

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Сумський державний університет



В. М. Нагорний

**Механіка руйнувань та прогнозування
надійності машин**

Конспект лекцій

Суми
Сумський державний університет
2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Сумський державний університет



Механіка руйнувань та прогнозування надійності машин

Конспект лекцій
для студентів напряму
підготовки 6.040202 «Механіка»
денної форми навчання

Затверджено на засіданні
кафедри ЗМ і ДМ як
конспект лекцій з
дисципліни «Механіка
руйнувань та прогнозування
надійності машин».
Протокол № 8 від 10.05.12р.

Суми
Сумський державний університет
2012

Механіка руйнувань та прогнозування надійності машин:
конспект лекцій / укладач В. М. Нагорний. – Суми : Сумський
державний університет, 2012. – 87 с.

Кафедра загальної механіки і динаміки машин

Зміст

С.

ВСТУП	7
ЛЕКЦІЯ 1	8
ТЕМА 1. Поняття відмови машин	8
1.1. Відмови типових елементів машин.....	9
1.2. Причини втрати машиною працездатності	11
1.2.1. Джерела і причини зміни початкових параметрів машини.....	11
ЛЕКЦІЯ 2	12
ТЕМА 2. Процеси, що знижують працездатність машини	12
2.1. Класифікація процесів, що діють на машину, за швидкістю їх перебігу.....	13
2.2. Допустимі і недопустимі види пошкоджень деталей та сполучень	14
2.3. Поступові (зношення) і раптові відмови	14
ТЕМА 3. Відмови функціонування і параметричні відмови	15
3.1. Допустимі і недопустимі відмови	16
3.2. Допустима ймовірність безвідмовної роботи_ як міра для оцінки наслідків відмови	16
ТЕМА 4 Оцінка граничного стану машини	17
4.1. Граничний стан за ступенем пошкодження_ і за вихідним параметром.....	17
4.2. Критерії оцінки граничного стану за вихідним параметром.....	19
4.3. Регламентація граничних станів_у нормативно-технічній документації.....	19
ЛЕКЦІЯ 3	20
ТЕМА 5. Фізична природа відмови машин	20
5.1. Закономірності зміни властивостей і стану конструкційних матеріалів за час експлуатації машини	20
5.1.1. Субмікроскопічний рівень	20

а) Ідеальна міцність.....	23
б) Типові дефекти кристалів	25
ЛЕКЦІЯ 4	26
ТЕМА 6. Мікроскопічний рівень	26
6.1. Напруження	26
6.2. Деформація	27
6.3. Головне напруження і деформації.....	28
6.4. Співвідношення між напруженням і деформацією у пружних тілах	29
6.5. Пружна і пластична деформації	30
ЛЕКЦІЯ 5	30
ТЕМА 7. Мікроскопічний рівень	30
7.1. Геометрія пластичних зрушень	30
7.2. Ковзання.....	31
7.3. В'язке руйнування	34
7.4. Крихке руйнування	34
ЛЕКЦІЯ 6	35
ТЕМА 8. Макроскопічний рівень	35
8.1. Закон Гука.....	35
8.2. Закони стану і старіння.....	38
8.2.1. Закони стану	38
8.2.2. Закони старіння	39
ЛЕКЦІЯ 7	40
ТЕМА 9. Відмови за параметрами міцності	40
9.1. Кінетика розвитку втомних тріщин	41
9.1.1. Кінетика тріщин за Гріффітсом.....	41
9.2. Ідеалізовані схеми навантаження та їх опис	43
ЛЕКЦІЯ 8	45
ТЕМА 9. Відмови за параметрами міцності (продовження)	45
9.3. Швидкість розвитку тріщини	45
9.4. Кінетика тріщин за Шенлі.....	48

ЛЕКЦІЯ 9	50
ТЕМА 10. Втомні руйнування.....	50
10.1. Узагальнена крива (діаграма) втоми.....	50
10.2. Стадії розвитку тріщин.....	53
ЛЕКЦІЯ 10	55
ТЕМА 10. Втомні руйнування (продовження).....	55
10.3. Вид зламів під час руйнування деталей	55
ЛЕКЦІЯ 11	59
ТЕМА 11. Експериментальне визначення характеристик втомної	
міцності.....	59
11.1. Характеристика змінного навантаження	59
11.2. Характеристики граничних станів, виду навантаження і	
форми циклу	61
11.3. Форма циклу і коефіцієнт його асиметрії.....	62
ЛЕКЦІЯ 12	62
ТЕМА 11. Експериментальне визначення характеристик втомної	
міцності (продовження).....	62
11.4. Види кривих втоми	62
11.5. Малоциклова втома.....	65
11.6. Процес механічного руйнування твердих тіл за	
Журковим С.М.....	66
ЛЕКЦІЯ 13	68
ТЕМА 12. Часова залежність міцності	68
12.1. Повзучість	68
12.1.1. Первинна крива повзучості та її отримання	69
12.1.2. Силова деформація і стадії повзучості	69
12.2. Аналітичні вирази для кривих повзучості.....	71
12.3. Гіпотези повзучості.....	71
12.3.1. Гіпотеза старіння.....	72
12.3.2. Гіпотеза течії.....	72
12.3.3. Гіпотеза зміцнення.....	72

ЛЕКЦІЯ 14	73
ТЕМА 12. Часова залежність міцності (продовження)	73
12.4. Віброповзучість та віброрелаксація.....	73
12.5. Непружні явища при коливаннях	74
ЛЕКЦІЯ 15	76
ТЕМА 13. Прогнозування надійності	76
13.1. Основні поняття теорії надійності	76
13.2. Загальні залежності.....	78
13.3. Надійність у період нормальної експлуатації	82
13.4. Надійність у період поступових відмов.....	83
Список літератури	86

ВСТУП

Промисловість зазнає величезних утрат унаслідок недостатньої працездатності машин, що випускаються.

Особливо з великими витратами часу пов'язане порушення працездатності унікальних машин, таких, як потужні турбіни, доменні печі, важкі крани, хімічні й атомні реактори та ін.

Для мінімізації цих утрат все більша увага приділяється одній із найважливіших властивостей машини, а саме збереженню працездатності відповідно до заданих технічних умов експлуатації впродовж заданого проміжку часу. Ця властивість машини в інженерній галузі знань називається надійністю машини.

Надійність закладається під час проектування, забезпечується під час виробництва і реалізується під час експлуатації. Найважливішими показниками надійності є безвідмовність і довговічність. Забезпечення необхідного рівня цих показників неможливе без вивчення основ фізики відмов (утомної міцності, повзучості тощо).

Фізика відмов вивчає необоротні процеси, що призводять під час експлуатації машин до втрати конструкційним матеріалом своїх початкових властивостей.

Ці процеси, підлягаючи певним фізичним закономірностям, вступають у різноманітні взаємодії, мають складний зв'язок зі зміною вихідних параметрів машини. Розкриття цих зв'язків можливе на основі результатів досліджень природничих наук, що вивчають фізико-хімічні процеси руйнування, старіння і зміни властивостей конструкційних матеріалів (металів і пластмас), із яких виготовлені машини.

При цьому основною особливістю цих досліджень є розгляд усіх явищ у часі. Часові закономірності фізики відмов є базою для вирішення завдань щодо забезпечення заданої безвідмовності й довговічності машин.

При розгляді таких інженерно-технічних проблем коло проблем, що вирішуються фізикою відмови, конкретизується і деталізується, і цим займається розділ фізики відмови – механіка руйнування. Механіка руйнування починає розглядати питання руйнування на рівні розмірів атомів і дислокацій аж до розмірів домішок і зерен. Розуміння цих процесів дає можливість отримати критерії, що визначають закономірності руйнування машин, і на

основі цього дозволяє цілеспрямовано проводити діагностування технічного стану машин і прогнозування їх ресурсу.

ЛЕКЦІЯ 1

ТЕМА 1. Поняття відмови машин

Зміни в механічних системах під час їх роботи, що призводять врешті-решт до втрати працездатності, – це процеси, що проходять у часі.

Основні причини втрати працездатності машин, що знаходяться в експлуатації, такі:

- поломки деталей унаслідок утомних явищ, що виникають під дією навантаження;
- зміни розмірів деталей у рухомих з'єднаннях унаслідок зносу;
- заклинювання рухомих з'єднань, що сполучаються;
- поломки деталей під впливом пікових навантажень;
- відмова окремих деталей і механізмів через поломки внаслідок сумарного впливу зовнішніх умов, зносу і втоми.

Відмови механічних систем в основному відбуваються під час експлуатації, головним чином тому, що певна група дефектів не виявляється в процесі передексплуатаційних випробувань і випробувань машини.

Відмови класифікують за причинами їх виникнення, до яких відносять:

- конструктивні помилки і недоробки, що знижують надійність машини (недостатня міцність елементів конструкції, невдале конструювання вузлів, незахищеність найбільш відповідальних частин машини від дії вологи, радіації, температури, абразивів та ін.);
- виробничі недоліки (приховані дефекти, некондиційні матеріали, недосконалість технології обробки і збирання і т. д.);
- неправильні експлуатація і технічне обслуговування, що може бути викликане недостатньою підготовкою обслуговуючого персоналу, порушенням експлуатаційних інструкцій, низькою технічною культурою, поганим станом допоміжних механізмів, особливо важкими умовами праці, поганим контролем за

станом механізмів тощо;
- неякісний ремонт або пошкодження справних агрегатів під час ремонту;
- природне зношення, втрати втомної міцності, природне старіння.

1.1. Відмови типових елементів машин

Опори ковзання втрачають необхідні експлуатаційні властивості внаслідок абразивного зносу або заїдань.

Підшипники кочення зазвичай втрачають працездатність від утомного викрашування, а також (при недостатньому захисті) від абразивного зносу.

Вали виходять з ладу внаслідок зносу посадочних місць, від утомного руйнування або деформації, викликані аварійними перевантаженнями.

Зубчасті передачі, що працюють в умовах хорошого мастила, втрачають працездатність від утомних зламів і викрашування. При високих швидкостях і питомому тиску, коли знижується захисна здатність масляної плівки, спостерігається заїдання.

Перемикальні зубчасті передачі та зубчасті муфти виходять з ладу через пошкодження торців зубів. При недостатньому захисті зубчатих передач від забруднень і недостатній фільтрації масел найбільш небезпечний абразивний знос.

Фрикційні муфти (конічні, дискові) втрачають працездатність унаслідок появи задирків на поверхнях контакту металевих деталей. У муфтах із наклепанним (наклеєним) фрикційним матеріалом часті випадки зриву останнього з металевої основи. Загальним дефектом для усіх фрикційних муфт є так зване «засалювання» фрикційної поверхні: забруднення і замаслення дотичних поверхонь, що додають їм антифрикційних властивостей.

Еластичні пружинні муфти (зі спіральними або пластинчастими пружинами) виходять з ладу внаслідок поломок пружин через втрату втомної міцності (у нормальних умовах роботи) або поломок при нерозрахованих перевантаженнях.

Еластичні муфти, що мають серед конструктивних елементів гуму, втрачають працездатність унаслідок втрати деталями з гуми необхідних механічних якостей при її старінні. На міцність і пружність гумових деталей в основному впливають: старіння гуми,

дія масел, хімічно активного середовища, сонячного або радіоактивного опромінювання.

У ланцюгах типу Галля при ударних навантаженнях руйнуються втулки, при неточному встановленні зірочок виходять з ладу пластини.

Ремені руйнуються внаслідок природного і штучного старіння, переважно у місцях вулканізованого стику зшивання.

Троси розплітаються і руйнуються при багатократному намотуванні (перекочуванні) на барабани (ролики) малого діаметра при дії постійних або змінних навантажень.

Дефекти гідравлічних або пневматичних систем:

- течії через ніпельні з'єднання внаслідок низької якості виготовлення і збирання елементів;
- розриви трубопроводів при вібрації машини і пульсації внутрішнього тиску;
- течії внаслідок низької якості ущільнень у силових циліндрах і місткостях;
- заїдання і заклинювання в розподільних (золотникових) і клапанних пристроях унаслідок забруднення трубопроводів (дрібна металева стружка, абразив), зміни температурних умов, вібрації.

Відмови класифікують за характером виникнення, проявом, причиною виникнення (рис.1.1).

Відмови поділяються на незалежні та залежні. Якщо відмова якого-небудь елемента в системі не викликана відмовою інших елементів, то він є випадком незалежним. Відмова, що виникла в результаті відмови інших елементів, є випадком залежним.

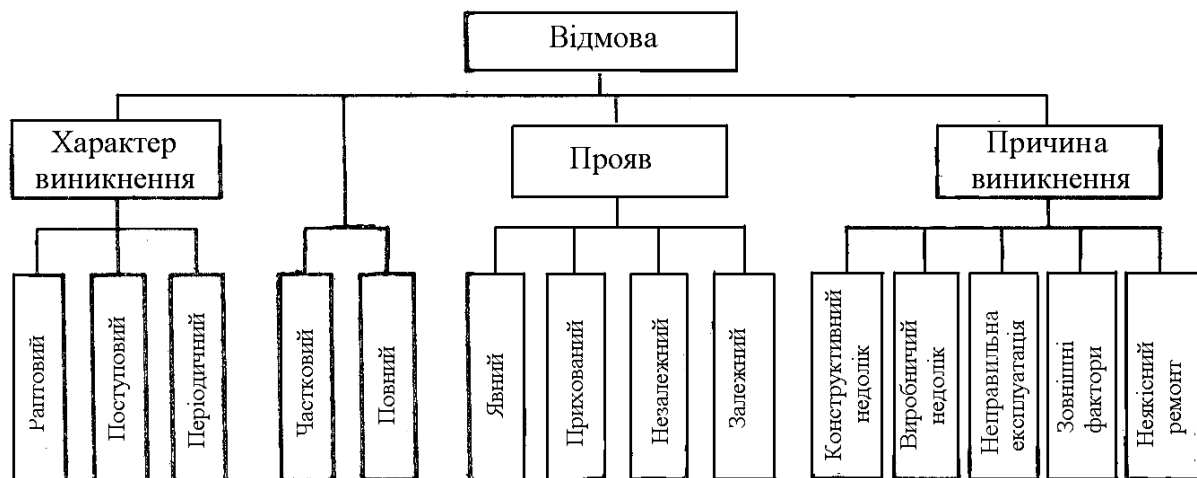


Рисунок 1.1 – Класифікація відмов

Якщо відмова одного елемента призвела до відмови іншого або цілої групи елементів, то ця група відмов розглядається як один незалежний випадок.

1.2. Причини втрати машиною працездатності

1.2.1. Джерела і причини зміни початкових параметрів машини

У процесі експлуатації на машину діють всі види енергії, що може привести до зміни параметрів окремих елементів, механізмів і машини в цілому.

При цьому є три основні джерела дій:

- дія енергії навколишнього середовища, включаючи людину, яка виконує функції оператора або ремонтника;
- внутрішні джерела енергії, пов'язані як із робочими процесами, що проходять у машині, так і з роботою окремих механізмів машини;
- потенціальна енергія, яка накопичується в матеріалах і деталях машини в процесі їх виготовлення (внутрішня напруга у відливанні, монтажна напруга).

Під час роботи машини спостерігаються такі основні види енергії, що впливають на її працездатність.

Механічна енергія, яка не тільки передається по усіх ланках машин у процесі роботи, але й впливає на неї у вигляді статичних або динамічних навантажень від взаємодії із зовнішнім середовищем.

Механічна енергія в машині може виникнути і як наслідок тих витрат енергії, які спостерігалися під час виготовлення частин машини і збереглися в них у потенціальній формі.

Теплова енергія діє на машину та її частини при коливаннях температури навколишнього середовища, під час здійснення робочого процесу (особливо сильні теплові дії спостерігаються під час роботи двигунів і ряду технологічних машин), під час роботи приводних механізмів, електротехнічних і гідравлічних пристроїв.

Хімічна енергія також чинить вплив на роботу машини. Навіть повітря, яке містить вологу та агресивні складові, може викликати корозію окремих вузлів машини.

Ядерна (атомна) енергія, що виділяється в процесі перетворення атомних ядер, може впливати на матеріали (особливо в

ядерних реакторах атомних станцій, в атомних корабельних силових установках і в космосі), змінюючи їхні властивості.

Електромагнітна енергія у вигляді радіохвиль (електромагнітних коливань) пронизує весь простір навколо машини і може вплинути на роботу електронної апаратури.

Біологічні чинники також можуть впливати на працездатність машини. Наприклад, у тропічних країнах є мікроорганізми, які не тільки руйнують деякі види пластмас, але навіть можуть впливати на метал.

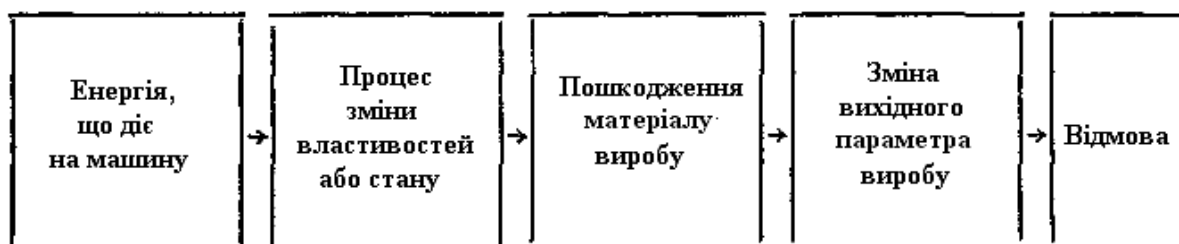
Таким чином, усі види енергії діють на машину і її механізми, викликають у ній цілий ряд небажаних процесів, створюють умови для погіршення її технічних характеристик.

ЛЕКЦІЯ 2

ТЕМА 2. Процеси, що знижують працездатність машини

Різні види енергії, діючи на машину, викликають в її вузлах і деталях процеси, що знижують її початкові параметри. Це, у свою чергу, спричиняє зміну вихідних параметрів машини, що може призвести до відмови.

Ці взаємозв'язки спрощено можна виразити такою схемою:



Необхідно підкреслити, що процеси, що призводять до зміни початкових властивостей машини, проходять у матеріалах, із яких вона виготовлена, включаючи не тільки деталі машини, але й мастило, паливо і все те, що бере участь в її робочому процесі.

Ось приклади таких взаємозв'язків. Механічна енергія, що діє в ланках металорізального верстата, призводить до виникнення процесу зносу його ланок. Це викликає спотворення початкової форми з'єднань (тобто їх пошкодження), що приводить до втрати верстатом точності, яка є основним вихідним параметром верстата. Досягнувши певної похибки обробки, виникає відмова.

Пошкодження конструкційного матеріалу машини – це відхилення його контрольованих властивостей від їх початкових значень. Зі схеми, наведеної вище, видно, що між дією енергії на машину і виникненням відмови є послідовний ланцюжок взаємозв'язків, розглянутий нижче.

Необхідно мати на увазі, що частина процесів, що відбуваються в машині і впливають на її технічні характеристики, є оборотними.

Оборотні процеси тимчасово змінюють параметри деталей, вузлів і всієї системи в деяких межах, без тенденції прогресивного погіршення. *Найбільш характерний приклад таких процесів – пружна деформація вузлів і деталей машин.*

Необоротні процеси призводять до прогресивного погіршення технічних характеристик машини з часом. *Найбільш характерними необоротними процесами в машинах є зношування, корозія, втома, перерозподіл внутрішнього напруження і викривлення деталей з часом.*

2.1. Класифікація процесів, що діють на машину, за швидкістю їх перебігу

Для оцінки надійності машини необхідно оцінити швидкість перебігу процесів, що знижують її працездатність.

Швидкоплинні процеси мають періодичність зміни, вимірювану зазвичай частками секунди. Ці процеси закінчуються в межах циклу роботи машини і знову виникають при наступному циклі. Сюди відносять вібрації вузлів, зміни сил тертя в рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень та інші процеси.

Процеси середньої швидкості пов'язані з періодом безперервної роботи машини. Їх тривалість вимірюється зазвичай у хвилинах або годинах. Вони приводять до монотонної зміни початкових параметрів машини. До цієї категорії відносять як **оборотні процеси** (зміна температури самої машини і навколишнього середовища, зміни вологості середовища), так і **необоротні** (знос вкладишів у підшипниках ковзання, який проходить у багато разів інтенсивніше, ніж зношування інших деталей і вузлів машини).

Повільні процеси проходять за час роботи машини між періодичними оглядами або ремонтами. *Вони тривають дні й місяці.* До таких процесів відносять знос основних механізмів машини, перерозподіл внутрішнього напруження в деталях, повзучість

металів, забруднення поверхонь тертя, корозію, сезонні зміни температури.

Звичайні методи боротьби з повільними процесами – ремонт і профілактичні заходи, які проводяться через певні проміжки часу.

2.2. Допустимі та недопустимі види пошкоджень деталей та з'єднань

Види пошкоджень деталей машини і відповідно відмови можна розбити на дві групи: **допустимі** (за характером, а не за величиною пошкодження), що виникають за *нормальних умов експлуатації*, і **недопустимі**, які мають *аварійний характер*.

До допустимих пошкоджень відносять викривлення (залишкові деформації) деталі, в деяких випадках поломку в результаті втому, деякі види зносу, втому поверхневих шарів.

Недопустимі поломки деталей відбуваються у результаті *недостатньої статичної, динамічної або втомної міцності*, теплові тріщини – в результаті нагрівання деталі, у ряді випадків – корозія.

Види пошкоджень визначають зміст ремонтів машини. Допустимі пошкодження деталей усуваються плановими ремонтами машини. Відмови деталей унаслідок неприпустимих пошкоджень усуваються у ході аварійних ремонтів.

2.3. Поступові (зношення) і раптові відмови

Існують такі основні види відмов (рис. 2.1).

Поступові (знос) відмови (рис. 2.1а) виникають у результаті перебігу того або іншого процесу старіння, що погіршує вихідні початкові параметри машини.

Раптові відмови (рис. 2.1б) виникають унаслідок поєднання несприятливих чинників і випадкових зовнішніх дій, що перевищують можливості машини до їх сприйняття.

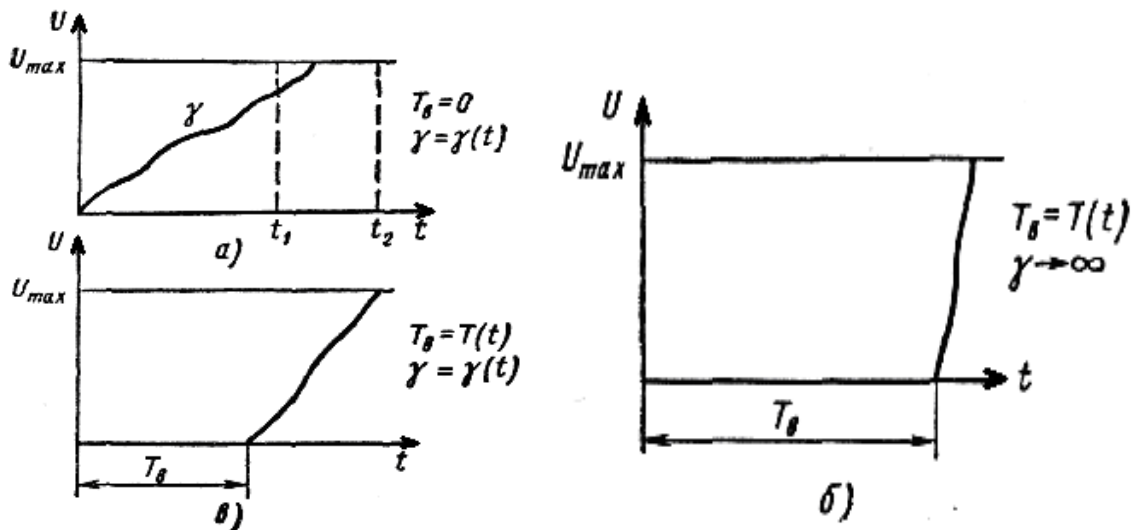


Рисунок 2.1 – Схема виникнення основних видів відмов:
а – поступовий (знос); **б** – раптовий; **в** – складний

Може бути і третій вид відмов, який включає особливості двох попередніх (див. рис. 2.1 *в*), який називатимемо **складною відмовою**.

Наприклад, зовнішні, недопустимі ударні дії на машину (рідкісна випадкова подія) можуть з'явитися джерелом виникнення втомної тріщини внаслідок концентрації напруження. Поступовий розвиток тріщини відбуватиметься у міру подальшої експлуатації машини.

ТЕМА 3. Відмови функціонування та параметричні відмови

Наслідки відмов досить різноманітні. Їх можна поділити на *параметричні відмови* і *відмови функціонування*.

Відмова функціонування призводить до того, що машина не може виконувати своїх функцій. Наприклад, у результаті відмови редуктор не обертається і не передає руху.

Параметрична відмова призводить до виходу параметрів (характеристик) машини за допустимі межі. Такі відмови, як порушення точності обробки на верстаті, падіння ККД передачі не обмежують можливості подальшого функціонування машини, проте вона стає непрацездатною з погляду вимог, установлених технічними нормативами.

Для сучасних машин найбільш характерні параметричні відмови. Це пов'язано з високими вимогами до вихідних параметрів сучасних машин. Тому параметричні відмови є одним із основних об'єктів розгляду в теорії надійності машин.

Відмови функціонування і параметричні відмови можуть бути як поступовими, так і раптовими.

3.1. Допустимі та недопустимі відмови

Відповідно до розподілу пошкоджень на допустимі та недопустимі аналогічне поняття можна застосовувати і до відмов.

Допустимі відмови пов'язані з процесами старіння, які призводять до поступового погіршення вихідних параметрів машини. Наприклад, навіть у літакових конструкціях допускається розвиток утомних тріщин у деяких елементах і панелях крил.

Недопустимі відмови пов'язані з порушенням таких умов виробництва та експлуатації:

- *порушення технічних умов під час виготовлення і збирання виробів;*
- *порушення правил і умов експлуатації та ремонту;*
- *перевищення режимів роботи машини вище за допустимі;*
- *порушення правил ремонту;*
- *помилки людей, які керують машиною і т. п.;*
- *приховані причини;*
- *не враховані в технічних умовах і нормативах параметри.*

3.2. Допустима ймовірність безвідмовної роботи як міра для оцінки наслідків відмови

Надійність як машини в цілому, так і окремих її вузлів і деталей повинна характеризуватися допустимою ймовірністю безвідмовної роботи $P(t)$. Для різних машин застосовуються категорії відмов, що відображають їх специфіку і оцінюють небезпеку відмови. Приклад подібної класифікації відмов наведений у табл. 1.1 [1], згідно з якою відмови розбиті на п'ять категорій.

Для кожної категорії встановлюється своє значення допустимої ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ або ж імовірність відмови $Q(t)$. Ці величини пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$P(t)+Q(t)=1. \quad (3.1)$$

Орієнтувальні значення параметра $Q(t)$ наведені в табл. 1.2 [1].

Для виявлення найбільш небезпечних категорій відмов у ряді випадків застосовуються спеціальні методи аналізу та обліку відмов, що виникають. Особливо важливо оцінювати параметричні відмови, оскільки тут можливий широкий діапазон наслідків – від значного впливу відмови на працездатність машини до катастрофічних наслідків.

Для виявлення параметричних відмов, що знижують працездатність складної машини, наприклад ракети, застосовують автоматичні методи контролю працездатності, коли аналіз стану системи ведеться на основі алгоритму, що оцінює характер сигналу про відмову, і вибирають лише ті категорії відмов, які пов'язані з основними параметрами машини.

Ретельний аналіз і виявлення усіх основних видів відмов – передумова для успішного вирішення завдань, пов'язаних із підвищенням надійності машини. При цьому необхідно знати межі працездатності машини, тобто знати граничні значення параметрів, які машина перевищити не може.

ТЕМА 4. Оцінка граничного стану машини

4.1. Граничний стан за ступенем пошкодження і за вихідним параметром

Граничний стан характеризує вихід машини за межі працездатності. Це стосується як машини в цілому, так і її вузлів, деталей та елементів.

У усіх розглянутих вище моделях відмов вважалося, що граничне допустиме значення параметра X_{max} відоме. Проте встановлення нормативів і розрахунок X_{max} є складним завданням, що вимагає спеціального методичного підходу. Основна складність при цьому полягає в тому, що, як правило, конструктором призначаються допустимі межі зміни вихідних параметрів тільки для машини в цілому (потужність, точність, продуктивність та ін.) або її агрегатів, що становлять самостійні конструкторські вузли.

Проте для забезпечення необхідних нормативно-технічних показників необхідно встановити гранично допустимі значення усіх

тих параметрів елементів і деталей, від яких залежить працездатність машини в цілому.

Необхідно мати на увазі, що гранично допустимий стан може бути встановлений як для ступеня пошкодження машини (U_{\max}), так і для вихідного параметра (X_{\max}). Хоча X і U зв'язані функціональною залежністю, оцінка граничного значення для кожного з цих показників має свій сенс.

Установлення X_{\max} є основним, оскільки саме зміну вихідного параметра визначає область працездатності виробу. Вихідний параметр виробу легко контролювати, і перевірка умови працездатності $X < X_{\max}$ не викликає зазвичай принципових труднощів під час експлуатації виробу. Оскільки зміна вихідних параметрів виробу є наслідком пошкоджень окремих елементів, для відновлення працездатності виробу потрібно вирішувати питання, чи допустимий ступінь пошкодження окремих елементів і які з них вимагають ремонту або заміни. Тому разом із призначенням X_{\max} необхідно встановити U_{\max} для пошкоджень, які беруть участь у формуванні вихідного параметра. При цьому можуть бути три основні випадки взаємозв'язку X_{\max} і U_{\max} :

- вихідний параметр визначає (в основному) один із видів пошкодження $X_{\max} = k \cdot U_{\max}$;

- вихідний параметр визначається сумарним пошкодженням елементів із урахуванням їх впливу через деяке передавальне

відношення k $X_{\max} = \sum_1^n k_i \cdot U_{i \max}$;

- вихідний параметр зв'язаний складною функціональною залежністю з граничними пошкодженнями елементів:

$$X_{\max} = \varphi(U_1; U_2; \dots; U_n).$$

Таким чином, граничні стани за ступенем пошкодження (U_{\max}) повинні призначатися виходячи з допустимих відхилень вихідного параметра X_{\max} і враховувати залежність між X і показниками ступеня пошкодження U елементів машини.

4.2. Критерії оцінки граничного стану за вихідним параметром

Основним критерієм граничного стану машини є те екстремальне значення параметра, яке допускається технічними умовами. Проте сам хід процесу зміни вихідних параметрів і наявність зон їх різкого зростання також є критеріями для встановлення максимально допустимих значень X_{\max} .

Можливі три основні групи критеріїв (табл. 1.3 [1]):

- у результаті зносу або інших пошкоджень відбувається *стрибкоподібна зміна стану* машини, і вона перестає функціонувати. Тут доцільніше регламентувати максимально допустимий ступінь пошкодження U_{\max} ;

- у результаті процесу пошкодження є зона інтенсивного зростання вихідних параметрів машини – зростання вібрацій, температури, шуму. Тут необхідно встановити значення X_{\max} , відповідне початку інтенсифікації процесу утрати працездатності;

- *основний випадок* призначення X_{\max} – коли процес пошкодження не має екстремальних зон і вихідні параметри визначаються встановленими на машину технічними умовами.

4.3. Регламентація граничних станів у нормативно-технічній документації

Ефективність роботи машини визначається її призначенням. Прогрес техніки пов'язаний із зростанням швидкостей, навантажень, температур, точності, продуктивності та інших експлуатаційних показників машин. Граничні значення цих параметрів зазначаються в ТУ.

Під час призначення технічних умов на граничні стани вихідних параметрів машини вибираються лише ті, зміна яких можлива в процесі експлуатації. Необхідно зазначити, що складність процесів функціонування і утрати машинами працездатності часто призводять до необґрунтованих призначень ТУ на граничні стани або до їх відсутності для ряду характеристик. Крім того, числові значення допусків на вихідні параметри часто встановлюються для нових машин і не обмовляються допустимі межі їх зміни.

Тому дуже актуальним є завдання щодо обґрунтування і встановлення запасів надійності за вихідними параметрами виробу.

При цьому для сучасних машин часто доцільно встановлювати нормативи не тільки на граничні стани за вихідними параметрами, але й за ступенем пошкодження окремих елементів машини, що визначають зміну її характеристик. Так лімітуються граничні стани за величиною тріщин, що виникають, за ступенем деформації, за зносом та іншими пошкодженнями.

Успішно вирішити це завдання можна тільки на основі знань законів механіки руйнування конструкційних матеріалів.

ЛЕКЦІЯ 3

ТЕМА 5. Фізична природа відмови машин

5.1. Закономірності зміни властивостей і стану конструкційних матеріалів за час експлуатації машини

Традиційно вивченням поведінки матеріалів під впливом навантаження займається наука про опір матеріалів і її складові частини – теорія пружності та теорія пластичності. Дискретність атомної будови реальних матеріалів разом із субмікроскопічними порушеннями цієї будови за рахунок мікроскопічних дефектів металургійного походження робить величезний вплив на реальну міцність твердих тіл.

Використання механічного або фізичного підходу до розкриття механізмів руйнування прийнято визначати галуззю застосування: перший – у макроскопічній, а другий – у мікро- і субмікроскопічній областях. Проте у наш час відмінність між ними стирається внаслідок поширення методів механіки на мікро- і субмікроскопічний рівні (наприклад, теорія дислокації).

Сучасна наука про міцність вивчає закономірності зміни властивостей і стану матеріалів на трьох рівнях, що розглядаються нижче.

5.1. Субмікроскопічний рівень

Загальноприйнято вважати, що метали, як і всі інші матеріали, складаються з атомів. Атомами є електричні системи діаметра порядку одного ангстрема – 1Å ($1\text{Å}=10^{-8}$ см). Окремий атом складається з ядра, в якому зосереджена його маса, та електронів, що

утворюють хмару навколо ядра і визначають хімічні властивості атома. Сукупність атомів утворює тверде тіло завдяки різним діючим міжатомним силам, які в загальному випадку залежать від температури і тиску. Міжатомні сили можуть бути або силами тяжіння, або силами відштовхування. Завдяки тому що міжатомні сили тяжіння і відштовхування зрівноважують одна одну при будь-яких заданих значеннях температури і тиску, атоми твердого тіла в просторі розміщуються впорядковано.

Потенціальна енергія двоатомної системи може бути подана у вигляді такої функції відстані між атомами:

$$V = -A/r^n + B/r^m, \quad (5.1)$$

де V — потенціальна енергія;

r — відстань між атомами;

A — коефіцієнт пропорційності для тяжіння;

B — коефіцієнт пропорційності для відштовхування;

n — показник ступеня тяжіння;

m — показник ступеня відштовхування.

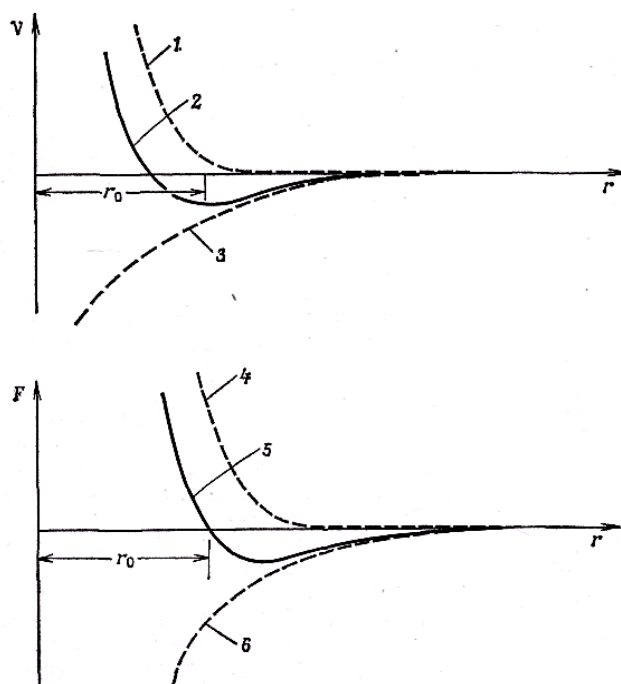


Рисунок 5.1 – Криві Кондона - Морсу, що ілюструють залежність потенціальної енергії V і сили міжатомної взаємодії F від відстані між атомами r у двоатомній системі : 1 – відштовхування $V = B/r^m$; 2 – рівнодійна $V = -A/r^n + B/r^m$; 3 – тяжіння $V = -A/r^n$; 4 – відштовхування $F = b/r^m$; 5 – рівнодійна $F = -a/r^n + b/r^m$; 6 – тяжіння $F = -a/r^n$; $m=8, n=2$

Використовуючи цей вираз для потенціальної енергії, можна отримати такий вираз для рівнодійної сили взаємодії атомів:

$$F = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{n \cdot A}{r^{n+1}} + \frac{m \cdot B}{r^{m+1}}. \quad (5.2)$$

Вводячи позначення $n \cdot A = a, m \cdot B = b, n + 1 = N, m + 1 = M$, вираз (5.2) можна переписати у вигляді

$$F = -a/r^N + b/r^M. \quad (5.3)$$

Вирази (5.1) і (5.3) мають однакову форму; графічно ці функції показані на рис. 5.1. Зображені криві відомі як криві Кондона - Морсу. Величина відстані r між атомами, яка відповідає мінімуму потенціальної енергії, є рівноважною відстанню r_0 для двох атомів. При розміщенні атомів на відстані r_0 один від одного сила взаємодії між ними дорівнює нулю, і будь-яка спроба переміщення атомів у якому-небудь напрямку з цього положення приведе до виникнення сил, що прагнуть повернути їх у колишній стан.

Різні впорядковані розміщення атомів називаються просторовими решітками. На перший погляд може здатися, що можливе утворення великої кількості різних просторових решіток. Існує 14 видів різних решіток. Вони показані на рис. 5.2.

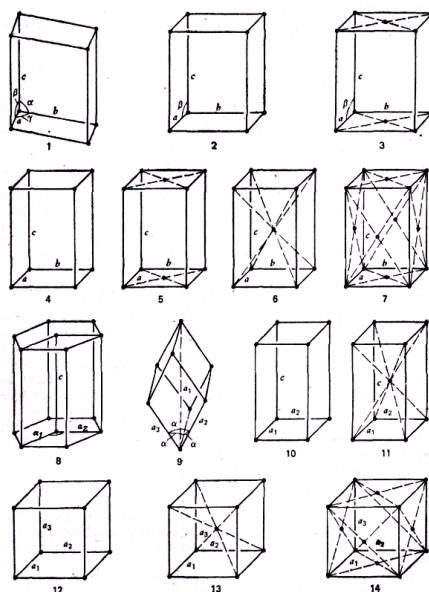


Рисунок 5.2 – Одиничні осередки 14 типів просторових решіток:

- (1) триклінна проста; (2) моноклінна проста; (3) моноклінна базоцентрована; (4) ромбічна проста; (5) ромбічна базоцентрована; (6) ромбічна об'ємно-центрована; (7) ромбічна гранецентрована;
- (8) гексагональна; (9) ромбоедрична; (10) тетрагон проста; (11) тетрагон об'ємно-центрована; (12) кубічна проста;
- (13) кубічна об'ємно-центрована; (14) кубічна гранецентрована

a) Ідеальна міцність

Міцність при розтягуванні ідеального кристалічного тіла – це напруження, необхідне для руйнування його по певній кристалографічній площині.

Для пари атомів $C-C'$ можна побудувати графік зміни енергії взаємодії від міжатомної відстані b . Для металів ці залежності з мінімумом у рівноважній точці решітки b_0 в основному мають вигляд, поданий на рис. 5.3а. Загальна кількість роботи, потрібна для розведення пари атомів на нескінченну відстань, дорівнює U_0 . Ця «робота руйнування» в кристалічному тілі часто прирівнюється до подвоєної величини поверхневого натягну γ одиничної вільної поверхні.

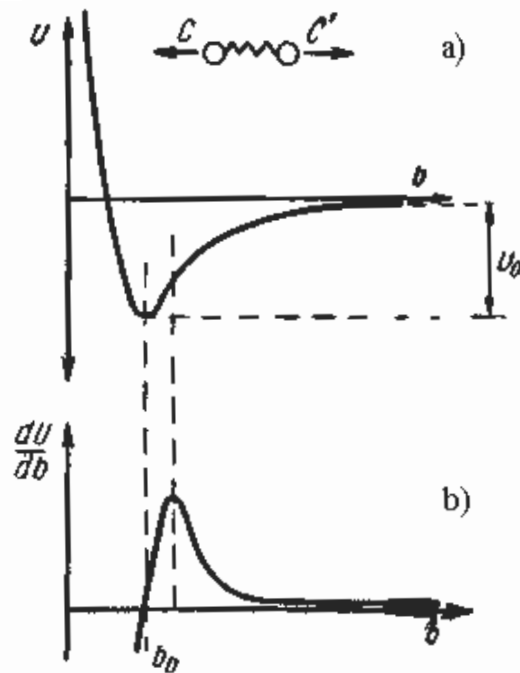


Рисунок 5.3 – Залежність енергії зв'язку U (а) і du/db (б) від відстані між атомами b

Сила, потрібна для розділення атомів, може бути визначена з енергетичної кривої шляхом диференціювання :

$$F = dU/db. \quad (5.4)$$

Результуюча залежність «сила – зсув» показана на рис. 5.3 б. У точці $b = b_0$ $F = 0$. У точці перегину кривої «енергія – відстань» вона досягає максимального значення.

Початковий нахил кривої «сила – зсув» характеризує жорсткість атомної «пружини» і безпосередньо пов'язаний з модулем

Юнга. Тому модуль залежить від форми енергетичної кривої, з якої можна вивести загальні співвідношення між модулем і типом атомного зв'язку.

Якщо прирівняти $b - b_0 = x$, то деформація може бути записана як x/b_0 . Прирівняємо $\sigma = F/b_0^2$. На рис. 5.4 зображена крива «напруження – деформація» між двома атомами, початковий нахил якої дорівнює модулю Юнга. Для визначення σ_{\max} криву зазвичай апроксимують синусоїдою, так що співвідношення між σ і x має вигляд

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin(2\pi x / \lambda), \quad (5.5)$$

де λ – довжина хвилі, тобто $\sigma = \sigma_{\max}$ при $x = \lambda/4$.

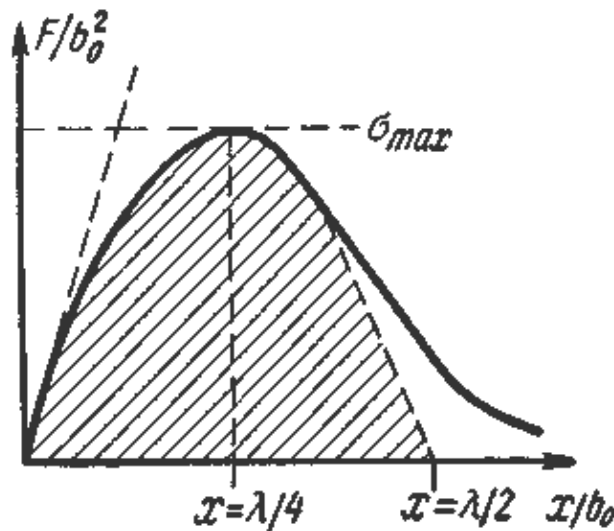


Рисунок 5.4 – Крива «напруження F/b_0^2 – деформація x/b_0 » між атомами. Площа заштрихованої області дорівнює 2γ

Загальна площа під кривою дорівнює роботі руйнування по атомній площині, тому цю роботу можна прирівняти $K + U_0 = +2\gamma$:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \sigma_{\max} \left[-\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right]_0^{\lambda/2} = 2\gamma. \quad (5.6)$$

Для дуже малих зсувів

$$\sigma = \sigma_{\max} 2\pi x / \lambda = E x / b_0 \quad (5.7)$$

і, підставивши значення λ рівняння (5.6), отримаємо

$$2\sigma_{\max}^2 b_0 / E = 2\gamma.$$

Тоді максимальне теоретично досяжне руйнівне напруження, виведене із залученням енергії взаємодії між парами атомів,

розділених площиною руйнування, у разі ідеального кристалічного тіла дорівнює

$$\sigma_{\max} = \sqrt{E\gamma/b_0}. \quad (5.8)$$

Результати досліджень свідчать про те, що теоретичне напруження руйнування має порядок $E/10$. Це значення виходить з рівняння (5.8) з урахуванням співвідношення $\lambda = 0.01Eb_0$, що правильне для великої кількості матеріалів.

У рівняння (5.8) не входить параметр, що характеризує деформацію до руйнування, оскільки передбачається, що атоми повинні бути розведені на нескінченно велику відстань перш ніж зникне взаємодія між ними. Практично можна вважати, що розрив зв'язків відбудеться при досягненні силою максимального значення. Приблизна оцінка цієї деформації може бути виконана в припущенні, що крива «напруження – деформація» (див. рис. 5.4) має трикутну, а не синусоїдальну форму, звідки $\sigma_{\max} = \sqrt{2E\gamma/b_0}$, і деформація при σ_{\max} дорівнює $x/b_0 = \sigma_{\max} / E = \sqrt{2\gamma / Eb_0}$.

Замінивши γ його значенням $\gamma \approx 0,001Eb_0$, як і вище, отримаємо $x/b_0 \approx 0,14$. На практиці деформація до руйнування лежить в інтервалі від 0,2 (жорсткі матеріали) до 0,4 (пластичні матеріали).

5.1.2. Типові дефекти кристалів

Найбільш типовими є такі види дефектів:

- точкові дефекти (вакансії, міжвузлові атоми та ін.);
- одновимірні (лінійні) дефекти (дислокації);
- двовимірні поверхневі дефекти (межі зерен і двійників, дефекти упаковки та ін.);
- тривимірні (об'ємні) дефекти (порожнини, включення та ін.).

До точкових дефектів відносять:

- вакансії - вузли кристалічної решітки, в яких відсутній атом або іон (незаповнені місця в решітках);
- спарені вакансії (дві або більше сполучених одиночних вакансій);
- міжвузлові атоми основного матеріалу і сторонні атоми,

що утворюють розчини заміщення або впровадження.

Для деталей машин найбільш поширеним типом точкового дефекту є вакансії, які роблять вирішальний вплив на процеси повзучості, знеуглецювання, графітизації та інших процесів, пов'язаних із перенесенням атомів у матеріалах.

ЛЕКЦІЯ 4

ТЕМА 6. Мікроскопічний рівень

На цьому рівні розгляд властивостей матеріалів виходить з аналізу процесів, що відбуваються в невеликій області. Отримані при цьому закономірності надалі поширюються на весь об'єм тіла.

Класичним прикладом у цьому відношенні може бути теорія напруження і деформацій в ідеальному однорідному тілі, коли в точці тіла виділяється нескінченно малий елемент у вигляді паралелепіпеда і розглядається його напружений стан.

6.1. Напруження

Напруження в деякій точці O визначається як позитивна сила, що прикладена до тіла і діє на нескінченно малий переріз, що містить точку O (рис. 6.1). Оскільки орієнтація площини перерізу може бути описана одиничним нормальним вектором, а сила також є векторною величиною, напруження зручно описувати у вигляді компонент цих векторів, паралельних відповідним осям координат. У тривимірному просторі кожен вектор має три компоненти, тому напруження визначається дев'ятьма параметрами.

У звичайній Декартовій прямокутній системі координат напруження визначене компонентами сили, що діють перпендикулярно до граней нескінченно малого куба, що знаходиться в точці O , з гранями, нормальними відповідно трьом осям X_1 , X_2 і X_3 . Результуючі компоненти напруження, кожне з яких має два індекси, показані на рис. 6.1.

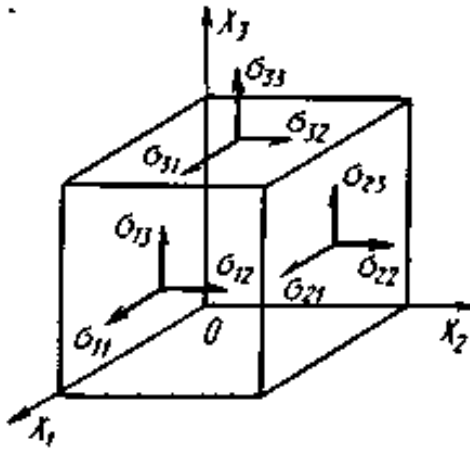


Рисунок 6.1 – Позначення напруження в прямокутній системі координат

Перший індекс указує напрям зовнішній нормалі до відповідної грані куба, другий – напрям компоненти сили, що діє. Наприклад, компонент напруження σ_{11} , що визначається як $\lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{F_1}{A_1}$, є розтягувальним напруженням, що діє у напрямі X_1 на грань куба, нормаль до якої також лежить у напрямі X_1 . Компоненти $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ є розтягувальними напруженням, σ_{32} і σ_{31} – дотичні напруження.

Повний напружений стан (або тензор напруження) у точці 0 для зручності записують у вигляді σ_{ij} , де σ_{ij} набуває значення всіх дев'яти компонент при незалежній зміні i і j від 1 до 3. Якщо куб знаходиться в стані рівноваги, то очевидно, що пари зсувних напружень повинні мати однакову величину $\sigma_{12} = \sigma_{21}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{31} = \sigma_{13}$.

6.2. Деформація

Деформація виявляється в зміні положення одних точок тіла щодо інших, тобто загальним переміщенням точок під дією напруження, якщо не відбувається поступального і обертального ходу тіла. Нехай точка P , що характеризується в прямокутній системі координатами $x_i (x_1, x_2, x_3)$, зміщена в положення P' , що визначається через x'_i , де $x'_i = x_i + u_i$. Тоді $u_i (u_1, u_2, u_3)$ є переміщенням точки P . Щоб відбулася деформація, u_i повинно вимірюватися від однієї точки до іншої. Отже, u_i є функцією x_i . Для малих деформацій залежність u_i від x_i беруть лінійною:

$$u_i = e_{ij}x_j, \quad (6.1)$$

де кожен коефіцієнт e_{ij} – константа пропорційності, відповідна зсуву у напрямі осі x_i точок, що лежать на осі x_j . Стан чистого зсуву досягається при $e_{12} = e_{21}$, причому позитивний знак береться при обертанні від однієї позитивної півосі до іншої.

6.3. Головне напруження і деформації

У тривимірному просторі напруження, яке діє на елемент довільно до орієнтованої площини, що проходить через точку O , може бути записане через його компоненти σ_{ij} . Можна знайти такі три орієнтації цієї площини, при яких зсувне напруження в ній не діятиме. Ці три площини, названі головними площинами, ортогональні між собою. Три перпендикулярні до них вектори утворюють головні осі, а три нормальні до цих площин напруження прийнято вважати головними напруженнями. Їх записують як σ_1, σ_2 і σ_3 (з одиночними індексами), причому зручно вважати σ_1 і σ_3 алгебраїчно найбільшим і найменшим напруженням, відповідно σ_1 – найбільше розтягувальне напруження, обумовлене прикладеним до тіла навантаженням. Величини σ_1, σ_2 і σ_3 можна знайти обчисливши значення σ , для яких детермінант

$$\begin{vmatrix} (\sigma_{11} - \sigma), \sigma_{21}, \sigma_{31} \\ \sigma_{12}, (\sigma_{22} - \sigma), \sigma_{32} \\ \sigma_{13}, \sigma_{23}, (\sigma_{33} - \sigma) \end{vmatrix} \quad (6.2)$$

дорівнює нулю, де $\sigma_{11}, \sigma_{21} \dots$ і так далі – дев'ять компонент напруження в прямокутній системі координат.

Опис напруження, прикладеного в точці, істотно спрощується, якщо їх пов'язати з головними осями. Залежно від значень σ_1, σ_2 і σ_3 існують різні напружені стани. У загальному випадку $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$, при цьому реалізується тривісний напружений стан. При $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ виникає гідростатичний стан. При двох рівних і третьому відмінному від нуля значеннях σ стан називається циліндровим. Якщо два значення σ дорівнюють нулю, то називається одновісним, якщо одне значення σ дорівнює нулю, то –

двовісним, або плоским напруженим. Останнє, як правило, реалізується при вантаженні дуже тонких пластин, по товщині яких розтягувальне напруження не розвивається.

Максимальне, або головне, зсувне напруження діє по площинах, нормалі до яких ділять кути навпіл (90°) між парами головних осей. Оскільки σ_1 - найбільше і σ_3 - найменше головне напруження максимальне зсувне напруження τ_{\max} діє по двох площинах, нормалі до яких утворюють кути 45° з напрямками σ_1 і σ_2 . Величина τ_{\max} визначається за формулою

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (6.3)$$

Максимальне головне дотичне напруження визначає прикладене напруження, при якому настане течія матеріалу.

6.4. Співвідношення між напруженням і деформацією у пружних тілах

Зв'язок між деформаціями і напруженням описує закон Гука. Він уперше виявив, що деформація тонкого дроту у разі додавання малого одновісного напруження прямо пропорційна його величині. Ця закономірність описує лінійно-пружну поведінку матеріалу (напруження і деформація зв'язані лінійною залежністю), а коефіцієнт пружності, що пов'язує напруження з деформацією, називається модулем Юнга E :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (6.4)$$

У свою чергу, коефіцієнт $1/E$, що пов'язує деформацію з напруженням, називається пружною податливістю системи.

У разі тривісного напруженого стану співвідношення для індивідуальних компонент напруження і деформації залишаються лінійними. Головні деформації тіла під дією головних напружень σ_1, σ_2 і σ_3 мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

Коефіцієнт Пуассона ν дорівнює для більшості металів 0,28 – 0,33. Виходячи з (6.5), можна дати визначення головному напруженому стану, який називається плоскою деформацією, коли одне із значень головних деформацій перетворюється в нуль.

ЛЕКЦІЯ 5

ТЕМА 7. Пружна і пластична деформації

Причиною пошкоджень, пов'язаних із пружною деформацією, є неприпустимо велика пружна деформація. Ця деформація складається з малих переміщень атомів із рівноважного положення. Оскільки сили і переміщення атомів, що викликаються ними, малі, атоми можуть повернутися в первинне рівноважне положення, а деформована деталь може набрати первинних розмірів. Більшість інженерних завдань до цього часу пов'язана з дослідженням пружної поведінки конструкцій.

Пластична деформація кристалічних матеріалів відбувається одним або декількома з таких чотирьох шляхів: (1) ковзанням, (2) двійникуванням, (3) ковзанням по межах зерен і (4) дифузійною повзучістю.

Основним видом пластичної деформації є ковзання. Якщо ковзання утруднене, то значний внесок у пластичну деформацію вносить двійникування. При високих температурах і малих швидкостях деформації полікристалічні матеріали можуть пластично деформуватися також у результаті ковзання по межах зерен і в результаті дифузійної повзучості.

7.1. Геометрія пластичних зрушень

З кристалографії випливає, що металевий кристал побудований з атомів, розміщених у певній послідовності, яка періодично повторюється в трьох вимірюваннях простору. Така послідовність утворює кристалічну решітку.

Найбільш поширеними типами кристалічних решіток у металах є: об'ємно-центрована кубічна (ОЦК), гранецентрована кубічна (ГЦК) і гексагональна щільно упакована (ГПУ) (див. рис. 7.1). Будова елементарних осередків зазначених решіток зображена відповідно на

рис. 7.1а-в; у місцях знаходження атомів позначені лише їх центри коливання.

На рис. 7.1г показані сфери, що охоплюють зовнішні межі атомів у гексагональному осередку; з цього рисунка видно, що грати дійсно є щільно упакованими атомами.

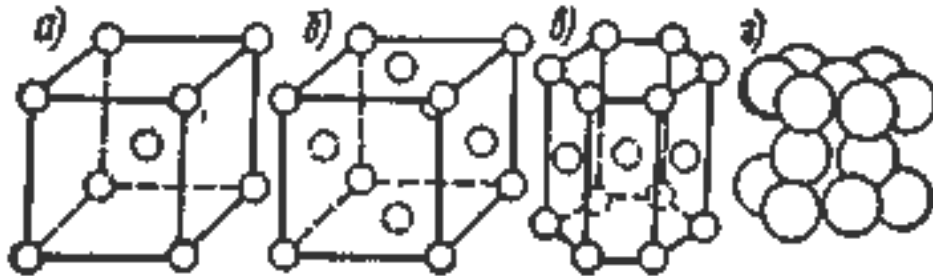


Рисунок 7.1 – Найбільш поширені типи кристалічних решіток у металах

7.2. Ковзання

Пластичні зрушення відбуваються тільки по певних кристалографічних площинах, що характеризуються тим, що вони найщільніше упаковані атомами, а в цих площинах – тільки в тих напрямках, які також найщільніше насичені атомами. Наприклад, у кристалах із решітками ГЦК ковзання відбувається по площинах $\{111\}$ у напрямках $\langle 110 \rangle$.

У решітці ГЦК чотири площини ковзання, і кожна площина (111) має три напрями ковзання, що є діагоналями граней куба, як показано на рис. 7.2 а. Взагалі в кристалах із решітками ГЦК є дванадцять можливих систем ковзання.

Кристали з решітками ОЦК мають шість площин ковзання $\{110\}$ і в кожній площині два напрями ковзання $\langle 111 \rangle$, що сполучають протилежні кути куба, тобто теж дванадцять можливих систем ковзання. На рис. 7.2 б показана одна з площин (110) з двома напрямками ковзання (по діагоналях).

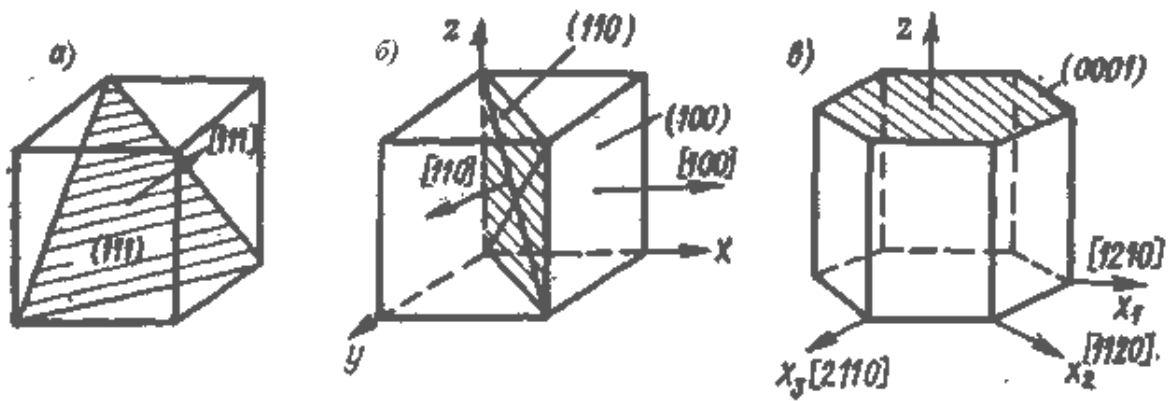


Рисунок 7.2 – Площини ковзання і їх індекси

У метали із решітками ГПУ ковзання відбувається на основі призми, яка називається площиною базису (0001), в трьох напрямках [2110], [1120] і [1210], що сполучають протилежні кути призми (рис. 7.2 в).

Таким чином, такі метали мають всього *три системи ковзання*. Плавний рух однієї площини атомів над іншою називається, як правило, ковзанням. Ковзання приводить до появи смуг із тонких паралельних ліній ковзання на поверхні кристала при його пластичній деформації.

Монокристал простої геометричної форми показаний на рис.7.3. Циліндровий зразок, площа нормального поперечного перерізу якого дорівнює A , навантажений осьовою розтягувальною силою F . Площина ковзання в кристалі визначається нормаллю, яка перетинає вісь симетрії зразка під кутом ψ . Напрямок ковзання в площині ковзання визначається кутом λ між віссю симетрії зразка і напрямком ковзання. З урахуванням сказаного площу A_{sp} площини ковзання можна записати у вигляді

$$A_{sp} = A / \cos \psi, \quad (7.1)$$

а складову F_{sd} розтягувальної сили F у напрямі ковзання – у вигляді

$$F_{sd} = F \cos \lambda. \quad (7.2)$$

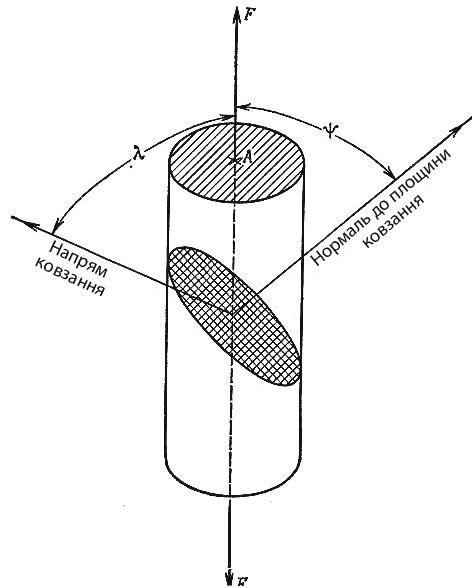


Рисунок 7.3 – Схемне зображення системи ковзання в монокристалічному зразку

Складова дотичного напруження τ_r на площині ковзання у напрямі ковзання визначається, таким чином, формулою

$$\tau_r = F_{sd} / A_{sp} = (F / A) \cos \lambda \cdot \cos \psi. \quad (7.3)$$

Було зроблено припущення, підтвержене надалі численними експериментами, що величина дотичного напруження τ_r , при якій починається ковзання в чистому ідеальному монокристалі матеріалу, стала при фіксованій температурі. Ця величина називається граничним значенням дотичного напруження, при якій відбувається ковзання, а формула (7.3) – законом Шмідта, який перевірений для монокристалів багатьох різних металів.

Нормальна складова напруження σ_n впливає на величину граничного значення дотичного напруження, при якій відбувається ковзання. Формула для нормального напруження σ_n на площині ковзання може бути записана після визначення нормальної складової F_n прикладеної сили F , яка показана на рис. 7.3. Ця формула має вигляд

$$\sigma_n = F_n / A_{sp} = \frac{F \cos \psi}{A / \cos \psi} = \frac{F}{A} \cos^2 \psi. \quad (7.4)$$

Експериментальні дослідження показали, що вплив нормального напруження на граничне значення дотичного напруження, при якому

відбувається ковзання, незначний. Проте величину нормального напруження σ_n необхідно знати при визначенні опору розриву.

7.3. В'язке руйнування

В'язке руйнування, або пластичний розрив, відбувається після значної пластичної деформації і є повільним поширенням тріщини внаслідок утворення і з'єднання пор і пустот. Поверхня руйнування при пластичному розриві матова і гладенька. У більшості полікристалічних металів при пластичному розриві спостерігаються три різні стадії. Спочатку в зразку починається «шийкоутворення» і в області шийки з'являються малі каверни. Далі ці маленькі каверни об'єднуються, утворюючи тріщину в центрі поперечного перерізу, напрям якої, як правило, перпендикулярний до напрямку прикладеного напруження. Нарешті тріщина поширюється до поверхні зразка по площинах зрушення, орієнтованих приблизно під 45° до напрямку осі розтягування. У результаті часто утворюється добре відома поверхня руйнування «чашка – конус».

7.4. Крихке руйнування

Крихким руйнуванням є дуже швидке поширення тріщини після незначної пластичної деформації або взагалі без неї. Після початку зростання тріщини при крихкій поведінці матеріалу швидкість її швидко зростає від нуля до деякої граничної величини, що дорівнює приблизно третині швидкості поширення звуку в матеріалі. У полікристалічних матеріалах руйнування відбувається по площинах розщеплювання кристалів, у результаті чого поверхня руйнування виходить зернистою внаслідок відмінності орієнтації кристалів і площин їх розщеплювання. Іноді крихке руйнування відбувається в основному по межах зерен; таке руйнування називається міжкристалічним.

Гріффітс у 1920 р. припустив, що крихкі матеріали містять безліч субмікроскопічних тріщин, які в умовах дії достатньо високого напруження збільшуються до макроскопічних розмірів, унаслідок чого врешті-решт відбувається крихке руйнування.

ЛЕКЦІЯ 6

ТЕМА 8. Макроскопічний рівень

8.1. Закон Гука

На цьому рівні розглядається зміна початкових властивостей або стану матеріалу всього тіла деталі. Так, теорія пружності на основі закону Гука розглядає деформації і напруження в системах і деталях різної конфігурації, що працюють на розтягування, кручення, вигин та інші види деформації.

Із дослідів випливає висновок, що поки навантаження на зразок не досягло відомої межі, подовження прямо пропорційне розтягувальній силі P , довжині зразка l і обернено пропорційне площі поперечного перерізу F . Позначаючи через Δl приріст довжини зразка від сили P , можемо написати формулу, що зв'язує між собою ці дослідні дані:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}, \quad (8.1)$$

де E – коефіцієнт пропорційності, різний для різних матеріалів;

Δl – абсолютне подовження стрижня від сили P .

Формула (2.45) має назву закону Гука, на ім'я вченого, який уперше відкрив цей закон пропорційності в 1660 р.

Залежність (2.45) можна подати в іншому вигляді. Розділимо обидві частини цієї формули на первинну довжину стрижня l :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{EF},$$

відношення $\frac{\Delta l}{l}$ – абсолютного подовження до первинної довжини – називається відносним подовженням; воно позначається буквою ϵ .

Відносне подовження ϵ безрозмірною величиною, як відношення двох довжин Δl і l , і за своїм числовим значенням дорівнює подовженню кожної одиниці довжини стрижня. Підставивши в попередню формулу замість $\Delta l/l$ величину ϵ , а замість P/F – величину нормального напруження σ , отримуємо інший вираз закону Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (8.2)$$

або

$$\sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (8.3)$$

Таким чином, нормальне напруження при розтягуванні або стисненні прямо пропорційне відносному подовженню або укороченню стрижня.

Коефіцієнт пропорційності E , що зв'язує нормальну напруження і відносне подовження, називається модулем пружності при розтягуванні (стисненні) матеріалу. Чим більша ця величина, тим менше розтягується (стискається) стрижень за інших однакових умов (довжини, площі, сили P). Таким чином, фізично модуль E характеризує опірність матеріалу пружної деформації при розтягуванні (стисненні).

Оскільки ε відносне подовження є безрозмірною величиною, то з формули (8.3) випливає, що модуль виражається в тих самих одиницях, що і σ , тобто в одиницях сили, що діляться на одиницю площі.

Необхідно відмітити, що величина модуля пружності матеріалу E навіть для одного і того самого матеріалу не є сталою, а дещо коливається. Потрібно мати на увазі, що закон Гука представлений формулою, яка тільки приблизно відображає результати дослідів, схематизувавши їх; тому він не є абсолютно точною залежністю.

Приріст деформації слід розглядати за відношенням до вже деформованого матеріалу, тому дійсна, або істинна, деформація визначається як

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A}, \quad (8.4)$$

де A_0/A – відношення площі поперечного перерізу до деформації (початкового) матеріалу до поточного значення площі поперечного перерізу при деформації.

Позначивши через l_0 і l початкове і поточне значення довжини робочої ділянки, отримаємо

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l dl / l = \ln(l / l_0) \quad (8.5)$$

(відповідна номінальна деформація дорівнює (l/l_0)).

Якщо зміною об'єму в процесі деформації можна нехтувати, то зв'язок між початковими і поточними значеннями властивостей визначаємо умовою $Al = A_0l_0$, тобто обидва визначення деформації узгоджуються один із одним.

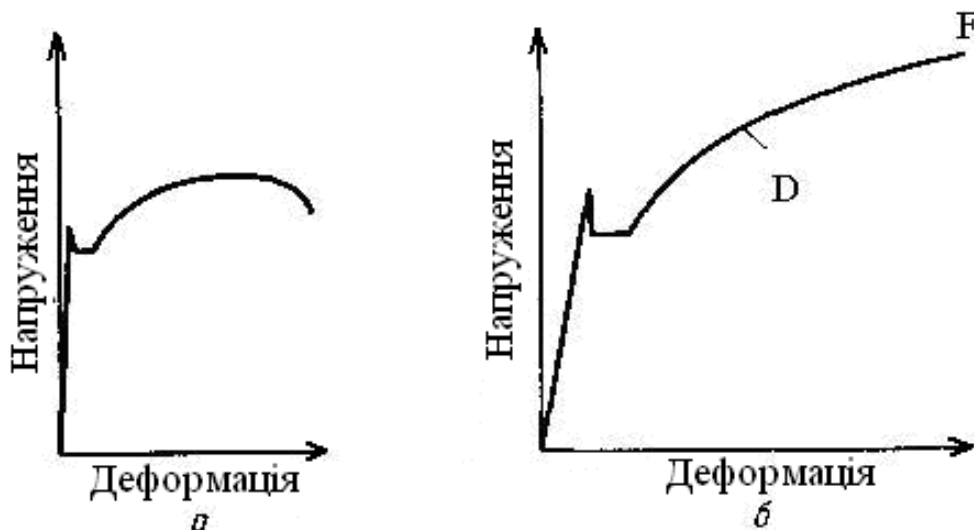


Рисунок 8.1 - Діаграма «напруження – деформація» для сталей з яскраво вираженою межею текучості:

a – для номінальних значень σ і ε ; *б* – для істинних значень σ і ε (*D* – початок утворення шийки, *F* – руйнування)

Часто при інтерпретації результатів випробування на розтягування буває корисно будувати криві в координатах «дійсне напруження – дійсна деформація»; вигляд цих кривих ілюструє рис. 8.1б.

Дійсна крива «напруження – деформація» лінійна на ділянці *DF* (рис. 8.1б). Для заліза і сталей, зокрема для легованих сталей, на всіх ділянках графіка σ - ε , і особливо в інтервалі деформацій 0,01-0,4, між логарифмами напруження і деформації існує лінійна залежність

$$\sigma = K\varepsilon^m. \quad (8.6)$$

Сталі *K* і *m* залежать від структури матеріалу, *m* називається показником деформаційного зміцнення. У випадку сталей, що володіють вираженою текучістю, рівняння (8.6) описує ту частину графіка σ - ε після нижньої межі текучості, яка відповідає початку зміцнення.

8.2. Закони стану і старіння

Як фізичні закони, так і отримані на їх основі залежності, що описують зміну властивостей і стану матеріалів, можна поділити на дві основні групи (рис. 8.2).

Закони стану описують взаємозв'язки зворотних процесів, коли після припинення дії зовнішніх чинників матеріал (і відповідно деталь) повертається в початковий стан.

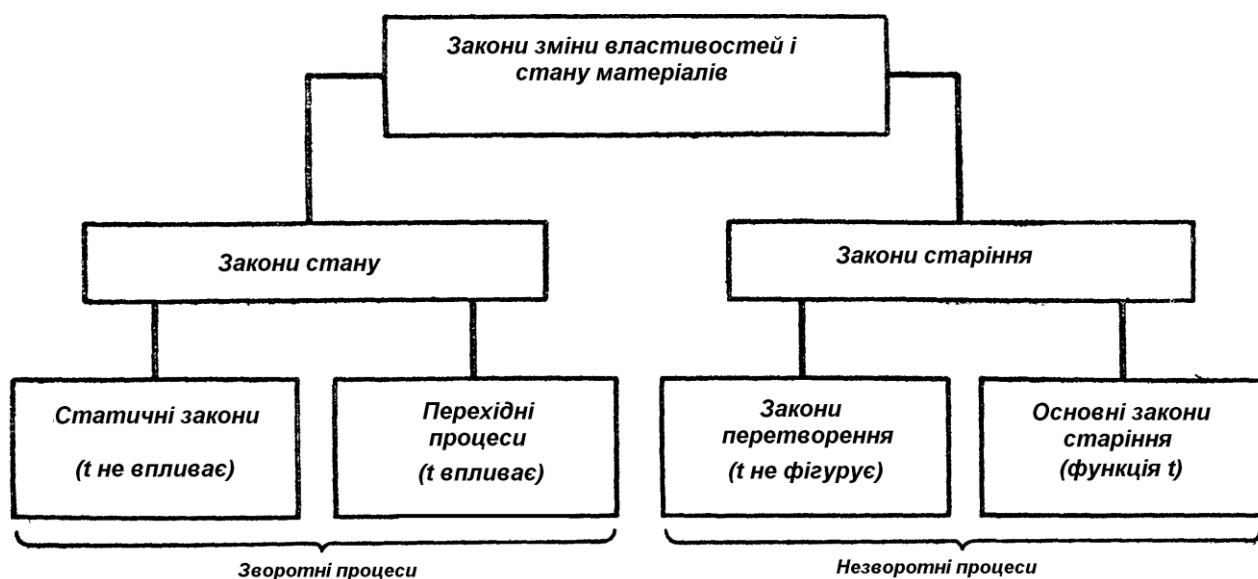


Рисунок 8.2 – Класифікація закономірностей, що оцінюють зміни властивостей і стану матеріалів

Закони старіння описують незворотні процеси і, отже, дозволяють оцінити ті зміни початкових властивостей матеріалів, які відбуваються або можуть відбуватися в процесі експлуатації машини. Розглянемо, як різні закономірності можуть бути використані для оцінки втрати машинами працездатності.

8.2.1. Закони стану

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

Типовими прикладами статичних законів стану можуть бути закон Гука, закон теплового розширення твердих тіл та ін. На підставі

цих законів отримані розрахункові залежності для вирішення різних інженерних завдань.

8.2.2. Закони старіння

Закони старіння, що оцінюють ступінь пошкодження матеріалу у функції часу, є основою для вирішення завдань надійності. Вони дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, оцінювати можливі його реалізації і виявляти найбільш істотні чинники, що впливають на інтенсивність процесу. Типовим прикладом таких залежностей є закони зносу матеріалів, на основі яких розкриття фізичної картини взаємодії поверхонь дають методи для розрахунку інтенсивності процесу зношування або величини зносу у функції часу й оцінюють параметри, що впливають на хід процесу.

У табл. 2.1 [1] наведена класифікація процесів старіння за їх зовнішнім проявом і визначені основні різновиди кожного процесу.

Тіло деталі може піддаватися руйнуванню, яке є найбільш небезпечним проявом процесів старіння, деформуватися або змінювати властивості матеріалу – його пластичність, електропровідність, магнітні властивості й т.п.

Найчастіше процеси старіння проходять у поверхневих шарах. При цьому поверхня деталі може піддаватися температурним, хімічним, механічним та іншим діям зовнішнього середовища. У результаті можуть відбуватися явища, пов'язані зі втратою матеріалу поверхні в результаті корозії, ерозії, кавітації та інших процесів, що об'єднані одним терміном – роз'їдання поверхні.

На поверхні можуть проходити і такі процеси, як адгезія, абсорбція, нагар та інші, що пов'язані з приєднанням до поверхні інших матеріалів. У результаті зовнішніх дій можлива також зміна властивостей поверхневого шару – його мікрогеометрії, твердості, відбивної здатності та ін.

Специфічні процеси проходять при контакті двох зв'язаних поверхонь, найбільш характерних для механізмів і елементів машин. У цьому випадку в рухомих з'єднаннях відбувається різноманітні процеси зносу, які передбачають як стирання поверхні, так і втому поверхневих шарів та її пластичну деформацію.

Для рухомих і нерухомих з'єднань може відбутися зміна умов контакту, що приводить, як правило, до зміни жорсткості, коефіцієнта тертя та інших параметрів з'єднання.

Надалі детальніше розглянемо об'ємні явища руйнування – (втому) і деформацію (повзучість), та поверхневі - знос.

ЛЕКЦІЯ 7

ТЕМА 9. Відмови за параметрами міцності

Міцність – властивість матеріалу (у певних умовах і межах) чинити опір руйнуванню, а також зміні форми під дією зовнішніх або внутрішніх навантажень.

Параметрами міцності є *межа міцності, пропорційності, текучості, повзучості, витривалості та ін.*

Відмовою за параметрами міцності можуть бути події, пов'язані з руйнуванням машини або з отриманням неприпустимої величини деформацій. Показником, що характеризує напрацювання до настання такого виду подій, може бути, наприклад, середнє напрацювання повністю. Граничним станом машини за критеріями міцності можуть бути події, пов'язані з накопиченням певного числа циклів вантаження, з неприпустимою зміною параметрів міцності, з накопиченням певної величини пластичних деформацій і т. д.

Для характеристики надійності за параметрами міцності нерідко використовують термін "**міцнісна надійність**". Під цим терміном розуміють властивість машин, конструкцій та їх елементів зберігати в часі працездатний стан під час дії на нього зовнішніх навантажень. Показники міцнісної надійності матимуть фізичний сенс, якщо одночасно з їх заданням і визначенням будуть зазначені критерії відмов і граничних станів.

Відмови за параметрами міцності найчастіше пов'язані зі зломом деталей машин або елементів конструкцій або їх деформацією, першопричинами яких є виникнення і розвиток у тілі деталі тріщин і повзучість.

Причина тріщин – втома металу – явище зі складною фізичною природою. Вона визначається багатьма чинниками:

- опором утомному руйнуванню структури матеріалів;
- умовами і способом навантаження;
- властивостями матеріалів і поверхневого шару;
- масштабом і геометрією виробів;
- асиметрією, частотою і формою циклу навантаження;

- експлуатаційними, зокрема корозійними, середовищами;
- іншими параметрами, що регламентують здатність і довговічність машин і конструкцій при циклічному навантаженні.

Центральною проблемою при цьому є дослідження кінетики розвитку втомних тріщин і пошук адекватного способу її опису.

9.1. Кінетика розвитку втомних тріщин

Теоретичною основою для аналізу поведінки машин в умовах накопичення пошкоджень і розвитку тріщин в їх несучих елементах є механіка руйнування.

Для визначення міцності та довговічності машин, що містять деталі зі втомними тріщинами, необхідно знати закономірності розвитку втомних тріщин у процесі їх стабільного розвитку і мати методи, що дозволяють розраховувати критичні розміри втомних тріщин для різних матеріалів і урахуванням їх властивостей, режиму навантаження, температури, розмірів зразка і т. п. У механіці руйнування використовують два взаємодоповнювальні підходи до вирішення цієї проблеми : метод Гріффітса і метод Шенлі.

9.1.1. Кінетика тріщин за Гріффітсом

Для вирішення свого завдання Гріффітс використовував енергетичний метод (рис. 9.1). Якщо пружна енергія деформації пластинки без тріщини при заданому рівні напруження дорівнює U_0 , то за наявності тріщини вона буде

$$U = U_0 - \frac{1}{E} \pi a^2 \sigma^2 + 4a\gamma, \quad (9.1)$$

де γ – питома поверхнева енергія, що дорівнює роботі, необхідній для утворення одиниці нової поверхні;

E – модуль пружності матеріалу;

$\frac{1}{E} \pi a^2 \sigma^2$ – зменшення пружної енергії деформації пластинки

внаслідок наявності в ній тріщини. Цей вираз отриманий на основі припущення, що за наявності в пластині тріщини розміром $2a$ пружна енергія деформації відсутня в об'ємі матеріалу, що дорівнює πa^2 ;

$4a\gamma$ – поверхнева енергія тріщини, що враховує утворення двох

поверхонь. Зміна повної енергії пластини та її складових $\frac{1}{E} \pi a^2 \sigma^2$ і $4a\gamma$ при збільшенні довжини тріщини показана на рис. 9.2.

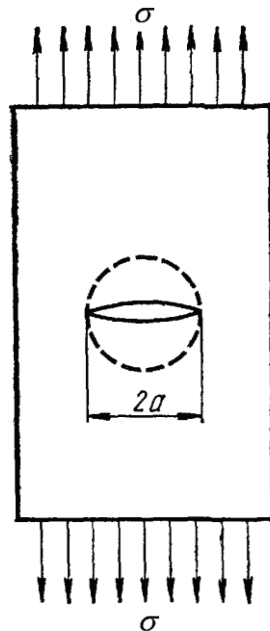


Рисунок 9.1 – Плоска схема пластини з еліптичною тріщиною (модель, розглянута Гріффітсом)

Розмір тріщини, що відповідає переходу до її нестабільного розвитку, може бути знайдений з такої умови:

$$\frac{dU}{da} = 0,$$

або

$$\frac{dU}{da} = \frac{2a_k \cdot \pi \cdot \sigma_k^2}{E} + 4\gamma, \quad (9.2)$$

звідки

$$\sigma_k = \left(\frac{2\gamma \cdot E}{a_k \cdot \pi} \right)^{1/2}.$$

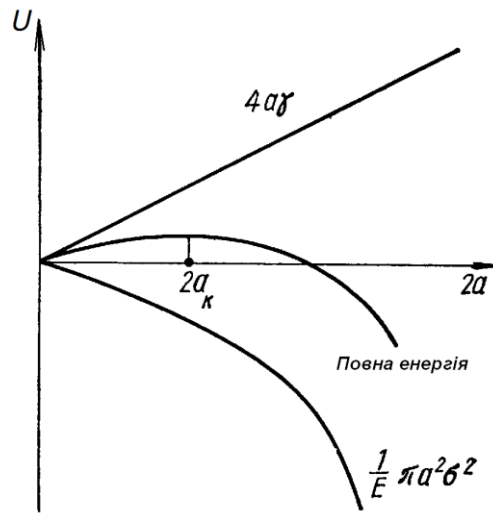


Рисунок 9.2 – Зміна повної енергії пластини залежно від довжини тріщини

Формула (3.3) отримала експериментальне підтвердження тільки для дуже крихких матеріалів типу скла і кварцу. Орованом була зроблена спроба вдосконалити формулу Гріффітса стосовно пластичних матеріалів:

$$\sigma_k = \left[\frac{2(\gamma + \gamma_{nl})E}{a_k \pi} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9.3)$$

де γ_{nl} – енергія пластичної деформації.

Аналіз показав, що для металів енергія пластичної деформації, яка реалізується біля вершини тріщини, значно більша (у 1000 і більше разів) за питому поверхневу енергію.

9.2. Ідеалізовані схеми навантаження та їх опис

Залежно від виду прикладеного навантаження деформація пластини з тріщиною може відбуватися за однією з таких основних схем, наведених на рис. 9.3.

При деформації за схемою I (розтягування) поверхні тріщини розходяться одна від одної; при деформації за схемою II (поперечне зрушення) поверхні тріщини ковзають одна по іншій у поперечному напрямі і при деформації за схемою III (подовжнє зрушення) поверхні тріщини ковзають одна по іншій в подовжньому напрямі.

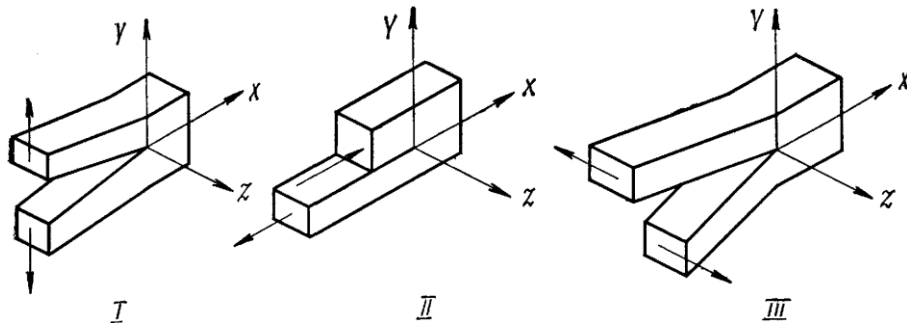


Рисунок 9.3 – Схеми деформації тіл із тріщинами

Для характеристики плоского напруженого стану вводиться поняття коефіцієнта інтенсивності напруження K . Для тріщини (див. рис. 9.1), що розвивається в пластинах великих розмірів:

$$\begin{aligned} K_1 &= \sigma \sqrt{\pi a}, \\ K_{11} &= \tau \sqrt{\pi a}, \\ K_{111} &= \tau \sqrt{\pi a}, \end{aligned} \quad (9.4)$$

де σ і τ — нормальне і дотичне номінальні напруження;
 a — довжина тріщини.

Коефіцієнти інтенсивності напруження є функціями прикладеного напруження і геометрії тріщини і не залежать від координат точки біля вершини тріщини.

При переході до пластин обмежених розмірів і при інших формах тріщин і зразків, що відрізняються від наведених на рис. 9.3, вирази для K_1, K_{11} і K_{111} відрізняються від наведених вище і можуть бути записані в такому загальному вигляді:

$$\begin{aligned} K_1 &= f_1 \sigma \sqrt{\pi a}, \\ K_{11} &= f_{11} \tau \sqrt{\pi a}, \\ K_{111} &= f_{111} \tau \sqrt{\pi a}, \end{aligned} \quad (9.5)$$

де f_1, f_{11}, f_{111} — функції, що враховують геометрію тріщини і схему навантаження.

Формули для визначення цих функцій у разі типових схем навантаження деталей наведені в табл. 3.2 [1].

ЛЕКЦІЯ 8

ТЕМА 9. Відмови за параметрами міцності (продовження)

9.3. Швидкість розвитку тріщини

Між швидкістю росту тріщини за цикл $v = da/dN$ і коефіцієнтом інтенсивності напруження, що враховує одночасно величину навантаження, що діє, і геометрію зразка і тріщини, існує залежність, подана в логарифмічних координатах на рис. 9.4. По осі ординат на цьому рисунку відкладається швидкість росту тріщини за цикл, а по осі абсцис – розмах коефіцієнта інтенсивності напруження $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ або його максимальні значення K_{\max} .

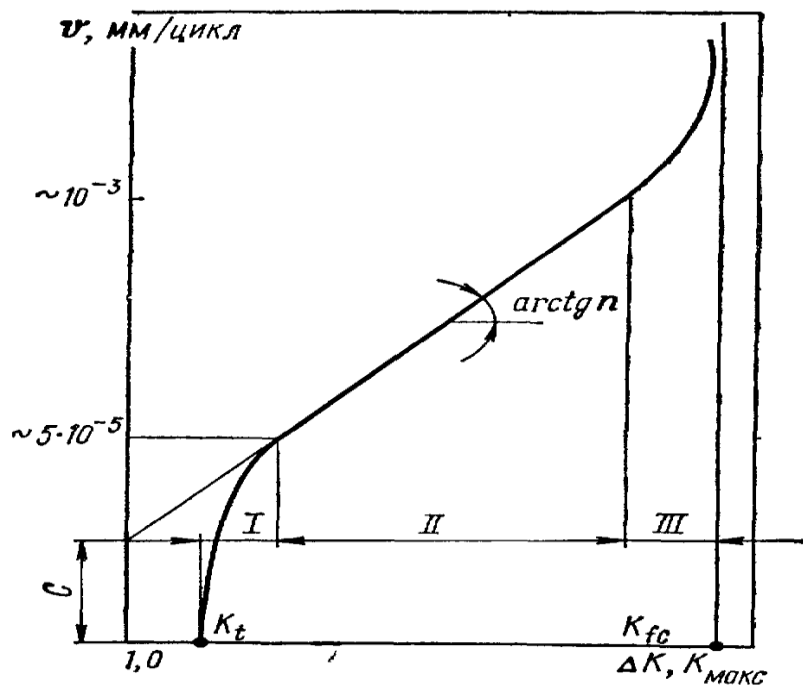


Рисунок 9.4 – Повна діаграма росту(збільшення) втомної тріщини в логарифмічному масштабі

Наведений на рис. 9.4 графік є основною інформацією про процес утомного руйнування на стадії розвитку тріщини й охоплює діапазон зміни швидкості росту тріщини від нуля до критичного значення, що відповідає остаточному руйнуванню зразка. На діаграмі, зображеній у логарифмічних координатах, можна виділити три ділянки, кожна з яких характеризується своїми феноменологічними і

фізичними закономірностями розвитку тріщин: *I* – низьких ($0 < V < 5 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл) *II* — середніх ($5 \cdot 10^{-5} < V < 10^{-3}$ мм/цикл), *III* — високих ($V > 10^{-3}$ мм/цикл) швидкостей розвитку тріщини.

Основними характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалів, що впливають з цієї діаграми, є такі: граничне K_t і критичне K_{fc} ($K_{1,fc}$) значення коефіцієнтів інтенсивності напруження, а також параметри n і C степеневі залежності $V = CK_{\max}^n$, що описує ділянку середніх швидкостей розвитку тріщин. Величину K_t знаходять безпосередньо з досліду як максимальне значення K_{\max} , при якому тріщина не росте впродовж 10^6 циклів і збільшення якого на 3 % приводить до її росту зі швидкістю, що не перевищує $3 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл. Вирази для швидкості розвитку тріщин наведені в табл. 3.3 [1].

З усіх розглянутих ділянок діаграми (рис. 9.4) найбільш важливою є ділянка *II*, коли спостерігається лінійна залежність у логарифмічних координатах між швидкістю розвитку тріщини і розмахом (максимальним значенням) коефіцієнта інтенсивності напруження.

Для опису цієї ділянки діаграми найчастіше використовують формулу Періса

$$V = C \cdot \Delta K^n. \quad (9.6)$$

Хоча параметри C і n не мають фізичного сенсу, їх значення велике при визначенні швидкості розвитку тріщини і довговічності конструкцій у практично важливій ділянці діаграми. Для різних матеріалів значення C і n змінюються в широкому інтервалі. Геометричний сенс параметрів C і n бачимо на рис 9.4.

Якщо взяти, що розвиток тріщини відбувається по ділянці *II* діаграми, то з рівнянь (9.6) маємо

$$\begin{aligned} dN &= \frac{da}{C \cdot \Delta K^n}; \\ N_p &= \int_{a_0}^{a_k} \frac{da}{C \cdot \Delta K^n}, \end{aligned} \quad (9.7)$$

де a_0 — початковий розмір тріщини;

a_k — критичний розмір тріщини.

Якщо припустити, що залежність між розмахом напруження, що діє, $\Delta\sigma$, розміром тріщини a , розмахом коефіцієнта інтенсивності напруження ΔK має вигляд

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{Ya}, \quad (9.8)$$

де Y — параметр, що характеризує геометрію елемента і форму тріщини (табл. 3.2 [1]).

Якщо величина $\Delta\sigma$ залишається сталою впродовж усієї роботи елемента, то вираз (9.7) можна записати у вигляді

$$N_p = \int_{a_0}^{a_k} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{Ya})^n}.$$

Проінтегрувавши цей вираз за умови $Y = \text{const}$, отримаємо

$$N_p = \frac{2}{(n-2)CY^{n/2}(\Delta\sigma)^n} \left[\frac{1}{a_0^{n/2-1}} - \frac{1}{a_k^{n/2-1}} \right]. \quad (9.10)$$

Формула (9.10) дає можливість підрахувати число циклів до руйнування (досягнення критичного розміру тріщини). Для користування цією формулою необхідно знати значення C і n , a_k і Y . Значення C і n визначають за експериментально побудованими графіками в координатах «логарифм швидкості розвитку втомної тріщини $\left(\frac{da}{dN}\right)$ — логарифм зміни коефіцієнта інтенсивності напруження за один цикл навантаження ΔK » ($\ln(V) - \ln(\Delta K)$). На цьому графіку параметр n характеризує нахил прямої, а C — відрізок по осі ординат, що відтинається цією прямою (див. рис. 9.4). Для більшості металів, за літературними даними, $n = 2 - 6$. Величина a_k підраховується відповідно до методів, розглянутих вище.

Якщо в рівняння (9.10) замість a_k підставити поточне значення довжини тріщини a і розв'язати його щодо цього параметра, то отримаємо залежність поточної довжини тріщини від напрацювання $a(N_t)$:

$$a = a_0 \sqrt[n/2-1]{\frac{1}{1 - \frac{a_0^{(n/2-1)} N_t}{b}}}, \quad (9.11)$$

де $b = \frac{2}{(n-2)CY^{n/2}\Delta\sigma^n}$.

9.4. Кінетика тріщин за Шенлі

Шенлі запропонував такий закон розвитку тріщини:

$$h = Ae^{\beta n}, \quad (9.12)$$

де h – глибина тріщини (у Гріффітса і Періса під h розуміють довжину тріщини a);

A – стала;

β – коефіцієнт, що залежить від амплітуди напруження;

n – число циклів зміни напруження.

Строго кажучи, n — число циклів зміни напруження без одного. Тому в рівнянні (9.12) слід писати $n-1$. Проте при втомному руйнуванні n зазвичай велике, так що $n \approx n-1$. При n , що дорівнює нулю, A дорівнює початковій довжині тріщини $h_{вих}$, оскільки множник $e^{\beta \cdot 0} = 1$. З урахуванням цього вираз (9.12) переписеться таким чином:

$$h = h_{вих} \cdot e^{\beta \cdot n}. \quad (9.13)$$

Передбачувана крива залежності довжини тріщини від числа циклів зміни напруження показана на рис. 9.5.

Узявши похідну від обох частин рівняння (10.2), отримаємо вираз для швидкості розвитку тріщини

$$V_{тр} = h_{вих} \cdot \beta \cdot n \cdot e^{\beta \cdot n}. \quad (9.14)$$

Графік зміни швидкості розвитку тріщини залежно від числа відпрацьованих циклів n аналогічний графіку, наведеному на рис. 9.5.

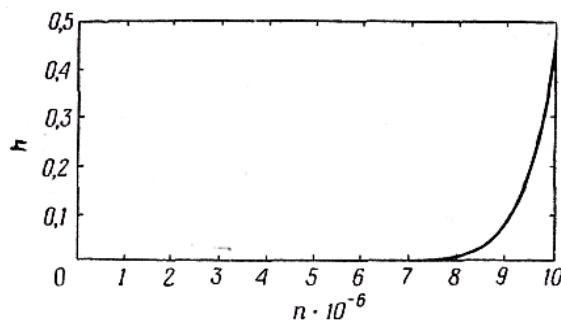


Рисунок 9.5 – Графік залежності довжини тріщини h від числа n циклів зміни напруження

Після послідовних перетворень можна перейти від формули (10.1), що описує залежність довжини тріщини від числа циклів, до рівняння кривої втоми.

З цією метою вираз (9.12) перетворюється таким чином:

- 1 Нехай $h = h_0$ — довжина тріщини, при якій відбувається втомне руйнування (у Гріффітса під h_0 розуміють критичну довжину тріщини a_k),
- 2 Нехай $n = N$ — число циклів до моменту руйнування.
- 3 Нехай параметр β , що характеризує швидкість росту тріщини, має вигляд

$$\beta = C\sigma^\alpha,$$

де σ — номінальне напруження;

α — показник, що визначається за експериментальними даними;

C — стала.

Тоді, підставивши даний вираз у (9.12), отримаємо

$$h_0 = Ae^{C\sigma^\alpha N}.$$

Обчислення логарифма від обох частин цієї рівності дає

$$\ln h_0 = \ln A + C\sigma^\alpha N. \quad (9.15)$$

Розв'яжемо рівняння (9.15) щодо $\sigma^\alpha N$

$$\sigma^\alpha N = \frac{\ln h_0 - \ln A}{C}, \quad (9.16)$$

і праву частину рівняння (9.16) позначимо деякою сталою B :

$$\sigma^\alpha N = B. \quad (9.17)$$

Вираз (9.17) є рівнянням кривої втоми. Типовий графік цього рівняння (крива втоми) наведений на рис. 9.6. Показник ступеня α , що позначається в літературі, присвяченій утомі металів, літерою m , характеризує нахил кривих $\sigma(N)$ при побудові графіків у логарифмічних координатах « $\ln \sigma - \ln N$ ».

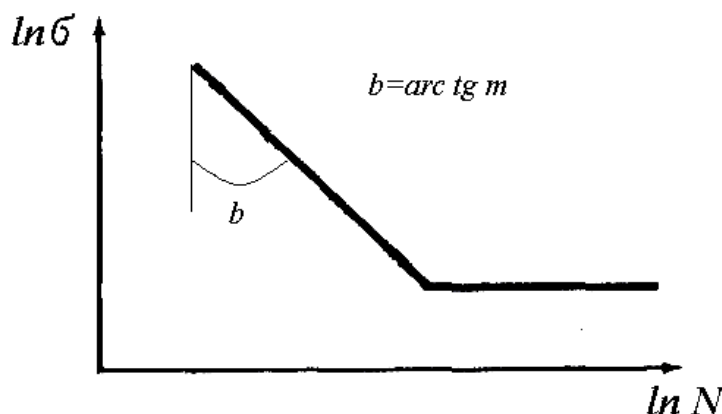


Рисунок 9.6 – Графік кривої втоми

ЛЕКЦІЯ 9

ТЕМА 10. Утомні руйнування

10.1. Узагальнена крива (діаграма) втоми

Утомні руйнування належать до поступових відмов. Характер опору матеріалу цим навантаженням графічно зображується кривими втоми.

Три стадії втомного руйнування подані на так званій повній кривій втоми у вигляді трьох характерних областей (рис.10.1):

- область квазістатичного руйнування I ;
- область малоциклової втоми II;
- область багатоциклової втоми III ;
- дві перехідні зони (1 і 2).

Для різних матеріалів і умов навантаження тривалість цих областей за числом циклів N та інтервал їх за напруженням можуть бути різними, проте загальний характер в основному зберігається. Тривалість області квазістатичного руйнування може становити від десятків до тисяч циклів. Малоциклова втома має діапазон орієнтування від $N_B = 5 \times 10^2$ до $N_K = 10^4$ циклів.

Область багатоциклової втоми має дві ділянки (V і VI) і поширюється на довговічності, що приблизно перевищують 10^4 циклів.

На повній кривій втоми були виявлені два види розриву (на рис. 10.1 показані штрихуванням):

- *перший* визначається напруженням верхнього розриву σ_p^B і є межею між квазістатичним руйнуванням і малоцикловою втомою;
- *другий* – напруженням нижнього розриву σ_p^H .

Відповідні ділянки повної кривої втоми в цих точках можуть не стикуватися (мати розрив).

Перехідна зона 2 трансформується в область багатоциклової втоми при досягненні напруженням, що діє, деякого значення σ_k . Крива втоми має тут перегин або розрив.

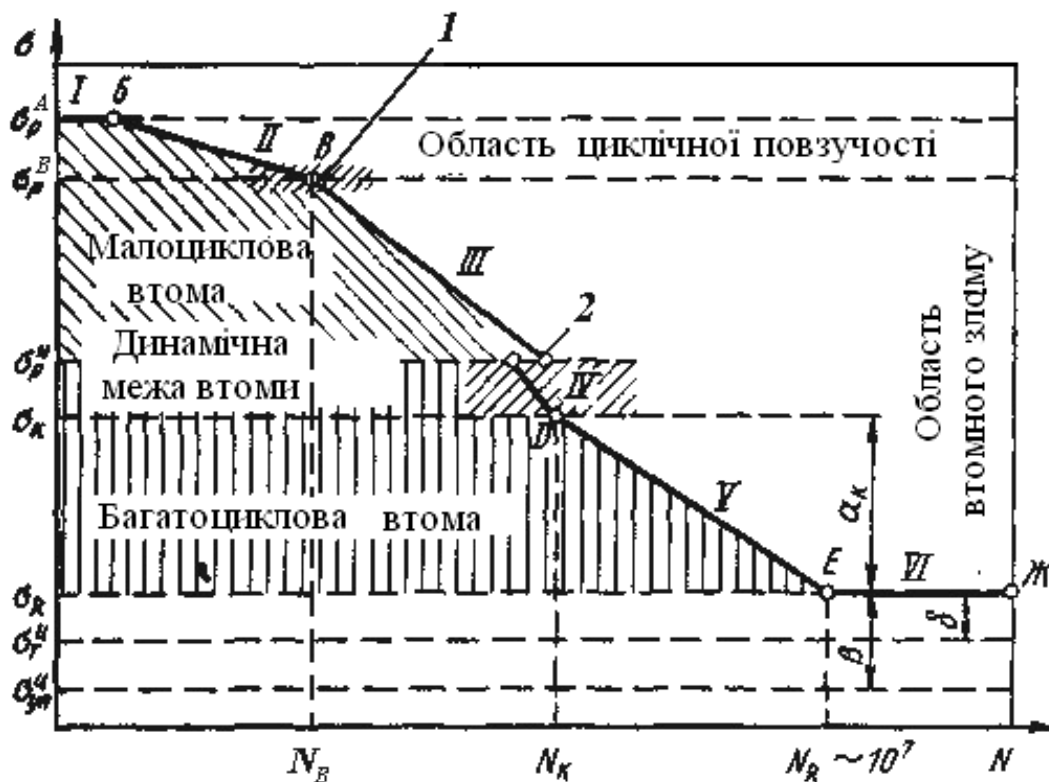


Рисунок 10.1 – Схематичне зображення повної кривої втоми:

σ_B – тимчасовий опір; σ_p^B – напруження верхнього розриву;

σ_p^H – напруження нижнього розриву (другий розрив);

σ_k – критичне напруження (третій вид розриву);

σ_R – межа витривалості; σ_T^u – циклічна межа текучості;

$\sigma_{u.n}^u$ – циклічна межа пружності;

N_k – критичне число циклів; a_σ і β – константи.

Крива втоми на рис. 10.1 зображена для металів у деяких умовах випробування, коли виявляється фізична межа витривалості, тобто коли на ній є горизонтальна ділянка VI. Це характерно для сталей при випробуваннях зразків на повітрі при кімнатній температурі, якщо $N_R \geq 10^7$ циклів.

При випробуваннях кольорових металів і сплавів на повітрі, сталей і нікелевих сплавів у корозійних середовищах, при підвищеній температурі і так далі крива багатоциклової втоми не має яскраво вираженого перелому (ділянки V і VI зливаються). У цих випадках

говорять про умовну межу витривалості σ_{-1} , що відповідає заданій довговічності, прийнятій за базу випробувань $N_B = N_0$. Фізичну межу витривалості зазвичай називають *межею витривалості*, а умовну - *межею обмеженої витривалості*. У квазістатичній області II (див. рис. 10.1) процес руйнування визначається великими пластичними деформаціями, що розвиваються під дією напруження, близького до межі міцності. У металі виникають значні зсуви, при цьому у разі переміщення цілих зерен шлях зсуву проходить по їх межах, а при переміщеннях частин зерен шлях зсуву проходить по самих зернах.

В області малоциклової втоми III (див. рис. 10.1) пошкодження має проміжний – між квазістатичним і чисто втомним – характер. При цьому втомні механізми стають такими, що визначають при зменшенні напруження, тобто при підході до області III, тоді як при їх збільшенні, тобто при підході до області I, переважними стають механізми руйнування від великої пластичної деформації. Таку трансформацію механізмів руйнування можна бачити на зламах зразків (рис. 10.2).

Характер зламів, будучи типово втомним при $\sigma \rightarrow \sigma_R$, істотно змінюється, у міру зростання σ він переходить в малоцикловий, квазістатичний і – у межовому випадку руйнування при одноразовому статистичному навантаженні ($\sigma = \sigma_e$) – у статичний.

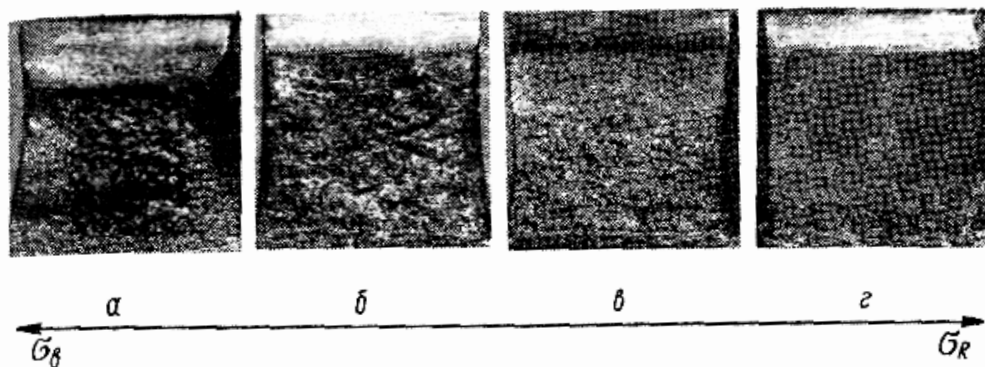


Рисунок 10.2. – Залежність характеру руйнування зразків від напруження:

a – $\sigma_B = 1120$ МПа, $N = 1/4$ цикл; б – $\sigma = 1050$ МПа, $N = 4 \cdot 10^5$ цикл; в – $\sigma = 450$ МПа, $N = 4,7 \cdot 10^5$ цикл; г – $\sigma = 280$ МПа, $N = 5 \cdot 10^6$ цикл

У міру збільшення рівня напруження зона розвитку тріщини втоми звужується і, отже, збільшується площа перерізу, що піддається доламуванню. На ділянці III у зламі виявляються і сліди

розвитку втомної тріщини, і сліди в'язкого руйнування, тобто руйнування має проміжний між чисто втомним і статичним зламами характер.

10.2. Стадії розвитку тріщин

Процес втоми в загальному випадку має дві стадії: стадію до зародження тріщини і стадію розвитку тріщини. Співвідношення тривалості цих стадій змінюється в широких межах залежно від рівня діючого напруження, схеми навантаження, розмірів і форми зразка, стану матеріалу тощо. У деяких випадках стадія розвитку видимої тріщини може становити 60–90 % загальної довговічності; для зразків із концентраторами напруження вона особливо тривала; цю стадію називають живучістю матеріалу.

Утомні тріщини з'являються в точці металу, де відношення місцевого напруження до межі витривалості металу найнижче. Зазвичай ці точки знаходяться на поверхні деталі. Такий процес не має раптового характеру, він складається з послідовного об'єднання сусідніх мікротріщин, зменшення числа мікротріщин, розмір яких збільшується, і прискорення зростання розмірів однієї з тріщин. Така тріщина називається скінченою, і саме вона призводить до втомного руйнування. Тому повне число циклів до руйнування становитиме

$$N = N_{TP} + N_C, \quad (10.1)$$

де N – число циклів до руйнування;

N_{TP} – число циклів на стадії зародження тріщин;

N_C – число циклів, необхідних для розвитку критичної тріщини.

Точніший вираз має вигляд

$$N = N_{TP} + N_T(N_{TP}) + N_C(N_T), \quad (10.2)$$

де N_{TP} – тривалість етапу виникнення тріщин, що залежить від кристалічної структури включень;

$N_T(N_{TP})$ – тривалість перехідного періоду, що залежить від етапу виникнення тріщини, геометрії і розмірів середнього напруження, навколишніх умов;

$N_C(N_T)$ – тривалість етапу поширення скінченної тріщини, що залежить від діапазону напруження, пружної і непружних характеристик матеріалу, геометрії зразка, навколишніх умов.

Перехідний період пов'язаний зі змінами мікроструктури, які мають дифузійний характер (наприклад, збіднення вуглецю в деформованих зонах сталі, накопичення цинку біля втомних тріщин в алюмінієво-цинкових сплавах).

Вираз (10.2) допустимо використовувати тільки для великих структур, коли в матеріалі є декілька значних початкових або виробничих дефектів, які при дії напруження розвиваються в тріщини значно швидше, ніж інші дефекти, або якщо конструктивні елементи підсилює локальне напруження, що призводить до швидкого росту тріщин. За вищезазначених умов у практичних розрахунках допустимо брати $N_{TP} \approx 0$, оскільки в цих випадках $N_{TP} \ll N_C$; $N_C = 0$.

Спрощені схеми для швидкості поширення тріщини дають теорії Гріффітса і Шенлі. Так, рівняння (9.10) описує поверхню, показану на рис. 10.3.

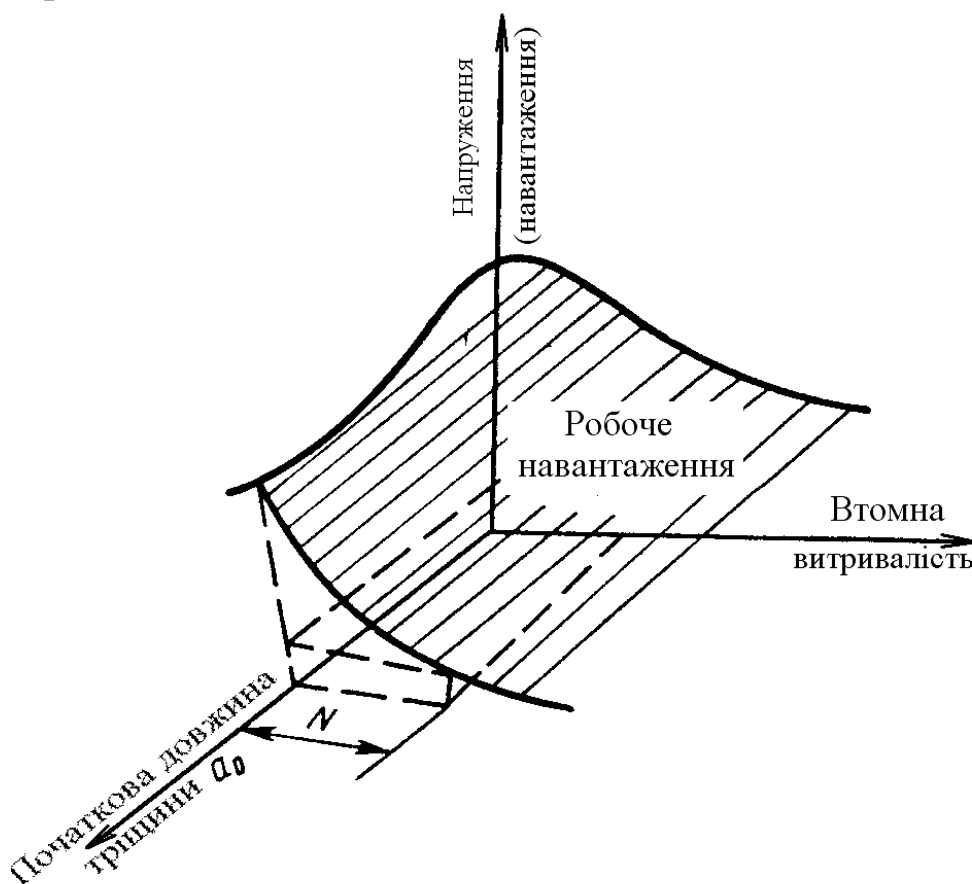


Рисунок 10.2 – Схематичне зображення кривих втоми з урахуванням початкової довжини тріщини a_0

ЛЕКЦІЯ 10

ТЕМА 10. Утомні руйнування (продовження)

10.3. Вид зламів під час руйнування деталей

Взагалі злами поділяють на дві великі групи: *крихкі та в'язкі*.

Під крихким зломом розуміють злам без ознак макроскопічних пластичних деформацій. Такий вид зламу виникає при руйнуванні в умовно пружній зоні деформації. Проте при цьому слід мати на увазі, що біля вершини крихкої тріщини, що поширюється, в металах виникає локальна пластична деформація. Крихке руйнування поширюється з великою швидкістю, порівняльною зі швидкістю поширення звуку в даному матеріалі.

Пластичному, або в'язкому, зламу передують макроскопічна пластична деформація, викликана зрушенням у площинах ковзання або площинах відколу і по межах зерен. Іноді виділяють *квазікрихке* (напівкрихке) руйнування, до якого відносять злами, при яких поперечне звуження гладкого зразка досягає порядку 5 %, а з надрізом – 2 %.

Волокнистий злам відносять до в'язкого руйнування. Він характерний тим, що площина зламу перпендикулярна до напрямку максимального розтягувального напруження. Залежно від прикладених навантажень злами поділяють на:

- динамічні;
- утомні;
- злами, викликані перевищенням межі міцності;
- злами при розтягуванні та вигині.

До динамічних належать злами, що відбуваються раптово під дією перевантажень або удару. Серед динамічних зламів слід розрізняти крихкі злами з грубозернистою поверхнею у матеріалів, що практично не деформуються, і гладкі злами від зрушення, що проходять по напрямку максимальної дотичного напруження і пов'язані зі значною пластичною деформацією.

Утомні злами мають ряд характерних ознак, що дозволяють їх відрізнити від інших видів зламу (рис.10.3).

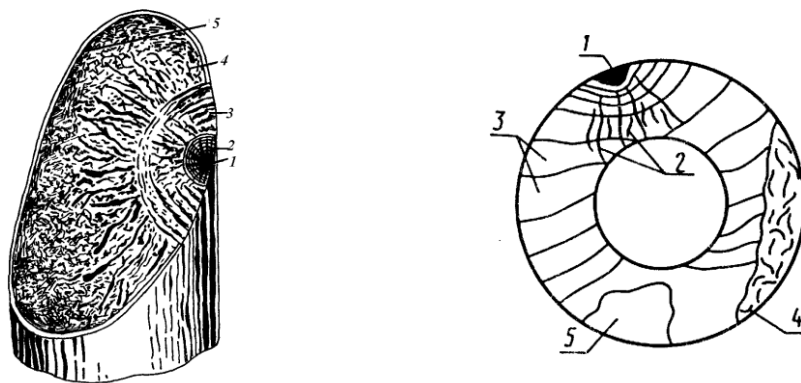


Рисунок 10.3. – Схема втомного зламу деталей:

1 – фокус зламу та осередок руйнування; 2 – вторинні сходинки і рубці; 3 – втомні лінії; 4 – зона прискороеного розвитку тріщин; 5 – зона доламування

Профіль зламу складається з *двох виразних областей*: одна – гладка і бархатиста – є *втомною зоною*; друга – грубошерста і кристалічна – є *зоною миттєвого руйнування*.

Перша область утворюється впродовж багатьох циклів. У результаті застосування змінних навантажень поверхні втомної тріщини згладжуються внаслідок тертя між двома поверхнями тріщини.

Як правило, на поверхні зламу можна розрізнити п'ять характерних зон.

1. Фокус зламу – мала локальна зона, близька до точки виникнення початкової макроскопічної тріщини втоми. Зазвичай фокус зламу розміщується на поверхні деталі в місцях концентрації напруження або поверхневих дефектів. Якщо в тілі деталей були внутрішні дефекти або деталі піддавалися поверхневому зміцненню, фокус зламу може розмішуватися всередині деталі.

2. Осередок руйнування – невелика зона, прилегла до фокуса зламу. При великому напруженні може бути декілька осередків руйнування. На поверхні зламу ця зона має найбільший блиск і гладкість. Втомні лінії на осередку руйнування, як правило, відсутні.

3. Ділянка вибірного розвитку відповідає зоні розвинутої тріщини втоми. У цій зоні видно характерні втомні лінії, руйнування, що хвилеподібно розходяться від вогнища. Форма втомних ліній залежить від форми деталі та характеру навантаження. Напрями розвитку тріщини можуть відхилятися від первинного. При цьому

утворюються зародки тріщин, що розвиваються в іншому напрямі, звані іноді пасинковими. Від їх злиття утворюються вторинні сходинокки і рубці.

4. *Ділянка прискореного розвитку тріщини* є перехідною зоною між ділянками втомного розвитку тріщини і зоною доламування. Ця зона утворюється впродовж декількох циклів, що передують остаточному руйнуванню.

5. *Зона доламування* характеризується ознаками макрокрихкого руйнування.

Середнє положення між динамічними і втомними зламами займають злами, викликані перевищенням межі міцності. Вони характеризуються великою поверхнею остаточного зламу, а також наявністю на поверхні зламу окремих ліній розвантаження або уступів, що проходять на великих відстанях.

Утомні злами при вигині поділяють на (рис. 10.4) :

- *односторонні;*
- *двосторонні;*
- *злами при коловому вигині.*

На рис. 10.4 показана якісна картина впливу методу навантаження, величини навантаження і концентрації напруження на вид зламу в сталевих деталях.

Вид навантаження	Немає концентрації напруження		Помірна концентрація напруження		Висока концентрація напруження	
	Перенапруження					
	низьке	високе	низьке	високе	низьке	високе
Однобічний вигин						
Двобічний вигин						
Вигин із крученням						

Рисунок 10.4. – Види зламів при втомних руйнуваннях від вигину (зони миттєвого руйнування заштриховані навхрест)

Іноді доцільно поділяти злами при вигині на *прості й складні*. До простих зазвичай відносять злами, які спричинюються однією тріщиною.

Простий злам починається в точці на (біля) поверхні внаслідок наявності окремих дефектів.

Складний злам відбувається в результаті дії двох або більше тріщин, які поширюються на різних точках на колі перерізу і надають сумісний ефект на вид зламу. Оскільки найчастіше початкові тріщини не знаходяться на одній площині перерізу, то поверхня зламу у перерізі зламів від різних тріщин утворює уступи.

Злам від зсуву при крученні може спостерігатися в деталях, виготовлених із в'язких матеріалів. Структура зламу рівна, гладка, з яскраво вираженим пластичним скручуванням. Уникнути цих видів зламу можна шляхом підвищення межі текучості.

Злами при скручуванні, викликані перевищенням межі міцності залежно від в'язкості матеріалу і форми валів, можуть проходити уподовж, упоперек, під кутом 45° або комбіновано. Поверхня зламу має волокнисту структуру.

На основі широкого застосування кінетичних діаграм утомного руйнування до сьогодні виконана величезна кількість робіт, присвячених вивченню *феноменології* і закономірностей зростання втомних тріщин у зв'язку з впливом умов навантаження, структури і властивостей матеріалів, геометрії виробів, дії навколишнього середовища тощо.

Проте внаслідок непередбачуваної мінливості властивостей конструкційного матеріалу на субмікроскопічному рівні неможливо обмежуватися під час його вибору тільки даними теоретичних досліджень. У зв'язку з цим великого поширення набули експериментальні методи оцінки фактичних характеристик металів, що складають основу феноменології втомної міцності.

ЛЕКЦІЯ 11

ТЕМА 11. Експериментальне визначення характеристик втомної міцності

Експериментальні методики визначення механічних властивостей розвиваються *у двох напрямках*:

- *значний розвиток методики випробувань зразків металу; при цьому основна увага приділяється проблемі вибору комплексу властивостей, необхідних і достатніх для оцінки службової придатності металевих матеріалів (оцінка конструктивної міцності);*

- *удосконалення методики безпосередньої оцінки придатності деталей шляхом випробування їх в умовах, що максимально наближаються до експлуатаційних за спектром навантаження, середовищем, температурними умовами і т. д.*

Метою експериментів є визначення параметрів утомної кривої, що характеризує поведінку матеріалу під впливом знакозмінного навантаження. Ці дані заносяться в довідники і є свого роду паспортними даними матеріалу, якими користується конструктор під час проектування нової машини.

11.1. Характеристика змінного навантаження

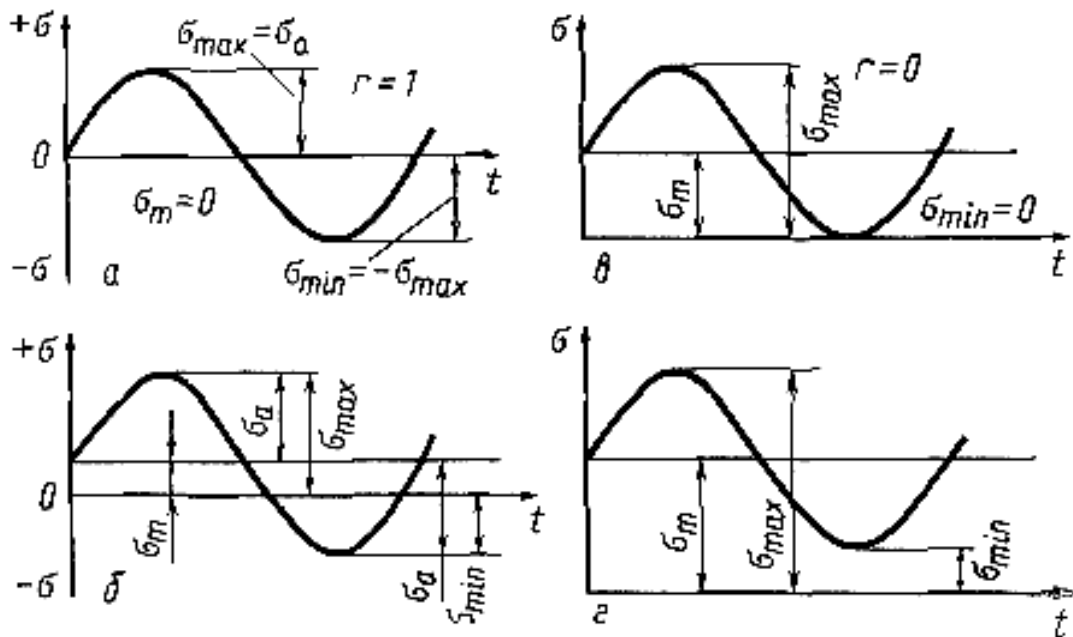
Цикл напруження – сукупність послідовних значень змінного напруження за один період процесу їх зміни.

Період циклу T , с, – час одного циклу напруження.

Максимальне напруження циклу σ_{max} , МПа, – найбільше за алгебраїчною величиною напруження циклу, що дорівнює алгебраїчній сумі середнього напруження циклу та амплітуди.

Мінімальне напруження циклу σ_{min} , МПа, – найменше за алгебраїчною величиною напруження циклу, що дорівнює алгебраїчній різниці середнього напруження циклу та амплітуди.

Середнє напруження циклу σ_m , МПа, – статична (позитивна або негативна) складова циклу напруження, що дорівнює алгебраїчній напівсумі максимального і мінімального напруження циклу.



а – симетричний; б – асиметричний знаковзмінний;
 в – пульсуючий; г – асиметричний знакопостійний;
 Рисунок 11.1 – Цикли зміни напруження в часі

Амплітуда напруження циклу σ_a , МПа, – найбільше (позитивне) значення змінної складової циклу напруження, що дорівнює алгебраїчній напіввізніці максимального і мінімального напруження циклу.

Розмах напруження циклу $2 \cdot \sigma_a$, МПа, – алгебраїчна різниця максимального і мінімального напруження циклу, що дорівнює подвоєній амплітуді.

Коефіцієнт асиметрії циклу R – характеристика ступеня асиметрії циклу, що дорівнює відношенню мінімального напруження до максимального (із знаком).

Симетричний цикл напруження – цикл, у якого максимальне і мінімальне напруження однакові за величиною, але протилежні за знаком.

Асиметричний цикл – цикл, у якого максимальне і мінімальне напруження мають різну абсолютну величину.

Знакозмінний цикл – цикл напруження, що змінюється за величиною і знаком.

Знакопостійний цикл – цикл напруження, що змінюється тільки за величиною.

Віднульовий (пульсуючий) цикл – знакопостійний цикл напруження, що змінюється від нуля до максимуму або від нуля до мінімуму.

База випробувань (базове число циклів) N_w – заздалегідь задане число циклів напруження, до якого зразки випробовують на втому.

Частота навантаження f , Гц; s^{-1} , – число змін циклів напруження за одиницю часу.

Номінальне напруження σ_n , МПа, – напруження, обчислене за формулами опору матеріалів без урахування концентрації напруження, залишкового напруження і перерозподілу напруження в процесі деформації (при вигині $\sigma = M_u / W_{oc}$, при крученні $\tau = M_k / W_p$, при розтягуванні-стисненні $\sigma = P/F$).

11.2. Характеристики граничних станів, виду навантаження і форми циклу

Утомна довговічність N , цикли, – характеристика витривалості металів при напруженні, вищому за межу витривалості, до утворення тріщини заданої протяжності N_T або до остаточного руйнування N .

Витривалість – здатність металу протистояти втомі.

Межа витривалості (межа втоми) σ_R , МПа, – величина максимального напруження циклу з асиметрією R , відповідна заданій довговічності (фізична межа витривалості позначається на кривих втоми горизонтальною ділянкою; умовна – асимптотичним наближенням до горизонтальної ділянки).

Межа витривалості при симетричному циклі σ_{-1} МПа, – межа витривалості за умови, коли $\sigma_{max} = \sigma_{min}$, але протилежні за знаком.

При випробуваннях на втому є два види навантаження, що істотно різняться між собою:

- **м'яке навантаження** (навантаження із заданим розмахом навантаження), при якому заданою величиною є навантаження, постійне впродовж усього випробування. У цьому випадку переміщення кінематично необмежене і може змінюватися залежно від зміни жорсткості навантажуваної системи в період наростання втомних пошкоджень і поступового розвитку втомної тріщини;

- **жорстке навантаження** (навантаження із заданим розмахом деформації), при якому заданою величиною є кінематично обмежене переміщення, постійне впродовж усього випробування, включаючи період зменшення жорсткості зразка при розвитку тріщин утоми. При жорсткому навантаженні зусилля змінюється залежно від зміни жорсткості навантажувальної системи.

11.3. Форма циклу і коефіцієнт його асиметрії

Форма циклу (синусоїдальна, загострена, трапецієподібна) визначає тривалість витримки при максимальному напруженні. Форма циклу значно впливає на довговічність до появи тріщин, але менше на живучість і загальну довговічність, якщо вона залежить від живучості.

Коефіцієнт асиметрії R циклу при випробуванні вибирають з аналізу фактичної асиметрії циклу в експлуатаційних умовах.

Чутливість втомної міцності металу до асиметрії циклу характеризує коефіцієнт $\psi_\sigma = (2\sigma_{-1} - \sigma_0) / \sigma_0$. Значення коефіцієнтів ψ_σ зазвичай знаходяться в межах від 0,1 до 0,2 для вуглецевих сталей і від 0,2 до 0,3 для легованих сталей (при крученні значення ψ відповідно дорівнюють 0,0-0,1 і 0,1-0,15).

Для зіставлення амплітуди асиметричного циклу з межею витривалості σ_{-1} при симетричному циклі найчастіше використовується така залежність, що є рівнянням прямої

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \cdot \sigma_m .$$

Як бачимо, порушення симетрії циклу приводить до зменшення амплітуди напруження, яке може витримати деталь за умови, що число циклів навантаження щодо симетричного навантаження залишається незмінним.

ЛЕКЦІЯ 12

ТЕМА 11. Експериментальне визначення характеристик втомної міцності (продовження)

11.4. Види кривих втоми

Результати втомних випробувань подають у вигляді залежності між напруженням і числом циклів N до руйнування. Графіки цих залежностей частіше за все зображують у вигляді кривих втоми в логарифмічній ($\lg\sigma - \lg N$) (рис.11.2) і напівлогарифмічній ($\sigma - \lg N$) (рис. 11.2) системах координат. Відповідно використовуються такі рівняння для похилих ділянок кривих втоми в логарифмічних

$$\sigma_a^m N = \sigma_{-1}^m N_0 \quad (11.1)$$

і напівлогарифмічних координатах:

$$\sigma_a + K \lg N = \sigma_{-1} + K \lg N_0. \quad (11.2)$$

Основними параметрами (характеристиками) кривих втоми є межа витривалості σ_{-1} і кути нахилу β (параметр $m = \text{ctg}\beta$) або α (параметр $K = \text{tg}\alpha$) кривих втоми, побудованих відповідно в напівлогарифмічних або логарифмічних координатах, а також число циклів N_0 , відповідне точці перелому кривої втоми.

Правомірність побудови в обох системах координат однакова. При переході з однієї системи координат в іншу відбувається викривлення кривої втоми. Тому однозначному зв'язку між параметрами, що характеризують кути нахилу кривих втоми у двох системах координат, отримати неможливо. Враховуючи, що накопичені значні дані з параметра, що визначає кут нахилу кривої втоми в напівлогарифмічних координатах, розглянемо метод переходу від цих координат до логарифмічних координат.

Параметри, що характеризують кути нахилу кривих втоми, визначають за такими формулами:

- для логарифмічних координат

$$m = \text{ctg}\beta = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg \sigma_2 - \lg \sigma_1} = \frac{\lg N_0 - \lg N_i}{\lg \sigma_i - \lg \sigma_{-1}}, \quad (11.3)$$

- для напівлогарифмічних координат

$$K = \text{tga} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\lg N_1 - \lg N_2} = \frac{\sigma_i - \sigma_{-1}}{\lg N_0 - \lg N_i}. \quad (11.4)$$

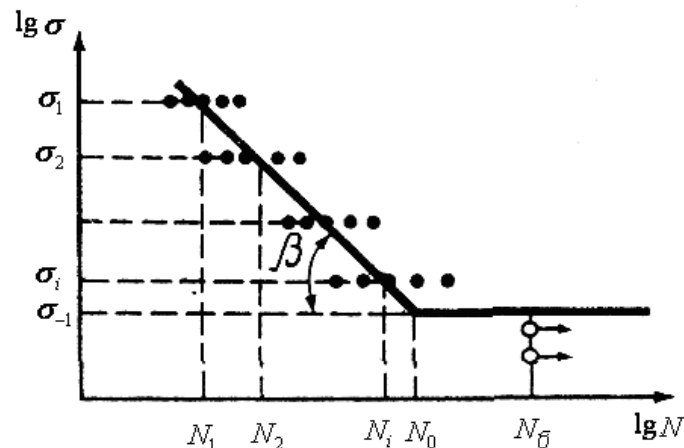


Рисунок 11.2 – Графік втоми в логарифмічних координатах і її характеристики, використовувані при розрахунку деталей

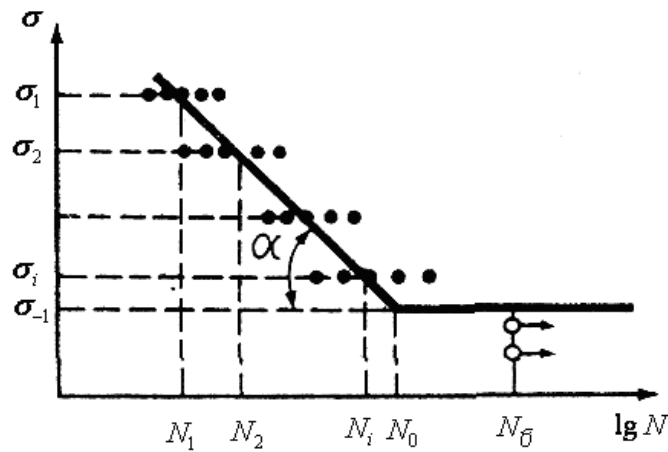


Рисунок 11.3 – Графік утоми в напівлогарифмічних координатах і її характеристики, використовувані при розрахунку деталей

Якщо перемножити (11.3) на (11.4), то

$$m \cdot K = \frac{\sigma_i - \sigma_{-1}}{\lg \sigma_i - \lg \sigma_{-1}}. \quad (11.5)$$

Позначивши базу за числом циклів N , для якої визначають параметри m і K через

$$\lambda = \lg N_0 - \lg N_i, \quad (11.6)$$

а відношення σ_{-1} і K через

$$\eta = \sigma_{-1} / K, \quad (11.7)$$

з (11.5) випливає, що

$$\sigma_i = \sigma_{-1} + \lambda_i \cdot K. \quad (11.8)$$

Тоді на основі залежностей (11.5) – (11.8) після перетворень

$$m = \frac{\sigma_i - \sigma_{-1}}{K \cdot (\lg \sigma_i - \lg \sigma_{-1})} = \frac{\lambda_i}{\lg(1 + \lambda_i / \eta)}. \quad (11.9)$$

Таким чином, при переході від кривих утоми в напівлогарифмічних координатах до кривих утоми в логарифмічних координатах параметр $m = \operatorname{ctg} \beta$ залежить від σ_{-1} . При сталій базі λ величина m залежить тільки від η .

Для конструкційних сталей m зазвичай знаходиться в межах від 4 до 12. При цьому верхнє значення відповідає гладким зразкам для матеріалу, що характеризується відношенням $\sigma_{-1}/\sigma_B = 0,5$, а менше відповідає діаметрам 50 мм і відношенню $\sigma_{-1}/\sigma_B = 0,3$. За наявності концентрації напруження та асиметрії циклу значення m зменшуються. При цьому в розрахунках деталей беруть значення $m = 9$.

Деякі значення параметрів m і N_o при вигині для конструкційних сталей наведені в табл. 3.5 [1].

За наявності експериментальних даних для деталей і подібних до них моделей величини m і N_o потрібно визначати безпосередньо за кривими втоми.

11.5 . Малоциклова втома

Малоциклове ($N < 10^4$ циклів) навантаження на сьогодні описують рівнянням (11.10), авторами якого є Менсон і Коффін. Рівняння встановлює зв'язок між амплітудою деформації і числом циклів до руйнування, оскільки напруження при малоцикловій утомі знаходиться в зоні текучості і тому практично не змінюється:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{1}{1 - \psi_B} \cdot N^{-m_1} + \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (11.10)$$

де ε_a — амплітуда деформації;

ψ_B — відносне звуження, що відповідає досягненню межі міцності σ_B ;

m_1 — показник ступеня, що залежить від відношення $\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_B}$
($m_1 = 0.1 - 0.85$);

$$\psi_B = \frac{\Delta F}{F_0},$$

де ΔF — зміна площі поперечного перерізу деталі при її пластичній деформації;

F_0 — початкова (номінальна) площа перерізу деталі.

Випробування на малоциклову втому проводять у більшості випадків при малих частотах в інтервалі 1-10 циклів за хвилину на базі 10^3 — 10^5 циклів.

Для порівняння графічне зображення кривої втоми в координатах $\lg \sigma - \lg N$ і $\lg \varepsilon - \lg N$ у діапазоні $10 - 10^5$ циклів подане на рис. 11.4. Руйнування при дії змінної напруження на ділянці AB має статичний характер, тобто такий самий, як і при одноразовому руйнуванні: з утворенням шийки і вичерпанням всієї пластичності матеріалу. При випробуванні гладких зразків ділянка AB тягнеться до 10^3 — 10^5 циклів, а гостро надрізаних — до $10^2 - 10^4$ циклів. На ділянці BC характер руйнування змінюється: зі збільшенням числа циклів і зниженням амплітудного напруження макропластична

деформація поступово зменшується і зникає, а руйнування стає типово втомним, тобто відбувається в результаті утворення і поширення втомної тріщини.

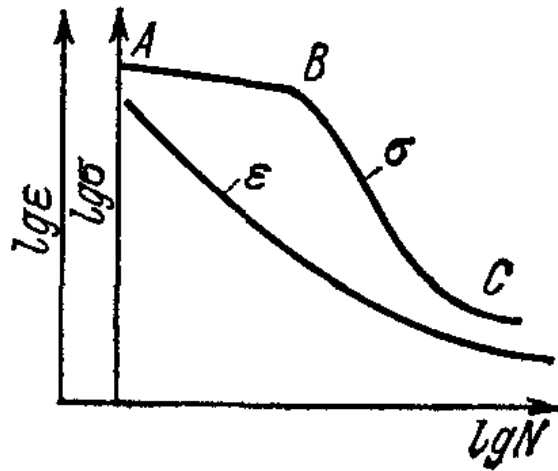


Рисунок 11.4– Графіки малоциклової втоми в координатах $\lg \sigma - \lg N$ і $\lg \varepsilon - \lg N$

У табл. 3.7 [1] наведені експериментально визначені механічні властивості поширених вуглецевих сталей.

Проте розглянуті вище рівняння отримані емпіричним шляхом на основі феноменологічного аналізу поведінки металів при циклічних навантаженнях, що є їх певним недоліком. Про це, зокрема, свідчить значна кількість рівнянь, запропонованих різними авторами для опису втомних кривих.

Один із шляхів отримання більш обґрунтованого опису часової залежності для міцності запропонував С. М. Журков.

11.6. Процес механічного руйнування твердих тіл за Журковим С. М.

Журков С. М., ґрунтуючись на сучасних положеннях теорії фізики твердого тіла, розглядав процес руйнування матеріалу як поступовий кінетичний термоактиваційний процес, що розвивається в механічно напруженому матеріалі з моменту додавання навантаження будь-якої величини.

С. М. Журковим експериментально отримана така залежність між напруженням σ , температурою T і ресурсом τ , тобто часом від моменту додавання постійного механічного навантаження до руйнування зразка:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right), \quad (11.11)$$

де R – універсальна газова стала, що дорівнює роботі розширення 1 моля ідеального газу при сталому тиску при нагріванні на 1° ($R = 8.31$ Дж / (моль К) або 1.9865 Кал / (моль К) ;

U_0 – початкова енергія активації процесу руйнування при $\sigma = 0$, стала для даного матеріалу в широкій області температур і не залежить від обробки матеріалу в ккал/моль;

$(U_0 - \gamma \cdot \sigma)$ – енергія активації руйнування в ккал/моль;

τ_0 – параметр, що збігається за значенням з періодом власних теплових коливань атомів у кристалічній решітці твердого тіла

($\tau_0 = 10^{-12}, \dots, 10^{-14}$) , сталий для всіх матеріалів і незалежний від обробки матеріалу і умов навантаження;

γ – характеристика чутливості матеріалу до напруження в одиницях об'єму;

τ – напрацювання в секундах;

T – абсолютна температура в градусах Кельвіна.

З формули (11.11) видно, що при зменшенні температури до нуля час руйнування збільшується до нескінченності. Це означає, що руйнування при навантаженнях нижче критичних не може відбуватися за відсутності теплового руху атомів. Механізм руйнування і довговічність матеріалу визначаються поступовим накопиченням локальних дефектів – деформацій і тріщин у матеріалі.

Кінетична теорія міцності підкреслює необхідність урахування впливу теплового руху (флуктуації теплової енергії) на процеси деформації і руйнування, особливо в їх початковій стадії. Процес руйнування при навантаженнях нижче критичного не може відбуватися за відсутності теплового руху атомів і молекул, який є чинником, що принципово обумовлює розрив матеріалу при навантаженнях, менших за критичне.

На підставі рівняння (11.11) можна зробити висновок, що руйнування потрібно розглядати як процес, в якому внаслідок теплових флуктуацій долається енергетичний бар'єр U_0 , знижений у результаті дії напруження на величину $\gamma \cdot \sigma$. При цьому фізичний сенс величин, що входять до рівняння (11.11), збіг величини τ_0 з періодом

атомних коливань показують, що процесом руйнування є ряд елементарних актів, пов'язаних із тепловим рухом атомів і молекул.

Рівняння Журкова (11.11) тісно пов'язане з рівнянням кривої втоми (11.2). Від рівняння (11.11) можна перейти до рівняння (11.2), якщо як часовий параметр розглядати число циклів N , а рівняння (11.11) записати для випадку навантаження на довільному рівні навантаження (σ, N) та рівні i числі циклів, що відповідають умовній межі втоми (σ_{-1}, N_0) , й узяти відношення цих рівнянь, щоб позбавитися параметрів τ_0 і U_0 :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(\frac{1}{k}(\sigma_{-1} - \sigma)\right),$$

де $k = \frac{RT}{\gamma}$.

Прологарифмувавши ліву і праву частини цього виразу, знов отримаємо формулу (11.2):

$$k \cdot [\ln(N) - \ln(N_0)] = \sigma_{-1} - \sigma. \quad (11.12)$$

Отже, збігаються і графіки цих функцій.

ЛЕКЦІЯ 13

ТЕМА 12. Часова залежність міцності

12.1. Повзучість

Повзучість – це явище, що полягає в тому, що метал, навантажений при високій температурі, безперервно деформується під впливом сталого в часі напруження.

Опірність повзучості оцінюється сумарною деформацією за термін служби або швидкістю повзучості $\nu = \frac{d\varepsilon}{d\tau}$. Умовною межею повзучості називається напруження, що викликає при певній температурі задану швидкість повзучості в другій стадії процесу.

Для пояснення процесу повзучості існує декілька теорій. Якнайкраще наближення до експериментальних даних дає теорія *наклепу і рекристалізації*.

Повзучість – наочний прояв часової залежності міцності. Нижче розглянуті основні положення цієї залежності.

12.1.1. Первинна крива повзучості та її отримання

Основні характеристики повзучості для конструкційних матеріалів зазвичай отримують при випробуванні призматичних (циліндрових) зразків на розтягування при постійному навантаженні P . Під час випробувань вимірюють подовження зразка на базі l залежно від часу t , вимірюваного від моменту навантаження. Температуру T при випробуванні підтримують постійною. У результаті випробувань партії зразків при різному початковому напруженні $\sigma = P/F_0$ й однаковій температурі отримують серію первинних кривих повзучості (рис. 12.1).

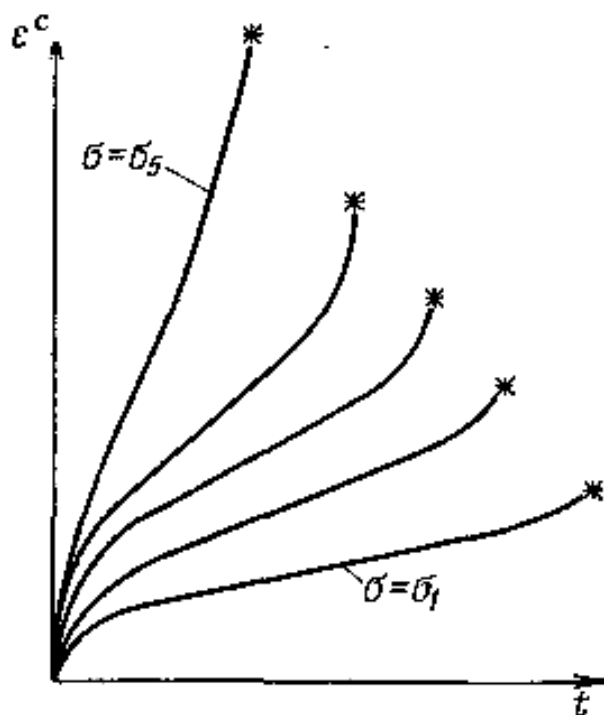


Рисунок 12.1 – Первинна крива повзучості

Якщо випробування кожного зразка вдається довести до його руйнування, то одночасно отримують і характеристики тривалої міцності (зірочками відмічені моменти руйнування). Зазвичай первинна крива повзучості визначається для декількох значень температури T .

12.1.2. Силова деформація і стадії повзучості

Силовою деформацією називається різниця між повною і температурною деформаціями. Відносну силову деформацію $\epsilon = \Delta l/l_0$ можна записати у вигляді

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c, \quad (12.1)$$

де $\varepsilon^e = \sigma/E$ – пружна деформація, що виникає в момент навантаження;

ε^p – пластична деформація (короткочасна), яка також виникає у момент навантаження, якщо напруження перевищує межу пружності матеріалу;

ε^c – деформація повзучості.

Перші дві деформації, що виникають, розглянуто раніше. Залежність третьої складової ε^c від часу має зазвичай три характерні ділянки (рис. 12.2), що відповідають першій *I*, другій *II* і третій *III* стадіям повзучості.

На першій стадії повзучість відбувається зі швидкістю, що зменшується $\dot{\varepsilon}^c = d\varepsilon^c/dt$, що прямує в кінці періоду до деякого граничного значення $\dot{\varepsilon}^c \rightarrow v$. Друга стадія *II* характеризується сталою швидкістю повзучості $\dot{\varepsilon}^c = v$. Нарешті, на третій стадії швидкість повзучості починає зростати до моменту руйнування $t = t_p$ (стан руйнування відмічений зірочкою). На першій і другій стадіях деформація зразка рівномірно розподілена по його довжині, площа поперечного перерізу мало відрізняється від початкового значення.

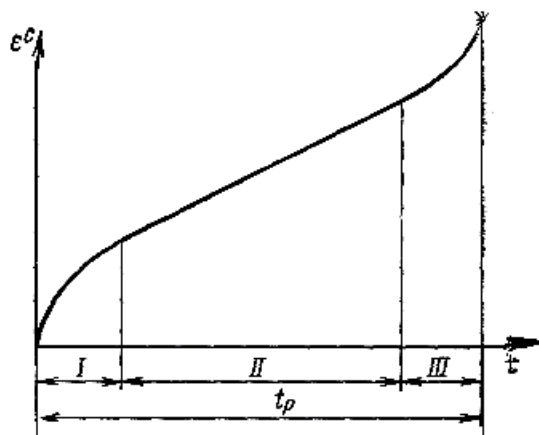


Рисунок 12.2 – Крива повзучості

На третій стадії повзучості зазвичай (але не завжди) утворюється місцеве стоншування (шийка) аналогічно короткочасній деформації. При утворенні шийки третя стадія проходить при напруженні, що збільшується, оскільки випробування проводяться при постійному навантаженні P , а площа перерізу зразка зменшується

з розвитком шийки. Друга можлива причина збільшення швидкості повзучості на третій стадії – поява мікротріщин, їх підростання, злиття і поширення на весь переріз зразка.

12.2. Аналітичні вирази для кривих повзучості

Для аналітичного зображення кривих повзучості користуються емпіричними залежностями, що зв'язують деформацію повзучості з основними параметрами (часом, напруженням і температурою):

$$\varepsilon^c = f(t, \sigma, T). \quad (12.2)$$

З численних залежностей вигляду (3.51) розглянемо найбільш поширену:

$$\varepsilon^c = v\Omega(t), \quad (12.3)$$

$$v = A\sigma^n, \quad (12.4)$$

$$\Omega(t) = a(1 - e^{-pt}) + t, \quad (12.5)$$

де v – швидкість повзучості на стадії II;

σ – напруження, при якому проводять випробування;

A, n – параметри, що залежать тільки від температури T ;

a, p – параметри, що залежать від σ і T .

Прогнозування деформацій повзучості і є першим основним призначенням екстраполяційних формул (12.2) – (12.5). Друге їх призначення – використання в розрахунках на повзучість деталей машин. Аналітичне зображення в цьому випадку має переваги перед табличним або графічним зображенням.

12.3. Гіпотези повзучості

У разі одновісного напруженого стану загальна гіпотеза повзучості виражається співвідношенням, що описує в диференціальній формі поведінку матеріалу при довільній програмі навантаження, тобто при заданому довільному законі зміни напруження σ і температури T в часі:

$$\dot{\varepsilon}^c = f(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (12.6)$$

де q_1, q_2, \dots, q_n – структурні параметри.

Вибір структурних параметрів визначається відповідністю прогнозів гіпотези (12.6) експериментальним даним. Розглянемо деякі часткові гіпотези повзучості, що впливають з (12.6).

12.3.1. Гіпотеза старіння

Ця гіпотеза припускає справедливість кінцевого співвідношення вигляду (12.2), наприклад, у формі (12.3), не тільки при $\sigma(t) = const$, але і при довільному $\sigma(t)$, тобто

$$\dot{\varepsilon}^c = A\sigma^n\Omega(t). \quad (12.7)$$

При плавній і невеликій зміні $\sigma(t)$ гіпотеза дає достовірні результати. Проте гіпотеза суперечлива і при деяких програмах зміни $\sigma(t)$ призводить до недостовірних результатів. Наприклад, при поступовому зниженні $\sigma(t)$ до нуля зразок подовжується внаслідок повзучості.

12.3.2. Гіпотеза течії

Гіпотеза виражається співвідношенням

$$\varepsilon^c = f(\sigma, T, t)$$

або в окремому випадку

$$\varepsilon^c = A\sigma^n\dot{\Omega}(t), \quad (12.8)$$

де $\dot{\Omega}(t) = \frac{\partial\Omega}{\partial t}$.

Вона впливає з (12.2) при $q_1 = t, q_2 = \dots q_n = 0$ (A і n залежать від T).

Використовуючи (12.5), отримуємо

$$\Omega(t) = 1 + ape^{-pt}. \quad (12.9)$$

У співвідношення (12.8) час t входить як параметр, тобто передбачається, що властивості матеріалу змінюються з часом, звідси і назва «гіпотеза старіння». По суті, гіпотеза течії (12.9) за цією ознакою також є варіантом гіпотези старіння.

12.3.3. Гіпотеза зміцнення

Вважаючи в (12.6), що $q_1 = \varepsilon^c, q_2 = q_3 = \dots q_n = 0$, отримаємо рівняння гіпотези зміцнення

$$\varepsilon^c = f(\sigma, T, \varepsilon^c) . \quad (12.10)$$

Найбільш проста форма рівняння гіпотези зміцнення

$$\dot{\varepsilon}^c (\varepsilon^c)^a = M \sigma^\beta, \quad (12.11)$$

де M, a, β – параметри, що залежать від температури. Вибір структурного параметра ε^c означає допущення, що головним чинником, який впливає на властивості матеріалу при повзучості, є накопичена до даного моменту деформація повзучості, що зміцнює матеріал, звідси і назва «гіпотеза зміцнення».

ЛЕКЦІЯ 14

ТЕМА 12. Часова залежність міцності (продовження)

12.4. Віброповзучість і віброрелаксація

Під віброповзучістю розуміють явище збільшення деформації $\varepsilon(t)$ при комбінованій дії постійного і змінного за рівнем напруження. При цьому у багатьох випадках спостерігається прискорення процесу повзучості. На рис. 12.3а показана програма навантаження.

При $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ спостерігається повзучість, яка зображується на рис. 12.3б кривою 1. Додавання знакозмінної складової $\sigma_a \sin \omega t$ приводить до того, що середнє значення деформації (див. криву 2 на рис. 12.3б) у тих самих точках за часом більше, ніж при σ_0 .

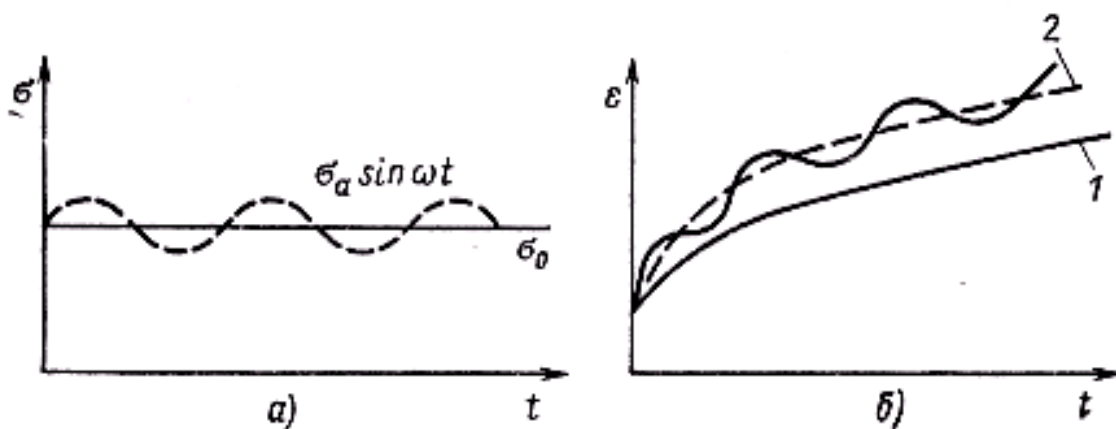


Рисунок 12.3 – Віброповзучість:

a – програма навантаження; b – зміна деформації в часі

1 – при $\sigma_0 = \text{const}$; 2 – при $\sigma = \sigma_0 + \sigma_a \sin \omega t$

Релаксацію напруження спостерігають вимірюючи напругу (крива 1 на рис. 12.4б) при сталій деформації ε_0 . Накладаючи на середнє значення симетричні коливання (наприклад, $\varepsilon_a \sin \omega t$, рис. 12.4 а), спостерігають інтенсивнішу релаксацію середнього значення напруження (крива 2 на рис. 12.4б).

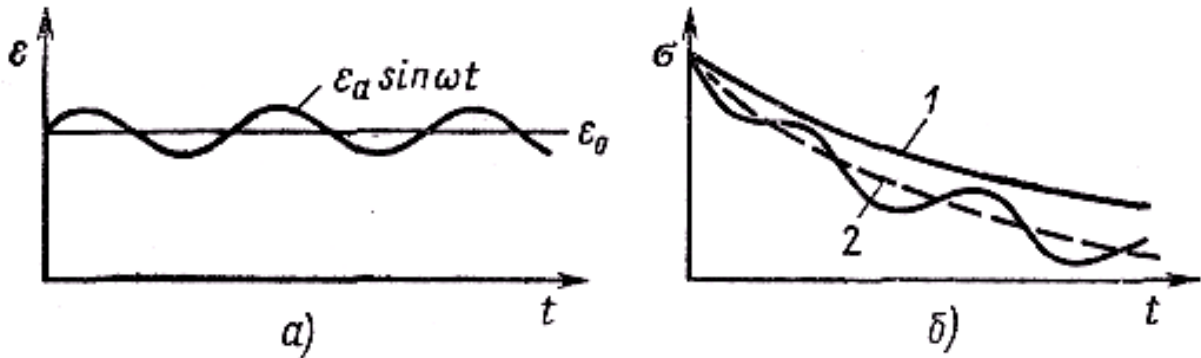


Рисунок 12.4 – Віброрелаксація напруження:
 а – програма навантаження; б – зміна напруження в часі:
 1 – при $\varepsilon_0 = const$; 2 – при $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_a \sin \omega t$

Найчастіше віброповзучість і віброрелаксацію пояснюють змінами властивостей матеріалу під впливом вібрації. Це зв'язують у феноменологічних моделях із елементами, що враховують розсіяння енергії, - або просто постулюють, що коефіцієнт в'язкого елемента залежить від інтенсивності коливань, або, базуючись на понятті псевдозрідження (зменшення коефіцієнта тертя в сипких матеріалах), пояснюють ці ефекти на основі елемента типу сухого тертя.

Деякі фахівці вважають, що віброрелаксація і віброповзучість є наслідком саморозігріву, оскільки повзучість і релаксація проходять значно активніше при підвищених температурах. Проте повне експериментальне підтвердження такої кореляції до сьогоднішнього дня відсутнє.

12.5. Непружні явища при коливаннях

Якщо тіло володіє ідеальною пружністю, коливання напруження і деформацій збігаються за фазою (рис. 12.5а); графічне зображення залежності $\sigma = f(\varepsilon)$ в межах кожного циклу коливань має вигляд прямої.

Щоб з'ясувати поведінку реальних тіл, розглянемо, наприклад, подовжні коливання стрижня. Для цього розтягнутий стрижень розвантажимо і знову навантажимо до колишнього рівня. Область розвантаження і повторного навантаження в координатах σ , ϵ не збігаються, вийде замкнута петля гістерезису (рис.12.5б), яка свідчить про незворотні процеси.

Площа петлі еквівалентна роботі, витраченій на ці незворотні процеси, основною з яких є мікропластична деформація в локальних областях. При повторних циклах гістерезисна петля відтворюватиметься.

Таким чином, у реальних тілах за наявності пластичних зрушень в окремих зернах частина механічної енергії коливань незворотно перетворюватиметься на теплоту. Періодично змінні деформації при цьому не збігатимуться за фазою з напруженням (зрушення на величину φ на рис. 12.5б). Якщо в тілі збуджені власні коливання (джерело збудження відключене), коливання згасатимуть в часі не тільки внаслідок зовнішнього тертя, але й унаслідок зазначених вище непружних процесів, що проходять в самих металах і їх з'єднаннях. За аналогією із зовнішнім тертям дія внутрішніх непружних процесів названа внутрішнім тертям.

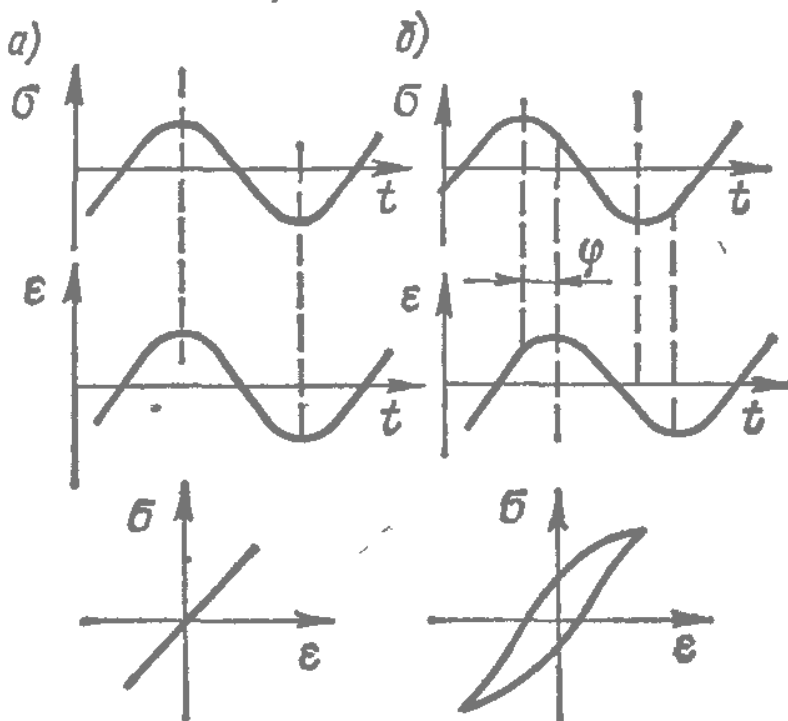


Рисунок 12.5 – Коливання тіла з ідеальною а) і неідеальною (реальною) б) пружністю

Здатність металів поглинати енергію пружних коливань і внаслідок цього їх гасити має величезне практичне значення. Ця здатність зменшує небезпеку втомного руйнування, коли в умовах виникнення резонансних коливань вона запобігає зростанню амплітуди коливань, наприклад, у турбінних лопатках. Внутрішнє тертя в металах при коливаннях можна вимірювати.

Як міру внутрішнього тертя беруть логарифмічний декремент коливання

$$\delta = \ln(a_1 / a_2), \quad (12.12)$$

де a_1 і a_2 — амплітуди двох сусідніх згасаючих коливань.

Практично декремент визначається амплітудами a_0 і a_n через n періодів коливань і виражається за формулою

$$\delta = \frac{1}{n} \ln(a_1 / a_2). \quad (12.13)$$

ЛЕКЦІЯ 15

ТЕМА 13. Прогнозування надійності

13.1. Основні поняття теорії надійності

Надійність — це складне поняття, що об'єднує ряд властивостей об'єкта, пов'язаних із якістю виконання ним певних функцій впродовж заданого часу. В техніці надійність має цілком конкретне значення. Вона не тільки може бути точно визначена, але й розрахована, об'єктивно оцінена, зміряна і випробувана.

Показник надійності — кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що становлять надійність об'єкта.

Справність - стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам, установленим нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією.

Несправність - стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній із вимог нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Працездатність - стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції,

відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Непрацездатність – полягання об'єкта, при якому значення хоча б одного заданого параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Якість – сукупність властивостей об'єкта, що обумовлюють його придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення.

Надійність є доданком якості й обумовлюється безвідмовністю, ремонтпридатністю, зберіганням і довговічністю. Вона визначається досконалістю конструкції і технологій виготовлення, багато в чому залежить від умов експлуатації і ремонту.

Безвідмовність – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан упродовж деякого часу або деякого напрацювання.

Збереженість – властивість об'єкта зберігати значення показників безвідмовності", довговічності та ремонтпридатності впродовж зберігання (або), транспортування і після них.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Граничний стан – стан об'єкта, при якому його подальше вживання за призначенням неприпустимо або недоцільно, або відновлення його справного або працездатного стану неможливе або недоцільне.

Напрацювання – тривалість або обсяг роботи об'єкта.

Гарантійне напрацювання – напрацювання об'єкта, до завершення якого виготовник гарантує і забезпечує виконання певних вимог до об'єкта за умови дотримання споживачем правил експлуатації, у тому числі правил зберігання і транспортування.

Строк служби – календарна тривалість експлуатації об'єкта від її початку або відновлення після ремонту певного типу до переходу в граничний стан.

Гамма-відсотковий строк служби – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкта, впродовж якої він не досягає граничного стану із заданою ймовірністю у відсотках.

Середній строк служби — математичне сподівання терміну служби.

Надійність виробу визначається його безвідмовністю і довговічністю.

Безвідмовність розглядають як самостійну безперервну роботу виробу без яких-небудь втручань для підтримки працездатності.

Під **довговічністю** виробу, навпаки, слід розуміти роботу виробу за весь період його експлуатації, враховуючи, що тривала робота виробу неможлива без ремонтних і профілактичних заходів, поновлювальна працездатність втрачається в процесі експлуатації.

13.2. Загальні залежності

Істотне розсіювання основних параметрів надійності зумовлює необхідність розглядати її в імовірнісному аспекті.

Розглянемо проведені для оцінки надійності випробування або експлуатацію значного числа N елементів упродовж часу t (або напрацювання в інших одиницях). Нехай до кінця випробування або строку експлуатації залишиться N_p працездатних (невідмовних) елементів і n відмовних.

Тоді відносна кількість відмов $Q(t) = n/N$.

Якщо випробування проводиться як вибіркове, то $Q(t)$ можна розглядати як статистичну оцінку ймовірності відмови або, якщо N завелике, як імовірність відмови.

Ймовірність безвідмовної роботи оцінюється відносною кількістю працездатних елементів

$$P(t) = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{n}{N}.$$

Оскільки безвідмовна робота і відмова – взаємно протилежні події, то сума їх ймовірностей дорівнює 1:

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

При $t=0$, $n=0$, $Q(t)=0$ і $P(t)=1$.

При $t=\infty$, $n=N$, $Q(t)=1$ і $P(t)=0$.

Розподіл відмов за часом характеризується функцією щільності розподілу напрацювання $f(t)$ до відмови. У статистичному трактуванні

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} \text{ в імовірнісному}$$

трактуванні $f(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$. Тут Δt і $\Delta Q(t)$ – приріст числа відмов об'єктів і відповідно вірогідності відмов за час Δt . Імовірність відмов і безвідмовної роботи в функції щільності $f(t)$ виражаються залежностями

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt; \text{ при } t = \infty \quad Q(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1;$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt.$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ на відміну від щільності розподілу належить до об'єктів N_p , що залишилися працездатними, а не до загальної кількості об'єктів. Відповідно у статистичному трактуванні

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_p \Delta t}$$

і в імовірнісному трактуванні, враховуючи, що $N_p / N = P(t)$,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – міра схильності елементів до відмов залежно від часу, $\lambda(t)$ – середнє число відмов в одиницю часу t .

Графік зміни інтенсивності відмов в експлуатації для більшості елементів машин має вигляд:

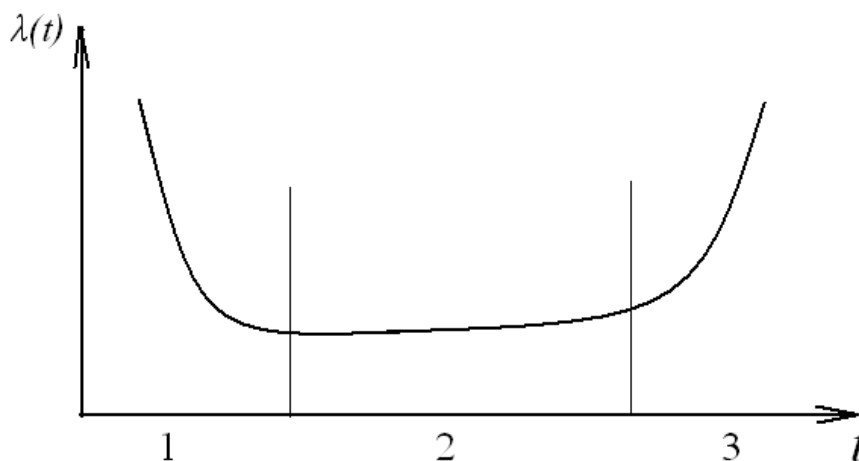


Рисунок 13.1 – Графік $\lambda(t)$

Графік $\lambda(t)$, U – подібний – характеристика життя. На ньому весь інтервал робочого часу можна розбити на 3 періоди:

1 – $\lambda(t)$ має підвищене значення. Завжди є вироби з прихованим дефектом, які виходять з ладу у першу чергу. З цієї причини перший

інтервал – *це період прироблення*, або період виживання дефектних виробів;

2 – *період нормальної роботи*. Характеризується постійним або приблизно-постійним значенням $\lambda(t)$;

3 – *період старіння* зносу елементів, деталей, вузлів.

Для більшості елементів машин, у яких переважають раптові відмови, безперервною математичною моделлю є експоненціальний розподіл. Отримаємо вираз для ймовірності безвідмовної роботи залежно від інтенсивності відмов. Для цього в попередній вираз підставимо $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$, розділимо змінні та зробимо інтегрування:

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t) dt; \ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt;$$

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Це співвідношення є одним із основних рівнянь теорії надійності.

Графік $P(t)$ має вигляд:

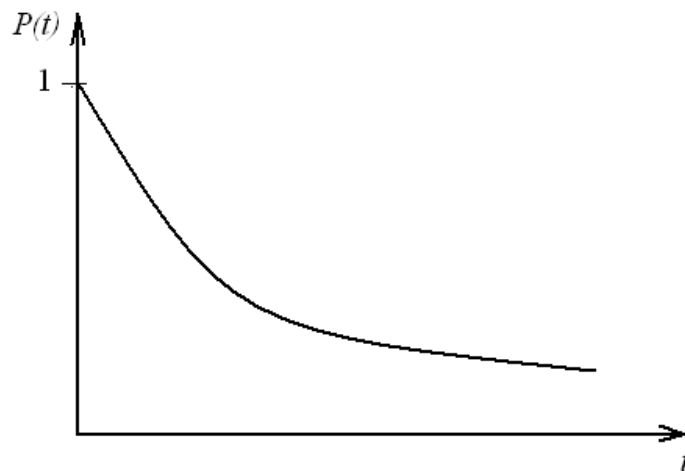


Рисунок 13.2 – Графік $P(t)$

До найважливіших загальних залежностей надійності відносять залежності надійності систем від надійності елементів.

Розглянемо надійність найбільш характерної для машинобудування найпростішої розрахункової моделі системи з послідовно з'єднаними елементами (рис. 13.3), у якій відмова

кожного елемента викликає відмову системи, а відмови елементів беруть незалежними.

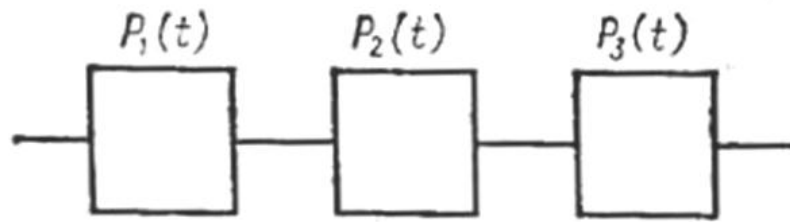


Рисунок 13.3 - Послідовна система

Використаємо відому теорему множення ймовірностей, згідно з якою ймовірність спільної прояви незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій. Отже, ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи окремих елементів, т. е. $P_{ПС}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t)$.

Якщо $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$, то $P_{ПС}(t) = P_1(t)^n$. Тому надійність складних систем виходить низькою. Наприклад, якщо система складається з 10 елементів із ймовірністю безвідмовної роботи 0,9 (як у підшипниках кочення), то загальна ймовірність виходить $0.9^{10} \approx 0.35$.

Зазвичай ймовірність безвідмовної роботи елементів досить висока, тому, виразивши $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ через ймовірність відмов і користуючись теорією наближених обчислень, отримуємо

$$P_{ст}(t) = [1 - Q_1(t)][1 - Q_2(t)] \dots [1 - Q_n(t)] \approx \approx 1 - [Q_1(t) + Q_2(t) + \dots + Q_n(t)],$$

оскільки добутками двох малих величин можна знехтувати.

При $Q_1(t) = Q_2(t) = \dots = Q_n(t)$ отримуємо $P_{ПС}(t) = 1 - nQ_1(t)$. Нехай у системі з шести однакових послідовних елементів $P_1(t) = 0.99$.

Тоді $Q_1(t) = 0.01$ і $P_{ПС}(t) = 0.94$.

Ймовірність безвідмовної роботи потрібно вміти визначати для будь-якого проміжку часу. За теоремою множення ймовірностей $P(T+t) = P(t) \cdot P(T)$ або $P(t) = P(T+t) / P(T)$, де $P(T), P(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи за час T і $(T+t)$ відповідно; $P(t)$ – умовна ймовірність безвідмовної роботи за час t (термін «умовна» тут запроваджено, оскільки ймовірність визначається у припущенні, що вироби не мали відмови до початку інтервалу часу або напрацювання).

13.3. Надійність у період нормальної експлуатації

У цей період *поступові відмови* ще не проявляються, і надійність характеризується *раптовими відмовами*. Ці відмови викликаються несприятливим збігом багатьох обставин і тому мають постійну інтенсивність, яка не залежить від віку виробу:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const},$$

де $\lambda(t) = 1/m_t$; m_t – середнє напрацювання до відмови (зазвичай в годинах).

Тоді λ виражається числом відмов у годину і, як правило, становить малий дріб.

Ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}.$$

Вона підпорядковується експоненціальному закону розподілу часу безвідмовної роботи і однакова за однаковий проміжок часу в період нормальної експлуатації.

Експоненціальним законом розподілу можна апроксимувати час безвідмовної роботи широкого кола об'єктів (виробів): особливо відповідальних машин, які експлуатуються в період після закінчення припрацювання і до істотного прояву поступових відмов; машин із послідовною заміною відмовних деталей; машин разом із електро- і гідрообладнанням і системами управління; складних об'єктів, що складаються з багатьох елементів (при цьому час безвідмовної роботи кожного може не бути розподілений за експоненціальним законом; потрібно тільки, щоб відмови елемента, який не підпорядковується цьому закону, не домінували над іншими).

Прикладом несприятливого поєднання умов, що викликають поломку вала, може бути дія максимального пікового навантаження при положенні найбільш ослаблених граничних волокон вала в площині навантаження.

Суттєва перевага експоненціального розподілу – його простота: він має тільки один параметр.

Якщо, як правило, $\lambda \cdot t \leq 0.1$, то формула для ймовірності безвідмовної роботи спрощується в результаті розкладання в ряд і відкидання малих членів:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t.$$

Щільність розподілу (в загальному випадку)

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Значення ймовірності безвідмовної роботи залежно від $\lambda(t)t \approx t/m_t$:

$\lambda(t)t$	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Оскільки при $t/m_t = 1$ ймовірність $P(t) \approx 0.37$, то 63 % відмов виникає за час $t < m_t$ і тільки 37 % пізніше. З наведених значень випливає, що для забезпечення необхідної ймовірності безвідмовної роботи 0,9 або 0,99 можна використовувати лише малу частку середнього терміну служби (відповідно 0,1 і 0,01).

Якщо робота виробу відбувається при різних режимах, а отже, і інтенсивностях λ_1 (за час t_1) і λ_2 (за час t_2), то

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}.$$

Ця залежність впливає з теореми множення ймовірностей.

13.4. Надійність у період поступових відмов

Під поступовими відмовами в технічній літературі часто мають на увазі відмови, причиною яких є знос, причому знос розуміється в розширеному сенсі слова. Отже, для подібних відмов потрібні закони розподілу часу безвідмовної роботи, які дають спочатку низьку щільність розподілу, потім максимум і далі падіння, пов'язане зі зменшенням числа працездатних елементів.

У зв'язку з різноманіттям причин і умов виникнення відмов у цей період для опису надійності застосовують кілька законів розподілів, які встановлюють шляхом апроксимації результатів випробувань чи спостережень в експлуатації.

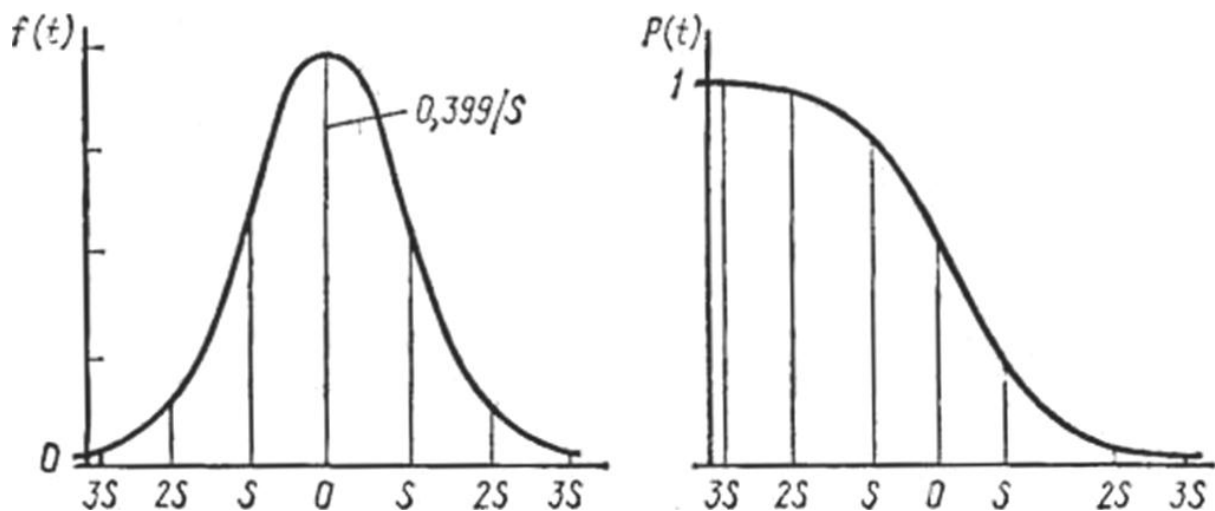


Рисунок 15.2—Функція щільності ймовірності та інтегральна функція ймовірності нормального розподілу

Нормальний розподіл є найбільш універсальним, зручним і який широко застосовується для практичних розрахунків (рис. 15.2, 15.3).

Розподіл завжди підлягає нормальному закону, якщо на зміну випадкової величини впливають багато приблизно рівнозначних чинників.

Нормальному розподілу підлягає напрацювання до відмови багатьох відновлюваних і невідновлюваних виробів, розміри і помилки вимірювань деталей і т. д.

Щільність розподілу

$$f(t) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S^2}}.$$

Розподіл має два незалежних параметри: математичне очікування m_t і середнє квадратичне відхилення S . Значення оцінюють за результатами випробувань за формулами

$$m_t \approx \bar{t} = \Sigma t_i / N;$$

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \Sigma (t_i - \bar{t})^2},$$

де \bar{t} і s – оцінки математичного очікування і середнього квадратичного відхилення.

Зближення параметрів і їх оцінок збільшується зі збільшенням числа випробувань.

Іноді зручніше оперувати з дисперсією $D = S^2$. Математичне очікування визначає на графіку (див. рис. 15.2) положення петлі, а середнє квадратичне відхилення – ширину петлі.

Крива щільності розподілу тим гостріше і вище, чим менше S . Вона починається від $t = -\infty$ і поширюється до $t = +\infty$.

Це не є істотним недоліком, особливо якщо $m_t \geq 3 \cdot S$, оскільки площа, окреслена гілками кривої щільності, що йдуть в нескінченність, дуже мала. А ця площа, у свою чергу, виражає відповідну ймовірність відмов. Так, ймовірність відмови за період часу до $m_t - 3 \cdot S$ становить всього 0.135 % і зазвичай не враховується в розрахунках. Ймовірність відмови до $m_t - 2 \cdot S$ дорівнює 2.175 %. Найбільша ордината кривої щільності розподілу дорівнює $0,399 / S$.

Інтегральна функція розподілу

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt.$$

Ймовірність відмови і ймовірність безвідмовної роботи відповідно

$$Q(t) = F(t); \quad P(t) = 1 - F(t).$$

Обчислення інтегралів замінюють використанням таблиць для нормального розподілу, у якого $m_x = 0$ і $S_x = 1$. Для цього розподілу функція щільності

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

має одну змінну x . Величина x є центрованою, оскільки $m_x = 0$, і нормованою, оскільки $S_x = 1$. Функція щільності розподілу записується у відносних координатах із початком на осі симетрії петлі (рис. 15.2).

Функція розподілу – інтеграл від щільності розподілу

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx. \quad \text{З цього рівняння випливає, що } F_0(x) + F_0(-x) = 1,$$

звідси

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x).$$

Для використання таблиць слід застосовувати підстановку $x = (t - m_t) / S$; при цьому x називається **квантилем нормованого нормального розподілу** і звичайно позначається u_p .

Щільність розподілу та ймовірність безвідмовної роботи, відповідно, $f(t) = f_0(t) / S$; $Q(t) = F_0(t)$; $P(t) = 1 - F_0(t)$, де $f_0(t)$ і $F_0(t)$ беруть з таблиць, які розміщуються в книгах із матстатистики.

Наприклад:

x	0	1	2	3	4
$f_0(x)$	0,3989	0,2420	0,0540	0,0044	0,0001
$F_0(x)$	0,5	0,8413	0,9772	0,9986	0,9999

У літературі щодо надійності часто замість інтегральної функції розподілу $F_0(t)$ користуються функцією Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_0^x f_0(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Очевидно, що

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^0 f_0(x) dx + \int_0^x f_0(x) dx = 0,5 + \Phi(x)$$

Ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи, виражені через функції Лапласа, що відрізняються межами інтегрування, мають вигляд

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right); P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right).$$

Порівнюючи вироби з однаковим середнім напрацюванням до відмови і різним середнім квадратичним відхиленням S , потрібно підкреслити, що чим менше S , тим краще виріб.

Список літератури

1. Нагорний В. М. Введення в технічну діагностику машин: навчальний посібник / В. М. Нагорний . – Суми : Сумський державний університет, 2011.–483 с.
2. Нагорный В. М. Отказы машин и их физическая природа: учебное пособие / В. М. Нагорный . – Сумы : Сумский государственный университет, 2006.– 230 с.

Навчальне видання

**Механіка руйнувань та прогнозування
надійності машин**

Конспект лекцій
для студентів
напряму підготовки 6.040202 «Механіка»
денної форми навчання

Відповідальний за випуск В. А. Марцинковський
Редактор Т. Г. Чернишова
Комп'ютерне верстання В. М. Нагорного

Підписано до друку 23.11.12, поз.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк.5,12. Обл.- вид. арк.4,15. Тираж 30 пр. Зам. №
Собівартість видання грн к.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК 3062 від 17.12.2007