

ЕРГОДИНАМІКА ВТОМИ

В.Г. Байло

ERGODYNAMICS OF FATIGUE

V.G. Baylo

Вінницький національний технічний університет, Україна

Abstract The main task of the work is development of the analytical means to approximation and forecasting of limiting properties of materials at cyclic deformation. The analysis of the equation accumulation of energy and the equation of durability for a case of cyclic loading is carried out. The received results have allowed to offer a method of forecasting of fatigue strength and durability at cyclic loading and plotting of fatigue curves.

Найбільш загальним підходом при розгляді задач циклічної міцності є підхід на основі термодинамічних уявлень про характер перетворень, що відбуваються у матеріалі та призводять до його руйнування. При цьому можливі два рівноцінних варіанти побудови визначальних співвідношень – ентропійний та енергетичний.

У результаті проведеного [3] аналізу наявних моделей накопичення пошкоджень і руйнування матеріалів було визнано доцільним віддати перевагу енергетичному підходові, а саме ергодинамічному його різновиду [1, 2], котрий дозволяє описувати кінетику накопичення пошкоджень у матеріалах у вигляді зміни (росту) прихованої потенційної енергії дефектів, причому багато параметрів вихідних рівнянь ергодинаміки можна отримати за результатами звичайних статичних випробувань на розтяг. Ці параметри визначаються, по-перше, просто, а по-друге, незалежно від процесу циклічного руйнування, що підтверджує їх обґрунтованість.

У даній роботі розглядаються приклади розрахунку втомних характеристик матеріалів на базі ергодинамічного підходу.

Прогнозування закономірностей утомного руйнування металів. Розглянемо задачу руйнування твердого тіла, підданого дії складного напруженого стану, постійного в часі й за ізотермічних умов, тобто

$$\sigma_0 = const; \quad \sigma_i = const; \quad T = const; \quad (1)$$

Для спрощення покладемо також, що потік прихованої енергії відсутній. Тоді кінетичне рівняння набуде вигляду [1]:

$$\dot{u}_e = A \cdot sh \left(\frac{\alpha \sigma_i^2 - \nu u_e}{2kT} \right). \quad (2)$$

$$\text{Тут} \quad A = \frac{2kT}{h} U(\sigma_0, T) \exp \left[-\frac{U(\sigma_0, T)}{kT} \right]; \quad (3)$$

$$U(\sigma_0, T) = U_0 - \Delta U(T) \pm \beta \sigma_0^2; \quad (4)$$

$$\alpha = k_\sigma^2 V_0 / 6G; \quad \beta = k_\sigma^2 V / 2K; \quad (5)$$

де U_0 - початкове значення енергії активації досліджуваного процесу при $T = 0$ і $\sigma_0 = 0$; σ_0 і σ_i - гідростатичне напруження та інтенсивність напружень відповідно; T - абсолютна температура; k - постійна Больцмана; h - постійна Планка; V_0 - атомний об'єм; G і K - модуль зсуву й модуль об'ємної пружності відповідно; k_σ - коефіцієнт перенапруження міжатомних зв'язків; ν - коефіцієнт нерівномірності розподілення прихованої енергії по об'єму; $\Delta U(T)$ - зміна вільної енергії активації процесу при підвищенні температури.

Умову руйнування для цього випадку можна подати у вигляді

$$u_{e_*} = \frac{1}{K_2} \left[\ln \frac{\exp K_3 t_* - C_1}{\exp K_3 t_* + C_1} + K_1 \right], \quad (6)$$

де $u_{e_*} = u_* - u_{T_0} - w_0$.

Розв'язуючи (6) щодо часу, одержимо час до руйнування

$$t_* = \frac{1}{K_3} \left[\ln \frac{1 - \exp(K_2 u_{e_0} - K_1)}{1 + \exp(K_2 u_{e_0} - K_1)} - \ln \frac{1 - \exp(K_2 u_{e_*} - K_1)}{1 + \exp(K_2 u_{e_*} - K_1)} \right]. \quad (7)$$

Аналіз рівняння довговічності. З ергодинамічної точки зору процесові накопичення у матеріалі дефектів і ушкоджень відповідає поступове зростання унаслідок деформування тіла внутрішньої енергії u , інтенсивність накопичення котрої в окремих об'ємах є функцією часу і жорсткості навантаження. Руйнування твердого тіла настає, коли у локальних об'ємах матеріалу, відповідальних за руйнування, накопичується внутрішня енергія критичної густини u_* .

Фізичною границею витривалості (чи безпечним напруженням) із ергодинамічної точки зору є така величина напружень σ_R , при не перевищенні якої густина накопичуваної у деформованих об'ємах матеріалу внутрішньої енергії не досягає критичного значення u_* незалежно від часу деформування ($t \rightarrow \infty$).

Відповідно до цього величина безпечного напруження

$$\sigma_R = \left(\frac{\nu u_{e_*}}{\alpha} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Ураховуючи еквівалентність між статичними і циклічними напруженнями, значення безпечного напруження (границі витривалості) при циклічному навантаженні може бути визначена за формулою

$$\sigma_R = \frac{1}{M_R} \left(\frac{\nu u_{e_*}}{\alpha} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу прихованої енергії по об'єму

Урахування гетерогенності полікристалічного матеріалу дозволяє розкрити причини втомного руйнування й пояснити фізичну сутність уведеного раніше [1] коефіцієнта ν нерівномірності розподілу прихованої енергії по об'єму.

Для оцінки величини коефіцієнта ν і його залежності від амплітуд циклічних напружень треба мати експериментальні результати, що характеризують залежність швидкості накопичення прихованої енергії від зміни густини прихованої енергії матеріалу (його пошкоджуваності).

Було проведено дослідження залежності швидкості накопичення пошкоджуваності від збільшення рівня прихованої енергії, результати яких представлені в [3]. Обробка отриманих результатів дозволила отримати наступну залежність ν від амплітуди циклічних напружень:

$$\nu = \frac{\sigma_s}{S_{0_*}} - \frac{\sigma_a^2}{\sigma_s S_{0_*}}, \quad (10)$$

тобто ν є функцією границі текучості σ_s (чи $\sigma_{0,2}$) та істинного опору зсувові S_{0_*} .

Енергія активації процесу накопичення пошкоджень при втомі

Розробка фізично обґрунтованих методів прогнозування характеристик втоми матеріалів на основі ергодинамічного підходу вимагає знання не лише механічних властивостей і структурних параметрів, але й величини енергії активації U та її залежності від амплітуди діючих напружень.

Відповідно до ергодинамічної теорії міцності [3] вираз для довговічності можна подати у вигляді

$$t_* = \frac{2kT}{vA} \ln \frac{(\exp a\sigma_i^2 + \exp bv)(\exp a\sigma_i^2 - \exp bv)}{(\exp a\sigma_i^2 - \exp bv)(\exp a\sigma_i^2 + \exp bv)}. \quad (11)$$

$$\text{Тут} \quad a = \frac{u_* V_0}{2kTS_{0*}^2}; \quad b = aS_{0*}^2; \quad n = \left(\frac{\sigma_s}{S_{0*}}\right)^2. \quad (12)$$

Значний інтерес становить виявлення залежності енергії активації від температури локальних розігрівів.

У результаті проведених розрахунків (рисунок 1) з'ясувалося, що залежність енергії активації втомного руйнування від локальної температури є лінійною і може бути апроксимована формулою

$$U' \cdot 10^{19} = 0,006 \cdot T_*, \quad \text{Дж}. \quad (13)$$

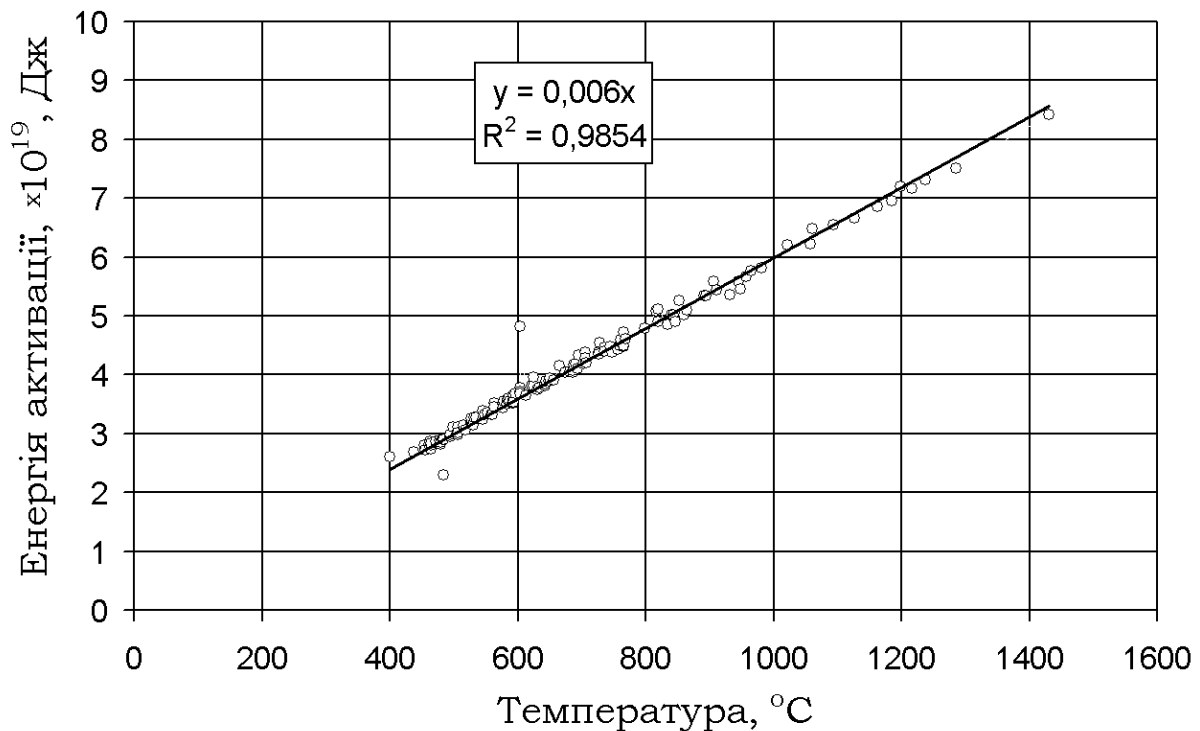


Рис. 1. Залежність енергії активації накопичення втомних пошкоджень від величини температур локальних розігрівів

Побудова кривих втоми

Описані вище результати дозволяють будувати криві втоми матеріалів по їхніх механічних характеристиках, отриманих при статичних випробуваннях на розтяг.

Попередні оцінки показали, що результати виходять більш точними при врахуванні гіпотези локальних розігрівів. Рівняння (11) для зручності розрахунків можна записати у вигляді

$$N_* = f \cdot F_1(U', T_*) \cdot F_2(v_0, \sigma_a, T_*). \quad (14)$$

Тут f – частота навантаження зразка, Гц;

$$F_1 = \frac{h \exp(U'/kT_*)}{U'}; \quad (15)$$

$$F_2 = \frac{1}{\nu} \ln \frac{(P+Q)(P-Q^n)}{(P-Q)(P+Q^n)}; \quad (16)$$

де

$$\nu_0 = \sigma_{0.2} / S_{0*}; \quad n = \left(\sigma_{0.2} / S_{0*} \right)^2; \quad (17)$$

$$P = \exp \frac{u_{e*} V_0 M_R^2 \sigma_a^2}{2k S_{0*}^2 T_*}; \quad (18)$$

$$Q = \exp \frac{\nu u_* V_0}{2kT} \quad (19)$$

Для ілюстрації були розраховані криві втоми для сталей 30ХГСНА й ЭИ643 та сплавів титану ВТ22 і ОТ4 (експериментальні дані узяті з роботи [4]). Отримані результати показані на рисунку 2 та в таблиці 1.

Визначення величини коефіцієнтів еквівалентності статичних і циклічних навантажень і уточнення коефіцієнтів температурної залежності енергії активації процесів накопичення втомних пошкоджень виконувалось за результатами втомних випробувань на двох рівнях циклічних навантажень.

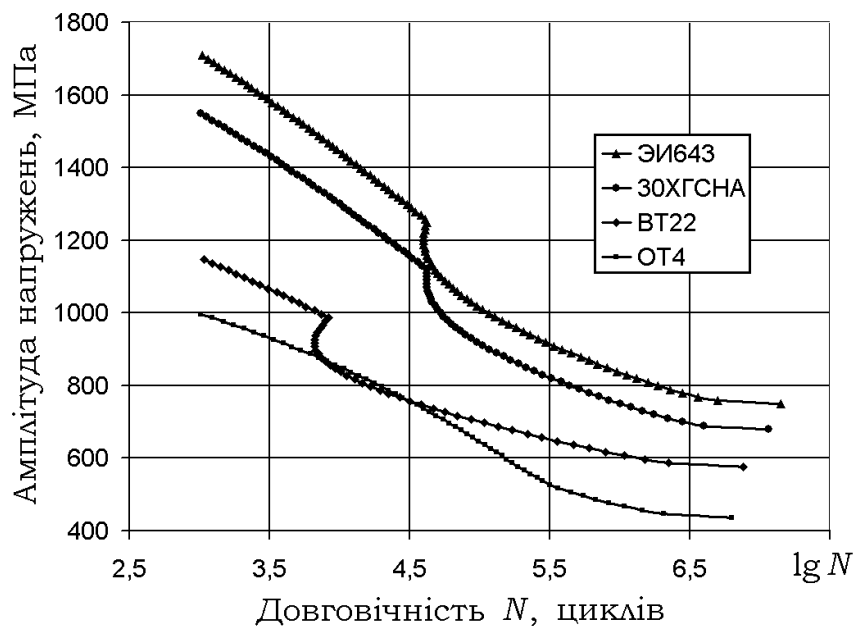


Рис. 2. Розрахункові криві втоми для сталей і титанових сплавів

Розрахунки виконувались за допомогою розробленої програми, криві будувались в MS Excel за імпортованими результатами розрахунків.

Таблиця 1. Експериментальні і розрахункові дані для сталей і сплавів титану

Матеріал	Експериментальні дані						Розрахункові дані			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_a , МПа	$\lg N$	σ_{-1} , МПа	S_{0*} , МПа	$\lg N$	σ_{-1} , МПа
30ХГСНА	1665	1250	12	62	720	6,41	696	2316	6,24	684
					820	5,34			5,51	
ЭИ643	1930	1400	8	44	820	6,37	785	2542	6,12	762
					875	5,83			5,75	
BT22	1173	1100	17	58	600	6,36	580	1599	6,16	577
					680	5,00			5,20	
OT4	785	580	23	45	490	5,60	431	1121	5,80	437
					570	4,85			5,2	

Видно, що в цьому випадку дається досить гарний опис експериментальних даних.

Висновки

Визначення описаних у статті параметрів дало можливість запропонувати методику розрахунку довговічності при циклічних навантаженнях.

Запропонований метод побудови кривих втоми дозволяє будувати їх із достатньою точністю, якщо відомі механічні властивості при розтягуванні й результати випробувань на втому серії зразків хоча б на одному рівні напружень. Точність розрахунків значно підвищується, коли наявні результати втомних випробувань на двох рівнях напружень. При цьому забезпечується також можливість прискореного встановлення границі витривалості.

Література

1. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент : Фан, 1985. – 168 с.
2. Федоров В.В, Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент : Фан, 1979. – 186 с.
3. Байло В.Г. Разработка методов прогнозирования характеристик усталости конструкционных сталей и титановых сплавов на основе эргодинамического подхода. Дисс. ...канд. техн. наук. – Ташкент, 1986. – 394 с.
4. Бойцов Б.В. Прогнозирование долговечности напряженных конструкций : Комплексное исследование шасси самолета. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.