

**ВПЛИВ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ
БАЗОВИХ ВИПРОБУВАНЬ ПРИ БАГАТО- І
МАЛОЦИКЛОВІЙ ВТОМІ**

**Приймаков О.Г., к.т.н., проф.¹⁾, Градиський Ю.О., к.т.н., доц.²⁾,
Янчик О.Г., к.т.н.³⁾**

¹⁾*Харківський державний технічний університет будівництва і
архітектури*

²⁾*Харківський національний технічний університет сільського
господарства ім. П. Василенка*

³⁾*Об'єднане оперативне командування ЗСУ, м. Київ*

Розглянуто вплив на витривалість різних факторів при проведенні базових випробувань. Досліджено механізм зародження і розвитку тріщини при мало цикловій втомі.

Вступ. В реальних умовах експлуатації деталі машин можуть сприймати циклічні навантаження з різними зсувами відносно нульового рівня, що приводять до виникнення постійних (середніх) деформацій ε_m і напружень σ_m . Ці характеристики напружено-деформованого стану враховуються шляхом введення відповідних змін в базові залежності, однак при цьому загальний вигляд таких залежностей залишається незмінним. В області пружних деформацій існує однозначна залежність між напруженнями і деформаціями, тому вплив середніх напружень і деформацій проявляється однаково [1]. При пластичних деформаціях такої залежності не існує, тому варто розглядати окремо вплив середніх деформацій і напружень.

Врахування пластичних деформацій ε_{mP} розтягнення при жорсткому навантаженні виконується шляхом зменшення ε_K в рівнянні Коффіна-Менсона:

$$\varepsilon_{aP}^2 N = \frac{1}{16} (\varepsilon_K - \varepsilon_{mP})^2. \quad (1)$$

В співвідношенні (1) передбачається, що деформація ε_{mP} при розтягненні зменшує “ресурс” пластичності. Використовуючи поняття еквівалентної амплітуди змінних пластичних деформацій, отримаємо

$$\varepsilon_{aPE} = \varepsilon_{aP} + \psi_\varepsilon(N) \varepsilon_{mP},$$

де $\psi_\varepsilon(N) = \frac{1}{4\sqrt{N}}$ - коефіцієнт впливу постійної деформації, що залежить

від числа циклів навантаження.

Врахування середніх напружень σ_m при жорсткому навантаженні виконується в області, де виникають пружні деформації, шляхом зниження границі витривалості

$$\sigma_{-1E} = \sigma_{-1} - \psi \sigma_m, \quad (2)$$

де ψ - коефіцієнт чутливості матеріалу до асиметрії циклу.

Якщо прийняти $\psi = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}$ (σ_B - межа міцності), то (2) можна записати у вигляді

$$\sigma_{-1E} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right). \quad (3)$$

Використовуючи наведені формули (1) - (3), базову залежність при жорсткому навантаженні з врахуванням середніх деформацій і напружень можна записати у вигляді

$$N_B = C \varepsilon_a^m, \quad (4)$$

де

$$C = \begin{cases} \frac{(\varepsilon_K - \varepsilon_m)^2}{16}, & \varepsilon_a > \varepsilon_{aП}, \\ \frac{\sigma_{-1\partial}^m}{E^m} N_0 = \frac{\sigma_{-1}^m}{E^m} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) N_0, & \varepsilon_a \leq \varepsilon_{aП}. \end{cases}$$

Врахування середніх напружень при м'якому навантаженні, коли необхідно задавати тільки амплітуди напружень σ_a , виконується на основі моделі, прийнятої для симетричного циклу, шляхом введення еквівалентних напружень:

$$N_B = C_\sigma \sigma_{aE}^{m_\sigma}, \quad (5)$$

де $\sigma_{aE} = \sigma_a + \psi(\sigma_a) \sigma_m$, $\psi(\sigma_a)$ - коефіцієнт чутливості, що приймає різні значення залежно від того, в якій області перебуває σ_a . Наприклад,

$$\psi(\sigma_a) \approx \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}.$$

Концентрація напружень (деформацій), поверхневий шар і масштабний фактор. Отримані основні базові залежності (4) і (5) при багато- і малоцикловій втомі відносяться до зразків простої форми. Важливим завданням є перенесення отриманих експериментальних результатів на більш складні елементи конструкції. Для цього в співвідношенні (4), що є

базовим при жорсткому навантаженні і відмінних від нуля середніх деформацій і напружень, вводяться еквівалентні амплітуди деформацій ε_{aE} , що враховують ще концентрацію деформацій, якість поверхневого шару і масштабний фактор

$$\varepsilon_{aE} = K_{\varepsilon\varepsilon} \varepsilon_a, \quad (6)$$

$$\text{де } K_{\varepsilon\varepsilon} = \begin{cases} K_\varepsilon, & K_\varepsilon \varepsilon_a > \varepsilon_{a\Pi}, \\ \frac{K_\varepsilon}{M\beta}, & K_\varepsilon \varepsilon_a \leq \varepsilon_{a\Pi}, \end{cases} \quad \varepsilon_a - \text{амплітуда номінальних деформацій};$$

K_ε - коефіцієнт концентрації деформацій в пружнопластичній області; M, β - коефіцієнти впливу масштабного ефекту і поверхневого шару, які можуть бути прийняті такими, як при розрахунках багатоциклової втоми. При числі циклів до руйнування $N \leq 10^3$ ($K_\varepsilon \varepsilon_a > \varepsilon_{a\Pi}$) приблизно можна вважати $K_{\varepsilon\varepsilon} = K_\varepsilon$.

Використовуючи поняття введених еквівалентних амплітуд деформацій по формулі (6), базову залежність (4) з врахуванням середніх деформацій і напружень, концентрації деформацій, впливу поверхневого шару і масштабного факторів при жорсткому навантаженні можна записати у вигляді

$$N_B = C_{aE}^m, \quad (7)$$

$$\text{де } C = \begin{cases} \frac{(\varepsilon_K - K_\varepsilon \varepsilon_m)^2}{16}, & \varepsilon_{aE} > \varepsilon_{a\Pi}, \\ \left[\frac{\sigma_{-1}}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^m N_0, & \varepsilon_{aE} \leq \varepsilon_{a\Pi}. \end{cases} \quad m = \begin{cases} m_1 \approx 4 \dots 10, & \varepsilon_{aE} > \varepsilon_{a\Pi}, \\ m_2 \approx 2, & \varepsilon_{aE} \leq \varepsilon_{a\Pi}. \end{cases}$$

У випадку мало- і багатоциклової втоми використовується основна базова залежність, в якій σ_a замінюється еквівалентною амплітудою змінних напружень

$$\sigma_{aE} = K_{\sigma\varepsilon} \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \sigma_m, \quad (8)$$

де $K_{\sigma\varepsilon}$ - ефективний коефіцієнт концентрації напруг, що залежить від σ_a .

Багатоциклова втома на стадії розвитку тріщин. Досвід експлуатації різних машин показує, що в процесі роботи можуть виникати втомні тріщини в їх елементах. Крім того, в деталях машин уже при виготовленні з'являються дефекти, які можна розглядати як початкові тріщини. Незалежно від природи появи тріщин всі вони, як правило, розвиваються під дією експлуатаційних навантажень доти, поки не досягнуть критич-

них розмірів, при яких відбувається руйнування деталі. Велике значення має проблема оцінки ресурсу роботи та надійності (живучості) деталі в умовах експлуатації на стадії розвитку тріщин, тобто від моменту появи першої макроскопічної тріщини довжиною 0,2...0,5 мм до остаточного руйнування. Для вирішення цієї проблеми використовуються методи і поняття лінійної механіки руйнування, зокрема поняття коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), що характеризує концентрацію напружень біля вершини тріщини. Для тонкої пластини нескінченно великої ширини з тріщиною довжиною $2l$, що розтягується напруженням σ в напрямку, перпендикулярному до тріщини (рис.1), коефіцієнт інтенсивності напружень

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} . \quad (9)$$

Для пластини обмеженої ширини $2B$ з тріщиною $2l$, що розтягується перпендикулярною до тріщини напругою σ (рис.2), КІН визначається по наближеній формулі Ірвіна [2]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l \sec\left(\frac{\pi l}{2B}\right)} . \quad (10)$$

В [3] наведені вирази КІН для різних випадків.

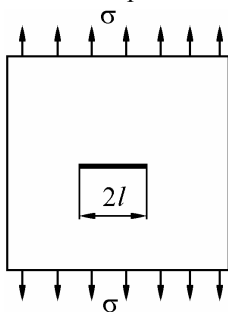


Рис. 1. Пластина нескінченно великої ширини

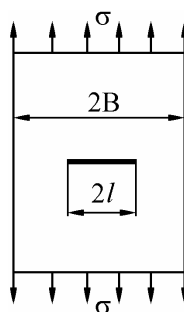


Рис. 2. Пластина обмеженої ширини

Базові випробування для розглянутої моделі відмови полягають в одержанні кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) (рис.3) в логарифмічних координатах: швидкість розвитку втомної тріщини

$V = \frac{dl}{dt}$ - розмах КІН, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ або його максимальне значення K_{\max} [3, 4].

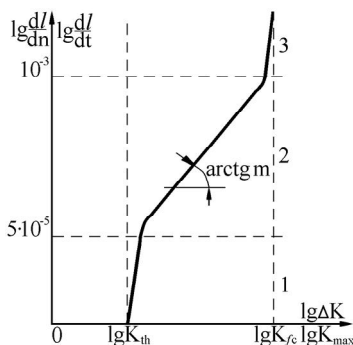


Рис. 3. Кінетична діаграма втомного руйнування

В загальному випадку ця залежність має вигляд

$$\frac{dl}{dt} = f(\Delta K) \quad \text{або} \quad \frac{dl}{dt} = f(K_{\max}). \quad (11)$$

Для широкого класу матеріалів КДВР представляє S-подібну криву, показану на рис.3, з трьома характерними ділянками: 1 - зародження ($0 < \frac{dl}{dn} < 5 \times 10^{-5}$ мм на 1 цикл); 2 - росту ($5 \times 10^{-5} < \frac{dl}{dn} < 10^{-3}$); 3 - швидкі поширення ($\frac{dl}{dn} > 10^{-3}$ мм на 1 цикл) тріщин.

Основними характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалів, як це видно з КДВР (рис. 3), є дві вертикальні асимптоти, які визначаються граничним K_{th} і критичним K_{fc} значеннями КІН, а також параметри, що визначають вид залежностей (11). Якщо $K_{\max} < K_{th}$ ($\Delta K < \Delta K_{th}$), то тріщина не розвивається. На ділянці 2 залежність $\lg \frac{dl}{dt} - \lg \Delta K$ можна вважати лінійною:

$$\lg \frac{dl}{dt} = m \lg \Delta K + \lg B, \quad (12)$$

де B і $m = 2 \dots 6 - const$, визначаються експериментально.

Рівняння (12) еквівалентно

$$\frac{dl}{dt} = B(\Delta K)^m, \quad (13)$$

яке називається рівнянням Періса. Це рівняння справедливе тільки в обмеженій області середніх швидкостей (ділянка 2), тому в цей час знайдені

десятки різних рівнянь для опису швидкості розвитку тріщин на різних ділянках і при різних умовах випробувань (середовище, температура і т.д.) [3]. Наприклад, залежність

$$\frac{dl}{dt} = V_0 \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{\Delta K_{fc} - \Delta K} \right)^q, \quad V_0, q - const$$

описує швидкість розвитку тріщин на всіх трьох ділянках.

Надалі для опису КДВР будемо розглядати рівняння Періса, тому що час росту тріщини, що відповідає ділянці 2, для якої це рівняння справедливе, становить значну частину часу корисного функціонування конструкції. Припустимо, що напруження $\sigma(t)$ змінюються по симетричному циклу

$$\sigma(t) = \sigma_a \cos(\omega t + \kappa).$$

В цьому випадку КІН $\Delta K = 2\sigma_a \sqrt{\pi l}$ і рівняння Періса буде

$$\frac{dl}{dt} = B(2\sqrt{\pi})^m \sigma_a^m l^{\frac{m}{2}}. \quad (14)$$

Перетворимо (14) до виду

$$\frac{dl}{l^{\frac{m}{2}}} = B(2\sqrt{\pi})^m \sigma_a^m dt. \quad (15)$$

Введемо для лівої частини рівності (15) позначення

$$dz' = \frac{dl}{l^{\frac{m}{2}}}. \quad (16)$$

Виконаємо інтегрування на інтервалі $[0, t]$, припускаючи, що при $t = 0$, $l(0) = l_0$ і $Z(0) = 0$:

$$Z'(t) = \frac{l(t)^{1-\frac{m}{2}} - l_0^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}. \quad (17)$$

Позначимо критичний розмір тріщини l_K , при якому в момент часу $t = t_*$ настає руйнування конструкції. Тоді з (17) можна одержати вираз для значення Z'_* , що відповідає руйнуванню:

$$Z'_*(t_*) = \frac{l^{1-\frac{m}{2}} - l_0^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}. \quad (18)$$

Щоб привести у відповідність до раніше введеної міри пошкоджень, необхідно виконати умову нормування. Для цього введемо міру пошкоджень

$$Z(t) = \frac{Z'(t)}{Z'_*(t_*)}. \quad (19)$$

Тоді кінетичне рівняння для опису міри пошкоджень $Z(t)$, що змінюється в межах $[0, 1]$ і має всі властивості ($Z(t_*) = 1$), відповідно до рівнянь (15), (16) і (18) можна записати у вигляді

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{B(2\sqrt{\pi})^m \sigma_a^m}{Z_*^m} = A \sigma_a^m, \quad (20)$$

де

$$A = \frac{B(2\sqrt{\pi})^m}{Z_*^m} = \frac{B(2\sqrt{\pi})^m \left(1 - \frac{m}{2}\right)}{I_K^{1-\frac{m}{2}} - I_0^{1-\frac{m}{2}}}.$$

Проінтегруємо отримане рівняння на інтервалі $[0, t]$ з врахуванням прийнятих початкових умов:

$$Z(t_*) = A \sigma_a^m t_* = 1. \quad (21)$$

Розв'язуючи (21) відносно t_* , одержуємо вираз для T_B , що відповідає виразу

$$t_* = T_B = \frac{1}{A \sigma_a^m}. \quad (22)$$

При циклічному навантаженні (безперервному або дискретному) іноді зручніше оперувати з числом циклів n , що визначається співвідношенням $n = \frac{t}{T_e}$ (T_e - ефективний період). Тоді базове число циклів до руйнування можна визначити згідно (22) по формулі

$$N_B = \frac{T_B}{T_e} = \frac{1}{A T_e \sigma_a^m} = \frac{I_K^{1-\frac{m}{2}} - I_0^{1-\frac{m}{2}}}{B(2\sqrt{\pi})^m \left(1 - \frac{m}{2}\right) T_e \sigma_a^m}. \quad (23)$$

Висновки по роботі. 1. Розроблено типові фізичні моделі відмов і створено опис базових залежностей N_B та T_B .

2. Створено методологію оцінки визначальних параметрів витрива-

лості та надійності (довговічності) при різних моделях відмов.

Список використаних джерел

1. Биргер И.А. Детерминированные и статистические модели долговечности // Проблемы надежности летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1985. - С. 105-150.
2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность.- М.: Машиностроение, 1985.- 224 с.
4. Колинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

Аннотация

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ БАЗОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ МНОГО- И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Приймаков А.Г., Градыский Ю.А., Янчик А.Г.

Рассмотрено влияние на выносливость разных факторов при проведении базовых испытаний. Исследован механизм зарождения и развитие трещин при многоциклового усталости.

Abstract

INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON RESULTS OF BASE TRIALS AT MULTI-AND FEW- CYCLIC FATIGUE

Primakov A.G., Gradyskiy Y.A., Yanchik A.G.

Influence on endurance of different factors is considered at holding of base trials. The mechanism of origin and development of flaws is investigated at multicyclic fatigue.