для різних програм виробництва. За відсутності таких даних величини $S_{\sigma_{np}}^2$ та $S_{lg N_t}^2$ у виразі (3.7) приймаємо рівними нулю.

Побудову функції розподілу здійснюють за виразом (3.4), задаючи різні ймовірності руйнування P .

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняється асиметричний цикл напруг від симетричного? Наведіть приклад.
2. Що таке "термін служби" деталі? Чим він відрізняється від "ресурсу"?
3. Які додаткові параметри необхідно враховувати при визначенні функції розподілу терміну служби при асиметричних циклах напруг, порівняно з симетричними?
4. Як враховується вплив середнього напруження циклу на термін служби деталі?
5. Які існують критерії втомної міцності при асиметричних циклах напруг? (Назвіть хоча б один)
6. Як впливає знак середнього напруження (розтяг чи стиск) на термін служби деталі?
7. Які методи використовуються для експериментального визначення терміну служби деталі при асиметричних циклах напруг?
8. Як враховується вплив концентраторів напружень при визначенні функції розподілу терміну служби?
9. Які існують математичні моделі, що описують функцію розподілу терміну служби при асиметричних циклах напруг?
10. Як знання функції розподілу терміну служби допомагає при плануванні технічного обслуговування та ремонту металургійного обладнання?

4. ІМОВІРНІСНА ТРАКТОВКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Методи викладені у розділах 3 та 4, припускають знання закону розподілу довговічності.

Для випадку, коли закон розподілу довговічності невідомий, а параметри кривої втоми розподілені за нормальним законом, функція розподілу величини T , тобто $P(T)$ дорівнює ймовірності одночасного попадання параметрів кривої втоми в якусь область D , тобто [1]:

$$P(T_g) = P[(N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g) \subset D] = \iiint_{(D)} P(N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g) dN_{od} d\sigma_{-1d} dK_g \quad (4.1)$$

Припускаючи незалежність параметрів $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$, отримаємо:

$$P(N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g) = P(N_{od})P(\sigma_{-1d})P(K_g) \quad (4.2)$$

Прологарифмувавши вираз (4.1) та розв'язавши його, наприклад, відносно σ_{-1d} , отримаємо:

$$\sigma_{-1d} = K_g \lg \frac{T_g n_t I}{aN_{od}} \quad (4.3)$$

Для визначення меж інтегрування будемо криву залежність $\frac{\sigma_{-1d}}{K_g}$ від N_{od} (рис.4.1).

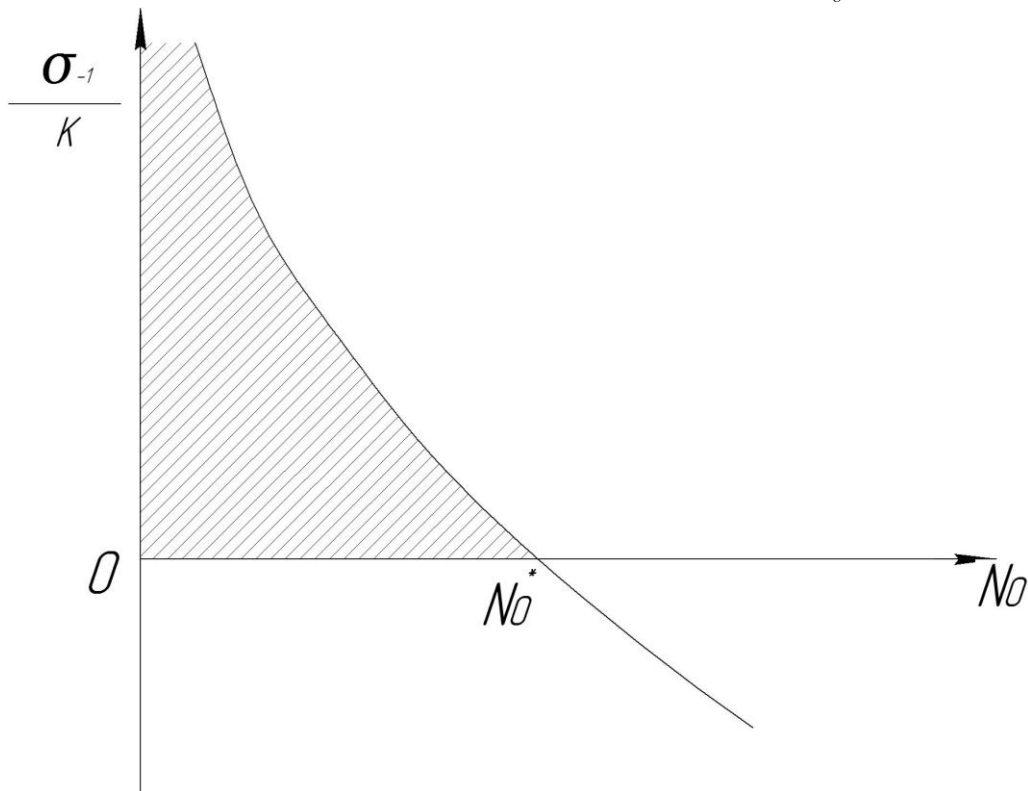


Рис. 4.1 До визначення області інтегрування величин $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$

З виразу (4.3) видно, що величина $\frac{T_g n_t I}{aN_{od}} \geq 1$. Тоді $N_{od} \leq \frac{T_g n_t I}{a}$ і, отже, $0 \leq N_{od} \leq \frac{T_g n_t I}{a}$.

Для σ_{-1d} і K_g одержимо наступні межі інтегрування:

$$0 \leq K_g < \infty; \quad 0 \leq \sigma_{-1d} \leq K_g \lg \frac{T_g n_t I}{aN_{od}}$$

Відомо, що в "трисигмових" межах на нормальній імовірнісній кривій зосереджено 99.73% всіх потраплянь випадкової величини. Тому сенс змінити межі інтегрування $N_{od}; \sigma_{-1d}; K_g$.

Таким чином

$$\bar{N}_{od} - 3S_{N_{od}} \leq N_{od} \leq \bar{N}_{od} + 3S_{N_{od}} \leq \frac{T_g n_t I}{a};$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_g - 3S_{K_g} &\leq K_g \leq \bar{K}_g + 3S_{K_g}; \\ \bar{\sigma}_{-1\theta} - 3S_{\sigma_{-1\theta}} &\leq \sigma_{-1\theta} \leq K \lg \frac{T_g n_t I}{aN_{o\theta}}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Тоді для нормальних законів розподілу вказаних трьох параметрів вираз (4.1) матиме вигляд:

$$P(T_g) = S_{N_{o\theta}} S_{K_g} S_{\sigma_{-1\theta}} (2\pi)^{-\frac{3}{2}} \int_{\bar{N}_{o\theta}-3S_{N_{o\theta}}}^{\bar{N}_{o\theta}+3S_{N_{o\theta}}} \int_{\bar{K}_g-3S_{K_g}}^{\bar{K}_g+3S_{K_g}} \int_{\bar{\sigma}_{-1\theta}-3S_{\sigma_{-1\theta}}}^{K_g \lg \frac{T_g n_t I}{aN_{o\theta}}} e^{-\frac{(N_{o\theta}-\bar{N}_{o\theta})^2}{2S_{N_{o\theta}}^2}} e^{-\frac{(K_g-\bar{K}_g)^2}{2S_{K_g}^2}} e^{-\frac{(\sigma_{-1\theta}-\bar{\sigma}_{-1\theta})^2}{2S_{\sigma_{-1\theta}}^2}} dN_{o\theta} d\sigma_{-1\theta} dK \quad (4.5)$$

Провівши відповідні математичні перетворення, приводимо до виразу[1]:

$$T_{gp} = \frac{a}{n_t I} (\bar{N}_{o\theta} + U_p S_{N_{o\theta}}) 10^{\frac{\bar{\sigma}_{-1\theta} + U_p S_{\sigma_{-1\theta}}}{K_g + U_p S_{K_g}}} \quad (4.6)$$

Таким чином, для побудови розподілу терміну служби деталей за рівнянням (4.6) необхідно підставляти в нього параметри $N_{o\theta}; \sigma_{-1\theta}; K_g$, що відповідають одному заданому значенню ймовірності руйнування P . При цьому термін служби T_g буде відповідати тій же ймовірності.

Цей висновок зроблено при вирішенні рівняння (3.1) щодо $\sigma_{-1\theta}$. На рис. 4.1 точка $N_0^* = \frac{T n_t \cdot I}{a}$ є крайнім правим кордоном області D .

Неважко показати, що аналогічний висновок можна зробити, якщо рівняння (4.1) дозволити щодо кута нахилу кривої втоми K_g і абсцис точки перелому кривої втоми $N_{o\theta}$, для яких встановлено, що вони так само, як і межа витривалості $\sigma_{-1\theta}$ розподілені за нормальним законом.

При цьому сфери інтегрування відповідно зміняться.

Питання для самоперевірки

1. Чому при оцінці втомної довговічності деталей важливо враховувати ймовірнісний характер?
2. Що таке "втомна довговічність"?
3. Які фактори, що впливають на втомну довговічність, мають випадковий характер? Наведіть приклади.
4. Які статистичні характеристики використовуються для опису втомної довговічності в ймовірнісному підході?
5. Які існують функції розподілу, що часто використовуються для опису втомної довговічності? (Назвіть хоча б одну)
6. Що означає "ймовірність руйнування" деталі при заданому навантаженні та терміні служби?
7. Як можна визначити ймовірність безвідмовної роботи деталі на певний термін, знаючи розподіл її втомної довговічності?
8. Як враховується вплив масштабного фактору на ймовірнісну оцінку втомної довговічності?

9. Що таке "коефіцієнт запасу міцності" і як він пов'язаний з імовірнісною оцінкою втомної довговічності?
10. Які переваги використання імовірнісної трактовки втомної довговічності порівняно з детермінованим підходом?

5. ВИЗНАЧЕННЯ РІВНІВ НАПРУГ, ЩО ВРАХОВУЮТЬСЯ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ДЕТАЛЕЙ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ У ІМОВІРНОМУ АСПЕКТІ

У рівнянні визначення терміну служби деталі (3.1) входить інтеграл $I = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 10^{\frac{\sigma}{K_0}} f(\sigma) d\sigma$, у якому $\sigma_{\min} = q\sigma_{-10}$, де q - мінімальний рівень напружень, починаючи з якого напруги необхідно враховувати з розрахунку обмежену довговічність. Цей рівень розрахункові необхідно знати.

Експериментально встановлено, що у сумарну довговічність можуть впливати напруги як вище, а й нижче межі витривалості. Кількісна оцінка впливу напружень нижче межі витривалості утруднена через відсутність необхідних дослідних даних.

В якості рівня, вище якого, напруження включають до розрахунку, приймають $\sigma = q\sigma_{-10}$, де q коефіцієнт рекомендують вибирати в межах $0,5 \div 1,0$. При цьому даються лише загальні вказівки про залежність від властивостей матеріалу, конструктивних особливостей деталей, режимів навантаження та інших факторів[8].

Зв'язуючи величину q з межею витривалості деталі, мають на увазі його середнє значення $\bar{\sigma}_{-10}$. Однак, при визначенні межі витривалості спостерігається істотний розкид його

значень, що оцінюється коефіцієнтом варіації $V_{\sigma_{-10}} = \frac{S_{\sigma_{-10}}}{\bar{\sigma}_{-10}}$, де $S_{\sigma_{-10}}$ - середнє квадратичне відхилення σ_{-10} .

Крім того, умови роботи деталей в експлуатації такі, що є значне розсіювання напруг, що діють, наприклад, амплітуди σ_a . Тому величина q повинна бути пов'язана не тільки із середніми значеннями межі витривалості та діючих напружень, а й з їх розсіюванням.

За певної довговічності деталі умовою руйнування є:

$$M = \sigma_{-10} - \sigma_a < 0 \quad (5.1)$$

Ввівши в це рівняння коефіцієнт ю тесть враховуючи, що пошкоджує дію і частина напруг, що лежать нижче межі витривалості, отримуємо:

$$M_1 = q\sigma_{-10} - \sigma_a < 0 \quad (5.2)$$

Передбачаючи відповідність величини M_1 нормальному закону розподілу з параметрами $\bar{M}_1 = q\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}_a$ і середньоквадратичним відхиленням S_{M_1} , і вважаючи величину q випадковою і таку, що має розсіювання, визначимо дисперсію величини M_1 :

$$S_{M_1}^2 = q^2 S_{\sigma_{-10}}^2 + \sigma_{-10}^2 S_q^2 + S_{\sigma_a}^2 \quad (5.3)$$

Знаючи середнє значення величини M_1 та її дисперсію, визначимо значення M_{1p} , що відповідає певній ймовірності руйнування P , виходячи з умови руйнування:

$$M_{1p} = M_1 + U_p S_{M_1} = 0 \quad (5.4)$$

Тоді

$$U_p = -\frac{M_1}{S_{M1}}$$

$$\text{або } U_p = \frac{(\bar{q}\sigma_{-1\theta} - \sigma_a)^2}{\bar{q}^2 S_{\sigma_{-1\theta}}^2 + \sigma_{-1\theta}^2 S_q^2 + S_{\sigma_a}^2} \quad (5.5)$$

З виразу (5.5), провівши відповідні перетворення, отримаємо:

$$\bar{q} = \frac{-\sigma_{-1\theta}\sigma_a - U_p \sqrt{(\sigma_{-1\theta}^2 - S_{\sigma_{-1\theta}}^2 U_p^2)(\sigma_{-1\theta}^2 S_q^2 + S_{\sigma_a}^2) + S_{\sigma_{-1\theta}}^2 \sigma_a^2}}{-(\sigma_{-1\theta}^2 - S_{\sigma_{-1\theta}}^2 U_p^2)} \quad (5.6)$$

Знак "мінус" перед підкореним виразом незалежно від ймовірності відповідає умові руйнування (5.2).

У вираз (5.6) входять середні значення межі витривалості та діючих напружень, а також оцінки їхнього розсіювання, які можуть бути визначені відомими методами [8].

До рівняння (5.6) входить S_q величина, яка приблизно може бути визначена наступним чином.

Зазвичай при розрахунках на витривалість вважають, що руйнація настає у разі, коли напруги рівні або перевершують середні значення межі витривалості, тобто $\sigma_a \geq \sigma_{-1\theta}$. На цій підставі, враховуючи розсіювання межі витривалості і припускаючи закон його розподілу нормальним, тобто $(\sigma_{-1\theta})_p = \sigma_{-1\theta} + U_p S_{\sigma_{-1\theta}}$, можна вважати, що напруги не повинні бути меншими від кожного зі значень межі витривалості в інтервалі ймовірностей P від 1 до 50% ($U_p < 0$), тобто $\sigma_a > (\sigma_{-1\theta})_p$.

Тоді величина:

$$q = \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1\theta}} = \frac{(\sigma_{-1\theta})_p}{\sigma_{-1\theta}} = \frac{\sigma_{-1\theta} - U_p S_{\sigma_{-1\theta}}}{\sigma_{-1\theta}} = 1 - U_p V_{\sigma_{-1\theta}} \quad (5.7)$$

Задаючи ймовірність руйнування P від 1 до 50%, можна приблизно визначити S_q для величини q . Якщо не враховувати розсіювання q , то в рівнянні (5.6) необхідно прийняти $\sigma_{-1\theta}^2 S_q^2 = 0$.

Таким чином рівняння (5.6) дозволяє з необхідним ступенем достовірності (U_p) визначити мінімальний рівень обчислюваних у розрахунках на втомну міцність напруг з урахуванням механічних властивостей деталі ($\sigma_{-1\theta}$ і $S_{\sigma_{-1\theta}}$) та режимів навантаження (σ_a і S_{σ_a}).

Рівняння (5.6) застосовується у разі, коли середня напруга спектру σ_a не перевищує або дорівнює середньому значенню межі витривалості $\sigma_{-1\theta}$. [9]

Питання для самоперевірки

1. Чому при розрахунку деталей на довговічність важливо враховувати різні рівні напруг?
2. Які основні джерела виникнення напруг у деталях металургійного обладнання?
3. Що таке "номінальне напруження"?
4. Що таке "дійсне напруження"? Чим воно відрізняється від номінального?
5. Що таке "залишкові напруження"? Як вони впливають на довговічність деталі?

6. Які статистичні методи використовуються для опису розподілу напруг у деталі?
7. Як враховується вплив концентраторів напружень (отворів, кутів, тощо) при визначенні рівнів напруг?
8. Що таке "спектр напружень"? Як він використовується при розрахунках на довговічність?
9. Як визначаються екстремальні значення напруг, що враховуються при імовірнісних розрахунках?
10. Чому важливо враховувати невизначеність при визначенні рівнів напруг?

6. ПРИКЛАДИ МОЖЛИВОГО РОЗРАХУНКУ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ

В якості прикладу розглянемо розрахунок на обмежену довговічність основних деталей стану холодної прокатки труб.

Експериментальні дослідження навантаження деталей станів холодної прокатки труб (ХПТ) дозволяють зробити висновок про те, що вони працюють в області обмеженої довговічності. Тому при проектуванні нових станів ХПТ, які відповідали б сучасним вимогам надійності та довговічності, а також при інтенсифікації існуючих процесів прокатки на станах, необхідно розраховувати деталі за методикою обмеженої довговічності, що враховує розкид властивостей матеріалів деталей і режимів їх навантаження.

У станинах прокатних станів і станів ХПТ, зокрема, поблизу отворів для натискних гвинтів і в зонах кутового сполучення поперечок і стійок дуже часто з'являються тріщини втоми, причиною виникнення яких виявляються високі фантастичні напруги, що перевищують номінальні в 2 - 3 рази (а іноді й більше).

У зв'язку з цим станину стану ХПТ необхідно розраховувати на міцність не за напругою, що допускається, а за умовами втомої міцності з визначенням терміну служби і запасу довговічності в імовірнісному аспекті.

Для цього, перш за все, необхідно мати дані, що характеризують втомну міцність станини стану ХПТ, які наведені в таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Характеристики втомної міцності для Сталі 30

№ п/п	Характеристика	Значення
1	Межа витривалості σ_{-1} , МПа	158.6
2	Кутовий коефіцієнт K , МПа	70.2
3	Абсциса точки перелому $N_0 \cdot 10^6$	2.08
4	Логарифм абсциси точки перелому $\lg N_0$	6.318
5	Розсіювання параметру $\sigma_{-1} S_{\sigma_{-1}}$, МПа	6.32
6	Розсіювання параметру $K S_K$, МПа	9.99
7	Розсіювання параметру $N_0 S_{N_0}$	0.434
8	Розсіювання параметру $\lg N_0 S_{\lg N_0}$	0.098

При розрахунках на втомну міцність і довговічність станин станів ХПТ необхідний правильний і повний облік факторів, що впливають на їх властивості міцності. Основними є масштабний фактор та концентрація напруг.

Відомо, концентрація напруг і масштабний фактор не змінюють кута нахилу та абсциси числа циклів кривої втоми, але зменшують межу витривалості. це означає, що при переході від зразка до деталі $K = K_g$ і $N_0 = N_{од}$.

Таким чином приймаємо для станини: $K_c = 70.2$ МПа; $N_{oc} = 2.08 \cdot 10^6$.

Вихідним рівнянням щодо межі витривалості станини є рівняння подібності втомного руйнування.

$$\sigma_{-1d} = \frac{0.5\sigma_{-1}}{\alpha_\sigma} \left[1 + \left(\frac{1}{88.3} \cdot \frac{L}{G} \right)^{-\nu_\sigma} \right]$$

Як видно з цього рівняння, для визначення середнього значення межі витривалості необхідно знати теоретичний коефіцієнт концентрації напруги α_σ , середнє значення σ_{-1} межі витривалості гладкого лабораторного зразка діаметром 7.52 мм, критерій подібності втомного руйнування $\frac{L}{G}$ і величину α_σ , що характеризує чутливість матеріалу до концентрації напруги.

Величину α_σ можна визначити наступним чином. Найбільш часто станина руйнується в місці переходу стійки в поперечину та отвори під натискний гвинт (рис. 6.1).

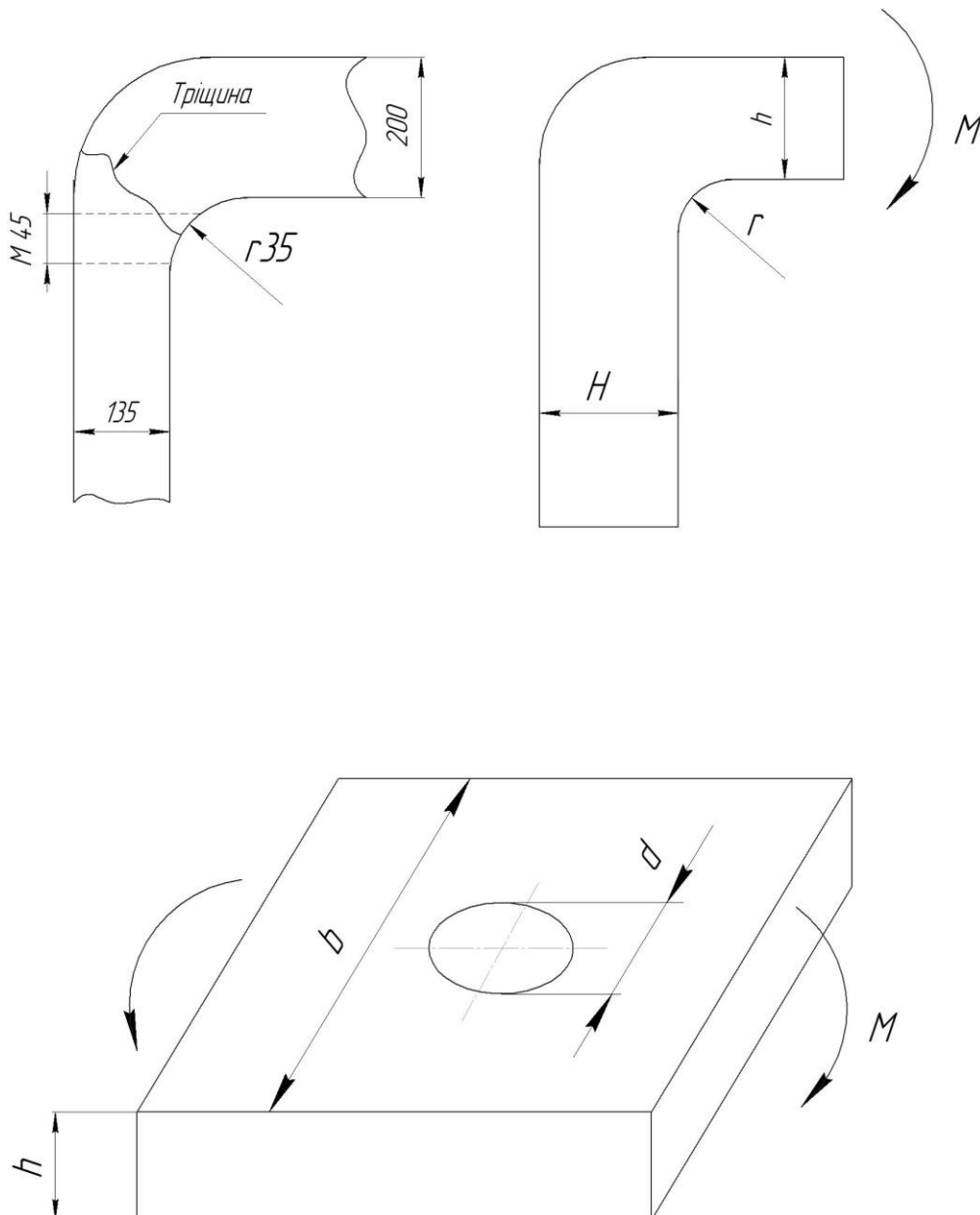


Рис. 6.1 - До визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напруг у найбільш небезпечному перерізі станини

Для пластини обмеженої ширини в залежності від r/h знаходимо графічно величину α_{σ_1} .
Для нашого випадку $r/h = 35 : 135 = 0.259$; $\alpha_{\sigma} = 1.9$.

Для пластини з отвором (рис. 6.1) у нашому випадку $d/b = 45 : 220 = 0.21$; $b/h = 220 : 135 = 1.63$; $\alpha_{\sigma} = 1.9$.

Загальний коефіцієнт концентрації α_{σ} дорівнює:

$$\alpha_{\sigma} = \alpha_{\sigma_1} \cdot \alpha_{\sigma_2} = 3.61$$

Рекомендується приймати коефіцієнт концентрації напруги близько отвору під гайку натискного гвинта близько $3.0 \div 4.0$, $\alpha_{\sigma} = 3.0 \div 3.5$.

Отриманий нами коефіцієнт концентрації $\alpha_{\sigma} = 3.61$ достатньо добре співпадає з цими рекомендаціями.

Параметр L , що представляє собою частину параметру робочого перерізу деталі, що примикає до зони підвищеної напруженості, на підставі рис.6.1 дорівнює $L = 2h$ або $L = 2 \cdot 135 = 270 \text{ мм}$.

Величина відносного градієнта напруг L визначається:

$$\bar{G} = \frac{2.3}{r} + \frac{2}{h} = \frac{2.3}{35} + \frac{2}{135} = 0.081$$

$$\text{Тоді } \frac{L}{G} = 270 : 0.081 = 3352; \lg \frac{L}{G} = 3.526$$

Постійна V_{σ} прийнята $V_{\sigma} = 0.06$.

До рівняння подібності входить величина $\bar{\sigma}_{-1}$, що є середнім значенням межі витривалості гладкого лабораторного зразка діаметром 7.52 мм. Однак часто випробування на витривалість проводять на зразках діаметром 9.48 мм або 10 мм. Ці зразки гостовані.

В рівнянні подібності можна використовувати середнє значення межі витривалості лабораторного зразка діаметром 9.48 мм або 10 мм замість зразка діаметром 7.52 мм.

У нашому випадку $\bar{\sigma}_{-1} = 158.6 \text{ МПа}$.

Тоді значення межі витривалості станини:

$$\bar{\sigma}_{-1c} = \frac{158.6 \cdot 0.5}{3.61} / 1 + \left(\frac{1}{88.3} \cdot 3353.4 \right)^{-0.06} / = 39.6 \text{ МПа}$$

Отже, межа витривалості станини порівняно із зразком знизилася вчетверо. Коефіцієнт варіації межі витривалості станини $V_{\sigma_{\max}}$ визначимо за виразом:

$$V_{\sigma_{\max}} = \frac{(1 - 10^{-2S})10^h}{2(U + 10^h)} \quad (6.1)$$

$$\text{Де } h = 1.946V_{\sigma} + \lg(\varepsilon_{\infty} \bar{\sigma}_{-1}) - V_{\sigma} \lg \frac{L}{G}; \quad U = 0.5\bar{\sigma}_{-1}$$

Для сталей типу 30Л при $\varepsilon_{\infty} = 0.5$ рекомендують вибирати S в межах $0.045 \div 0.050$.
Приймаємо $S = 0.045$. Тоді по формулі (6.1) $V_{\sigma_{\max}} = 0.042$.

За відсутності експериментальних даних рекомендується брати міжплавочний коефіцієнт варіації середніх значень меж витривалості лабораторних зразків $V_{\sigma_{-1}} \cong V_{\sigma_b} \cong 0.05 \div 0.10$. Приймаємо $V_{\sigma_{-1}} = 0.05$.

Коефіцієнт варіації, що враховує розсіювання фактичних розмірів деталі в зоні концентрації напруги, через відсутність даних приймаємо $V_{\alpha\sigma} = 0$.

Тоді по формулі (2.16) при $V_{\alpha\sigma} = 0$

$$V_{\sigma_{-1\theta}} = \sqrt{0.042^2 + 0.05^2} = 0.0653$$

А величина $S_{\sigma_{-1\theta}}$ дорівнює:

$$S_{\sigma_{-1\theta}} = 39.6 \cdot 0.0653 = 2.59 \text{ МПа}$$

Визначимо середньоквадратичні відхилення кута нахилу кривої втоми K_c та абсциси точки перелому N_{oc} станини за виразами (2.18) та (2.19).

$$S_{K_c} = \frac{0.59 \cdot 9.99}{6.32} = 4.09 \text{ МПа}$$

$$S_{\lg N_{oc}} = \frac{2.59 \cdot 0.0977}{6.32} = 0.04$$

В результаті обробки експериментальних даних за режимами навантаження станини отримано крива розподілу напруги у найбільш небезпечному перерізі станини (у місці переходу стійки в поперечину і виходу натискного гвинта), наведена на рис. 6.2.

По положенню максимуму кривої $\omega(\sigma)$ встановлюємо значення «неправдивого нуля» $d_0 = 46$ МПа і $\Delta\sigma = \frac{62.2 - 39.0}{5} = 4.64 \text{ МПа}$.

Потім обчислюємо відносні середини інтервалів $y_i = \frac{\sigma_i - d_0}{\Delta\sigma}$, частоту влучення напруг у зазначені інтервали $n_i / \Sigma n_i$ та відносні початкові моменти $h_i = \Sigma y_i^i / \Sigma n_i$ (табл. 6.2).

Потім визначаємо:

- Середнє арифметичне значення напруг:

$$d = \Delta\sigma h_1 + d_0 = 49.2 \text{ МПа};$$

- Центральні моменти:

$$m_2 = \Delta\sigma^2 (h_2 - h_1^2) = 27.9;$$

$$m_3 = \Delta\sigma^3 (h_3 - 3h_2h_1 + 2h_1^3) = 73.1;$$

$$m_4 = \Delta\sigma^4 (h_4 - 4h_3h_1 + 6h_2h_1^2 - 3h_1^4) = 1792.9;$$

- Середньоквадратичне відхилення:

$$S_\sigma = \sqrt{m_2} = 5.28 \text{ МПа};$$

- Асиметрію:

$$S_K = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = 0.5;$$

- Ексцес:

$$E_K = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = -0.7.$$

Перевіряємо одержаний розподіл на нормальність. Гіпотеза про нормальний характер розподілу випадкової величини приймається, якщо:

$$|S_K| < 1.5 \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}};$$

$$\left| E_k + \frac{6}{n+1} \right| < 1.5 \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}$$

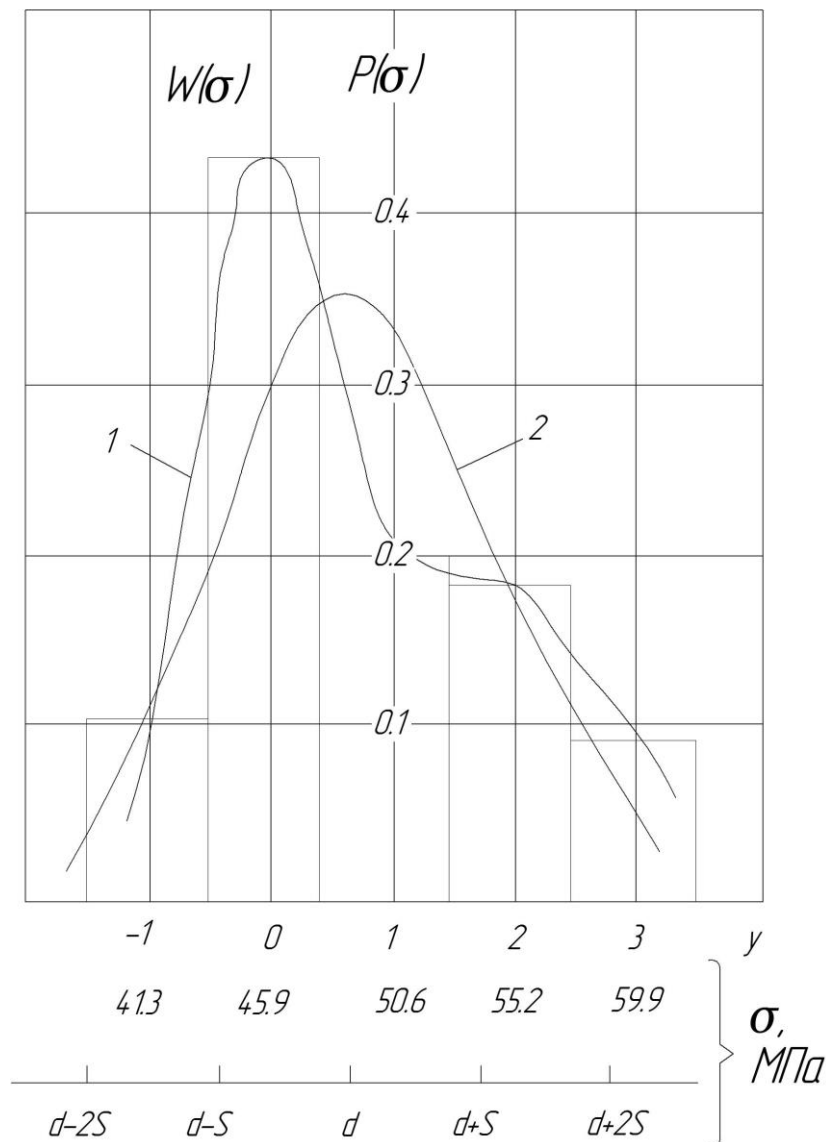


Рис. 6.2 - Криві розподілу та гістограма напруг у станині стану ХПТ-55: 1 – фактична; 2 – нормальна.

У даному випадку при числі напружень $n = 20 |S_k| < 0.71$, а $\left| E + \frac{6}{n+1} \right| < 1.14$, тобто отриманий розподіл напружень не суперечить нормальному закону.

В даному випадку гіпотеза про нормальність розподілу напруги справедлива.

Так як напруги в станині змінюються за пульсуючим циклом, то величини амплітуд σ_{ai} та середніх σ_{mi} напружень будуть рівні. Межа витривалості станини для пульсуючого циклу.

$$\sigma_{oc} = 1.5 \cdot \bar{\sigma}_{-1c} = 1.5 \cdot 39.6 = 59.4 \text{ МПа.}$$

Рівень напружень (нижче межі витривалості), починаючи з якого напруги підлягають включенню до розрахунку, становитиме для ймовірності $P = 50\%$; $\sigma_y = 0.83 \cdot 59.4 = 49.3 \text{ МПа}$.

Відносне число циклів для напружень, що враховуються, складе $\Sigma c_i = 0.256$.

Загальна кількість циклів навантажень станини за рік $n'_i = 9 \cdot 10^6$. Тоді річне число циклів напружень, що враховуються, складе $n_i = 9 \cdot 10^6 \cdot 0.256 = 2.31 \cdot 10^6$.

Використовуючи вирази (4.1) і (4.2) ÷ (4.5) визначаємо найбільш ймовірну ($P = 50\%$) наведену напругу $\sigma_{np} = 35.5$ МПа та термін служби станини:

$$\bar{T}_c = \frac{2.08 \cdot 10^6 \cdot 10^{\frac{39.6-35.5}{70.2}}}{2.31 \cdot 10^6} = 1.03 \text{ роки} \cong 12.4 \text{ міс.}$$

При цьому $\lg T_c = 1.0934$.

На підставі виразів (4.7) та (4.1) у припущенні логарифмічно - нормального закону розподілу терміну служби станини визначимо середньоквадратичне відхилення логарифму її терміну служби при $S_{\sigma_{np}}^2$ і $S_{\lg nt}^2$, рівних нулю, та розподіл терміну служби

$$S_{\lg T_c} = \sqrt{0.04^{2+} \frac{1}{70.2^2} (2.59^2 + \frac{39.6^2 + 35.5^2}{70.2^2} \cdot 4.09^2)} = 0.07$$

Графічна інтерпретація результатів розрахунку станини стану ХПТ-55 на обмежену довговічність за виразом (4.1) представлена на рис. 6.3.

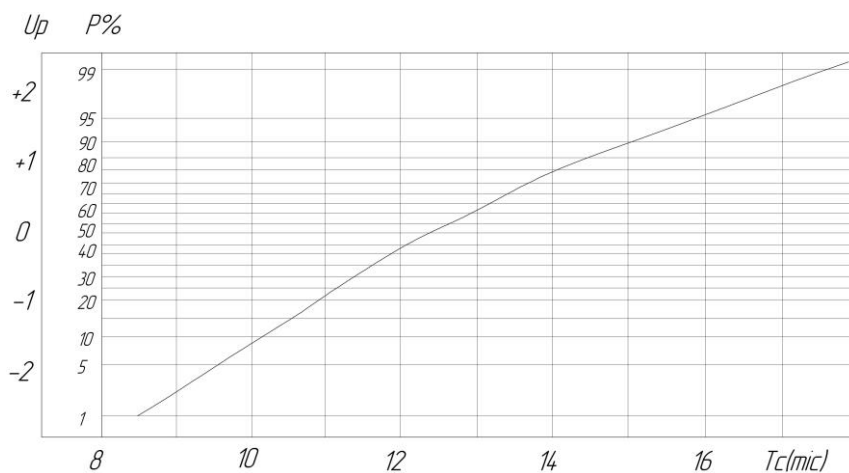


Рис. 6.3 – Функція розподілу довговічності станини стану ХПТ-55

Отриманий розрахунковий термін служби станини досить добре відповідає тому, що спостерігається в експлуатації.

Запропоновано наступний алгоритм розв'язання поставленого завдання:

1. Вихідними даними для вирішення поставленої задачі є: σ_{-1} ; \bar{K}_g ; \bar{N}_{0d} - Середні значення межі витривалості, кутового коефіцієнта і абсциси точки перелому кривої втоми деталі; $V_{\sigma_{-1d}}$ - Коефіцієнт варіації межі витривалості деталі; $S_{\sigma_{-1}}$; S_K ; $S_{\lg N_0}$ - Середньоквадратичні відхилення параметрів кривої втоми зразків; n_t - річне число циклів навантаження деталі, що враховуються; I - інтервал, що визначає площу під кривою напруги в деталі.

2. Визначаємо середньоквадратичне відхилення межі витривалості деталі:

$$S_{\sigma_{-1d}} = \sigma_{-1d} \cdot V_{\sigma_{-1d}}$$

3. Визначаємо середньоквадратичне відхилення логарифму абсциси точки перелому кривої втоми деталі:

$$S_{\lg N_{0d}} = \frac{S_{\sigma_{-1d}} \cdot S_{\lg N_0}}{S_{\sigma_{-1}}}$$

4. Розраховуємо середньоквадратичне відхилення кутового коефіцієнта кривої втоми деталі:

$$S_{K_g} = \frac{S_{\sigma_{-1\partial}} \cdot S_K}{S_{\sigma_{-1}}}$$

5. Визначаємо середньоквадратичне відхилення логарифму терміну служби деталі:

$$S_{\lg T_\partial} = \sqrt{S_{\lg N_{\partial\partial}}^2 + \frac{1}{K_\partial^2} \left[S_{\lg N_{\partial\partial}}^2 + \left(\frac{\sigma_{-1\partial}}{K_\partial} S_{K_\partial} \right)^2 \right]}$$

6. Розраховуємо середній термін служби деталі:

$$\bar{T}_\partial = \frac{\bar{N}_{\partial\partial} 10^{\frac{\sigma_{-1\partial}}{K_\partial}}}{n_i I}$$

7. Здійснюємо переводження \bar{T}_∂ в $\lg T_\partial$

8. Розраховуємо ймовірні значення терміну служби деталі:

$$(\lg \bar{T}_\partial)_p = \lg \bar{T}_\partial + U_p S_{\lg T_\partial}$$

9. Величини ймовірності руйнування P , виражені у вигляді квантилю U_p , задаються нами згідно з таблицею 6.2.

Таблиця 6.2 – Частота і моменти розподілу напруг в станині стану ХПТ-55

Інтервал	Середина інтервалу σ_i , МПа	Відносна середина інтервалу y_i	y_i^2	y_i^3	y_i^4	Частота n_i	$n_i y_i$	$n_i y_i^2$	$n_i y_i^3$	$n_i y_i^4$	Частота $\frac{n_i}{\sum n_i}$
1	41.3	-1	1	-1	1	21	-21	21	-21	21	0.11
2	45.9	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0.43
3	50.6	1	1	1	1	40	40	40	40	40	0.20
4	55.2	2	4	8	16	36	72	144	288	576	0.18
5	59.2	3	9	27	81	17	51	153	459	1377	0.09
Суми						199	142	358	766	2014	
Позначення сум						$\sum n_i$	\sum_1	\sum_2	\sum_3	\sum_4	
Початкові моменти у відносному виразі							0.71	1.80	3.85	10.12	
Позначення відносних початкових моментів							h1	h2	h3	h4	

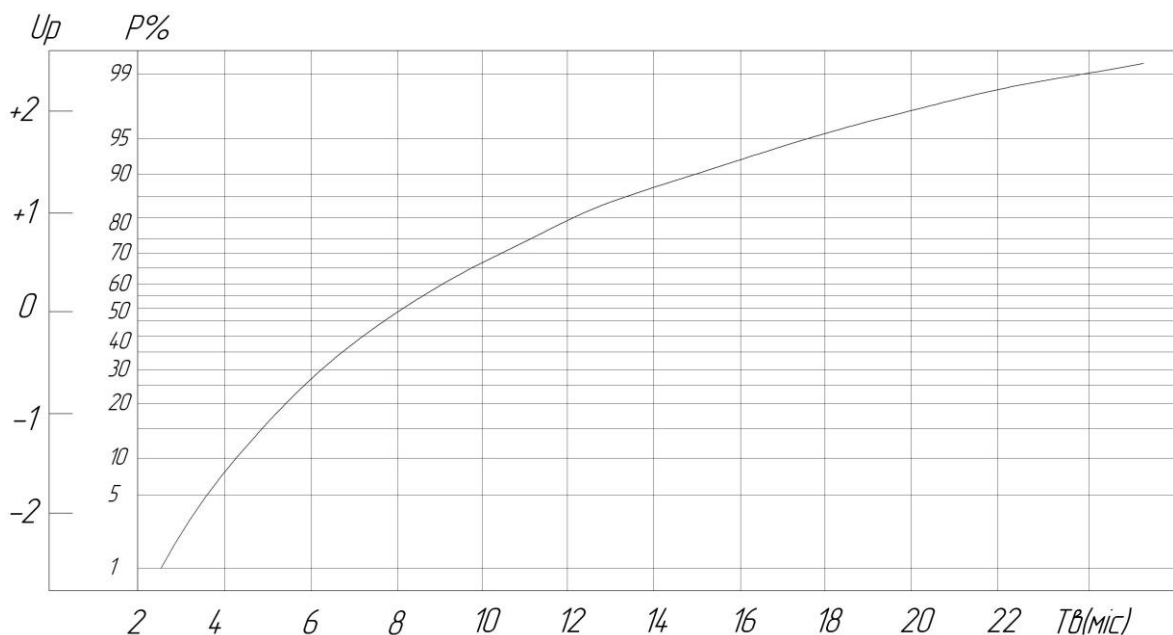


Рис. 6.4 – Функція розподілу довговічності валка стану ХПТ-55

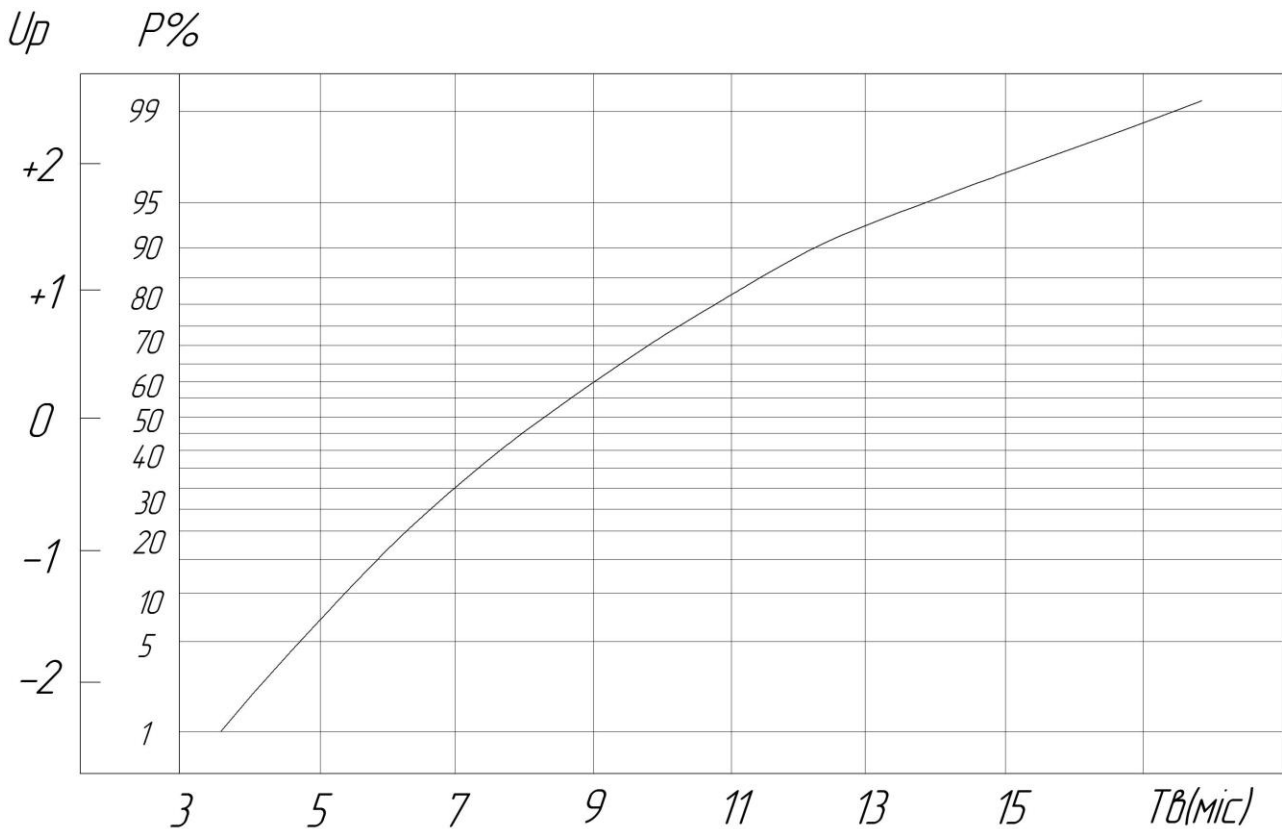


Рис. 6.5 – Функція розподілу терміну служби робочого валка стану ХПТ-55

Таблиця 6.3 - Значення терміну служби валка стану ХПТ для різних ймовірностей руйнування

Ймовірність руйнування $P, \%$	Квантиль U_p	Срок Служби $(T_d)_p$ міс.	Ймовірність руйнування $P, \%$	Квантиль U_p	Срок Служби $(T_d)_p$ міс.	Ймовірність руйнування $P, \%$	Квантиль U_p	Срок Служби $(T_d)_p$ міс.
1	-2.33	3.6	35	-0.39	7.1	70	0.52	9.6
5	-1.46	4.6	40	-0.25	7.4	75	0.67	10.1
10	-1.28	5.2	45	-0.13	7.7	80	0.84	10.7
15	-1.04	5.7	50	0	8.1	85	1.04	11.5
20	-0.84	6.1	55	0.13	8.4	90	1.28	12.5
25	-0.67	6.4	60	0.25	8.8	95	1.64	14.1
30	-0.52	6.8	65	0.39	9.2	99	2.33	17.5

Термін служби робочого валка стану ХПТ-55 коливається в межах від 2 до 22 місяців при середньому терміні служби близько 8 міс.

Порівняння функцій розподілу термінів служби валка, отриманих двома різними способами, показує, що у другому випадку спостерігається дещо гірша відповідність розрахункових та реальних термінів служби. Це пояснюється, мабуть, тим, що насправді закон розподілу терміну служби відрізняється від логарифмічного прийнятого нормального.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гребеник В. М., Цапко В. К. Надійність металургійного обладнання : довідник. Москва : Металургія, 1989. 592 с.
2. Smith D. J. Reliability, Maintainability and Risk. Oxford : Butterworth-Heinemann Linacre House, 2001. 335 p.
3. Dhillon B. S. Mining equipment reliability, maintainability and safety (Springer series in reliability engineering). London : Springer, 2008. 219 p.
4. Woo S. Reliability Design of Mechanical Systems. Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. 464 p.
5. Bolotin V. V. Life prediction of machines and structures. Moscow : Machine building, 1984. 312 с.
6. Fatigue Resistance Models of Structural for Risk Based Inspection / S. Belodedenko, V. Hanush, A. Baglay, O. Hrechanyi. *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6, No. 2. P. 375–383. URL: <http://doi.org/10.28991/cej-2020-03091477> (дата звернення: 09.07.2024).
7. Belodedenko S., Hanush V., Hrechanyi O. Fatigue lifetime model under a complex loading with application of the amalgamating safety indices rule. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 182–189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.022> (дата звернення: 15.07.2024).
8. Витривалість при складному напруженому стані в аспекті подовження ресурсу технологічного устаткування промислових виробництв / С. В. Білодіденко та ін. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 4. С. 56–68. URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/807c4552-f60e-4231-99d6-c82e44df4fe1/content> (дата звернення: 18.07.2024).
9. Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Долінська І. Я. Основи механіки руйнування для зварювальників : навч. посіб. / Луц. нац. техн. ун-т. Луцьк : ЛНТУ, 2014. 353 с.

Навчально-методичне видання

Толстіков Георгій Іванович,
Поворотній Віктор Володимирович,
Білодіденко Сергій Валентинович,
Гануш Василь Іванович

**НАДІЙНІСТЬ, РЕМОНТ ТА МОНТАЖ МАШИН ТА
УСТАТКУВАННЯ**

**ЙМОВІРНІСНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ ДЕТАЛЕЙ
МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОБМЕЖЕНУ
ДОВГОВІЧНІСТЬ**

Навчально-методичні рекомендації
до практичних занять

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка В. В. Поворотній

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Віктор Єрмократьєв

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 762 від 23.10.2024)

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 1,88.
Зам. № 123.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010