

Прогнозування характеристик опору утомі конструкційних матеріалів на великих базах навантажування*

Г. Г. Писаренко^а, Л. Є. Матохнюк^а, О. В. Войналович^б, Д. Г. Кофто^б

^а Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^б Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Проаналізовано результати випробувань на втому зразків конструкційних матеріалів на базі до 10^{10} цикл навантажування. Запропоновано методика побудови кривих втоми на великих базах навантажування з урахуванням частоти циклів та температури розігріву зразків під час випробування. Порівняння результатів прогнозування з даними випробувань на втому показало достовірність методики.

Ключові слова: опір утомі, частота навантажування, прогнозування, температура розігріву.

Вступ. На сьогодні задача отримання достовірних даних щодо опору утомі конструкційних матеріалів на великих базах періодичного навантажування залишається актуальною для багатьох галузей економіки України: атомної енергетики, космосу, транспорту, машинобудування та ін. Матеріальні та часові витрати для забезпечення випробувань на втому з експлуатаційними частотами навантажування на базах понад 10^7 цикл очевидні. Відмовитися від тривалих випробувань, віддавши перевагу розрахунковим методам, не вдається, адже необхідно враховувати різноманітні експлуатаційні, конструкційні та технологічні чинники, що визначають характеристики опору утомі конструкційних матеріалів.

У роботах [1–3] робилася спроба окреслити проблеми міцності матеріалів на різних структурних рівнях для гігациклової втоми. Було розглянуто особливості утомного руйнування металів у широкому діапазоні баз навантажування (до 10^{10} цикл), запропоновано класифікацію видів втоми за числом циклів експлуатаційного навантажування. Проаналізовано чинники, що контролюють руйнування конструкційних матеріалів на великих базах навантажування за амплітуд напружень, близьких до границі витривалості. Важливим є визначення характеристик опору утомі на великих базах навантажування у корозійному середовищі [4].

Результати випробувань на великих базах показують, що криві багатоциклової втоми можуть мати розриви [2], тобто у певних діапазонах циклів навантажування не спостерігається монотонності зниження кривих втоми. Причинами таких розривів на графіках, що описують дані випробувань на втому за циклів навантажування від 10^5 до 10^8 і більше, на думку багатьох учених, є наявність водночас кількох механізмів накопичування утомного пошкодження [5, 6] та невідповідність умов проведення випробувань на втому за різних рівнів циклічних напружень, зокрема саморозігрівання зразків за амплітуд циклічного навантажування вище границі витривалості [7].

Мета роботи – представити методику прогнозування циклічної довговічності конструкційних матеріалів на базах $10^8 \dots 10^{10}$ цикл і більше за даними високо-частотних випробувань.

Методика і результати випробувань на втому. Для отримання результатів випробувань на втому на різних частотах навантажування з метою оцінки впливу

* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Київ, 2013).

частоти на характеристики опору утомі використовували дослідницькі стенди електромагнітного, електродинамічного та магніострикційного типів, що дозволило виконати випробування з частотами від 100 до 10000 Гц. Всі випробувальні машини було забезпечено пристроями для автоматичного підтримання параметрів навантажування, похибка вимірювання і стабілізації амплітуди навантажування не перевищувала 3%. На всіх реалізованих частотах навантажування за однорідного розтягу–стиску випробовували циліндричні зразки з однотипною робочою частиною діаметром 7 мм та однаковою чистотою обробки поверхні. Для зниження температури поверхні зразків матеріалів, які розігрівалися у процесі високочастотних випробувань, застосовували інтенсивне охолодження [7].

Як приклад на рис. 1 наведено результати визначення границь витривалості зразків досліджуваних конструкційних матеріалів на однаковій базі ($2 \cdot 10^7$ цикл) за різних частот навантажування і коефіцієнтів асиметрії циклів R .

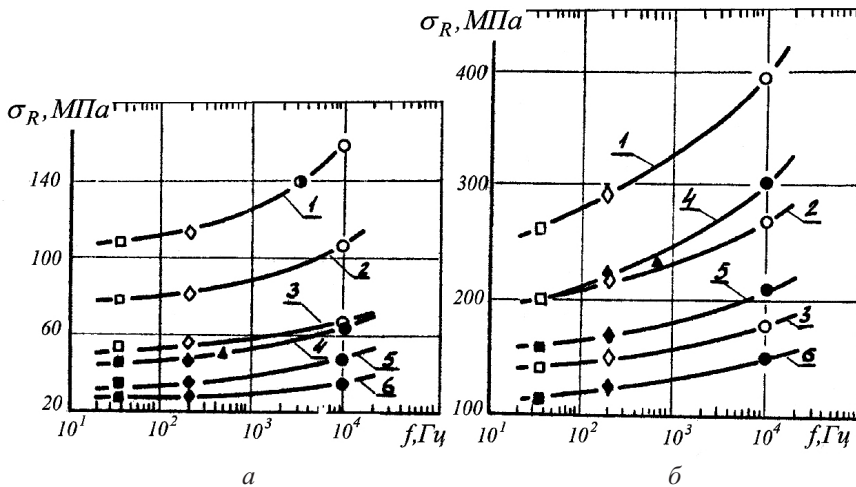


Рис. 1. Залежність границь витривалості зразків зі сплавів АМг6В (а) і ЕП202 (б) від частоти навантажування: 1–3 – гладкі зразки; 4–6 – зразки з концентратором напружень (1, 4 – $R = -1$; 2, 5 – $R = 0$; 3, 6 – $R = 0,5$).

Із представлених даних видно, що частота циклічного навантажування монотонно впливає на характеристики опору утомі конструкційних матеріалів. Цю обставину можна використати для прогнозування циклічної довговічності на великих базах низькочастотного навантажування за результатами високочастотних випробувань.

Методика прогнозування кривих утоми. У роботі [8] криву утоми у широкому діапазоні циклів навантажування було запропоновано представляти у логарифмічних координатах у вигляді двох нахилених до осі ординат відрізків, з'єднаних горизонтальною прямою з координатами кінців $N_1 = 2 \cdot 10^6$ і $N_2 = 5 \cdot 10^7$. Нахил правого відрізка, що описує хід кривої утоми для довговічностей понад $5 \cdot 10^7$ цикл, приймають вдвічі меншим, ніж нахил лівого відрізка кривої утоми (для $N \leq 2 \cdot 10^6$ цикл). Але наявних експериментальних і теоретичних даних недостатньо, щоб показати, який вигляд будуть мати відрізки кривої утоми за впливу технологічних чи експлуатаційних чинників. Результати випробувань на базі 10^7 цикл також не дозволяють зробити однозначний висновок щодо розташування кривої утоми на базах навантажування до 10^{10} цикл і більше. Тому є достатньо обґрунтованим використання для побудови кривих утоми на експлуатаційних (низьких) частотах даних високочастотних випробувань.

Для прогнозування циклічної довговічності елементів конструкцій, що мають великий ресурс (на базах $10^8 \dots 10^{10}$ цикл і більше), за даними випробування зразків на високошвидкісній машині для випробувань на втому було використано раніше [9] описаний метод. Для прогнозування кривої втоми при експлуатаційній (низькій) частоті навантажування за результатами високочастотних випробувань на втому запропоновано співвідношення, що пов'язує механічні, теплофізичні та непружні властивості конструкційного матеріалу за втоми:

$$N = \frac{C}{\sigma_{-1B}^\alpha [(f_B/f_H)^n (T_{роз}^H/T_{роз}^B)^\chi (\sigma/\sigma_{-1B})^\beta - (\sigma/\sigma_{-1B})^\alpha]}, \quad (1)$$

де N – число циклів до зруйнування зразка конструкційного матеріалу; σ – амплітуда циклічних напружень; σ_{-1B} – границя витривалості конструкційного матеріалу на високій частоті циклічного навантажування; f_H і f_B – низька і висока частоти навантажування відповідно; $T_{роз}^H$ і $T_{роз}^B$ – середнє (стабілізоване) значення температури розігріву поверхні зразка матеріалу на низькій та високій частоті навантажування відповідно; α і β – параметри, які можна визначити з амплітудних залежностей абсолютного розсіяння енергії за цикл у конструкційному матеріалі на низькій та високій частоті навантажування; C , χ і n – константи.

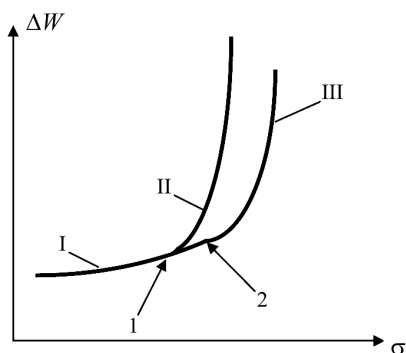


Рис. 2. Прийнятий вид залежностей розсіяння енергії за цикл навантажування металевих матеріалів для низької f_H (I-II) та високої f_B (I-III) частот навантажування.

Для виведення формули (1) використано певні припущення, які ілюструють графіки на рис. 2:

а) механізми розсіяння енергії відрізняються для циклічних напружень, які нижчі або вищі за границю витривалості матеріалу, тобто зі збільшенням рівня циклічних напружень у матеріалі перехід від одного до іншого механізму розсіяння енергії зумовлює зміну амплітудних залежностей розсіяння енергії;

б) вплив частоти навантажування у рамках розглянутої моделі враховано лише для напружень, що вищі за границю витривалості матеріалу. Значення цього параметра будуть різними для низької і високої частот навантажування;

в) за рівня амплітуди циклічних напружень, що перевищує σ_{-1B} , величина розсіяння за цикл навантажування ΔW зі збільшенням частоти навантажування зменшується;

г) амплітудні залежності розсіяння за цикл навантажування можна описати степеневими залежностями (прямими у логарифмічних координатах);

д) границя витривалості зі збільшенням частоти навантажування монотонно зростає.

На рис. 2 крива I описує зміну розсіяння енергії за цикл навантажування у зоні напружень нижче границі витривалості (точки 1 і 2 відповідають границі витривалості на низькій σ_{-1H} і високій σ_{-1B} частоті навантажування відповідно). Криві $I-III$ апроксимовано степеневими рівняннями $\Delta W_I = A\sigma^\alpha$, $\Delta W_{II} = G\sigma^\gamma$ і $\Delta W_{III} = B\sigma^\beta$, де $A, B, G, \alpha, \beta, \gamma$ – параметри.

Пропустивши проміжні викладки, можна показати, що для певних значень амплітуди циклічних напружень, що перевищують σ_{-1B} , відношення величин розсіяння енергії за цикл для низької і високої частоти навантажування можна записати у вигляді

$$\Delta W_{II} / \Delta W_{III} = (\sigma_{-1B} / \sigma_{-1H})^{\beta-\alpha} (\sigma / \sigma_{-1H})^{\gamma-\beta}. \quad (2)$$

Це дозволяє розглянути вказане відношення у вигляді добутку, перший член якого (відношення границь витривалості на високій і низькій частоті навантаження) можна інтерпретувати як частотний фактор, тобто вважати його пропорційним відношенню частот навантажування:

$$(\sigma_{-1B} / \sigma_{-1H})^{\beta-\alpha} \sim (f_B / f_H)^n. \quad (3)$$

Другий член добутку є відношенням величин перенавантаження матеріалу відносно низькочастотної границі витривалості на різних частотах навантажування. У рамках розглянутої моделі його можна вважати пропорційним відношенню температур розігріву на різних частотах навантажування для певної амплітуди циклічних напружень:

$$(\sigma / \sigma_{-1H})^{\gamma-\beta} \sim (T_{роз}^H / T_{роз}^B)^\chi. \quad (4)$$

Отже, враховуючи вищезазначені припущення, константи формули кривої втоми (1) і співвідношень (2)–(4) можна оцінити так: α, γ, β – параметри, які відповідають кутам нахилу (у логарифмічних координатах) амплітудних залежностей розсіяння енергії за цикл у конструкційному матеріалі на низькій та високій частоті навантажування за напружень до границі витривалості і вище; сталі χ і n у формулі кривої втоми зв'язані з параметрами α, γ і β , сталу C у формулі кривої втоми визначають із відношення

$$C = \Delta W_c / A, \quad (5)$$

де ΔW_c – частина величини розсіяння енергії, зумовлена дією механізму розсіяння енергії для циклічних напружень вище границі витривалості матеріалу,

$$\Delta W_c = [\Delta W_{II}(\sigma) - \Delta W_I(\sigma)]. \quad (6)$$

Для визначення п'яти параметрів: C, α, β, χ і n розроблено методику отримання експериментальних даних та розв'язання п'яти трансцендентних рівнянь [9]. Запропоновану формулу (1) було апробовано для прогнозування довговічності титанових і жароміцних нікелевих сплавів на базах до $10^9 \dots 10^{10}$ цикл навантажування [7, 9]. Такий підхід застосовано також для інших полікристалічних матеріалів, що впливає з фізичної суті параметрів формули (1) та аналогії процесів розсіяного пошкодження за втоми полікристалічних матеріалів [5].

Як приклад на рис. 3 і 4 наведено результати випробувань на втому сплавів АМг6Н, ПТ7М і побудовано згідно з формулою (1) криві втоми на різній частоті навантажування. Розрахункові криві близькі до експериментальних, що свідчить про достовірність прогнозування у межах 90%.

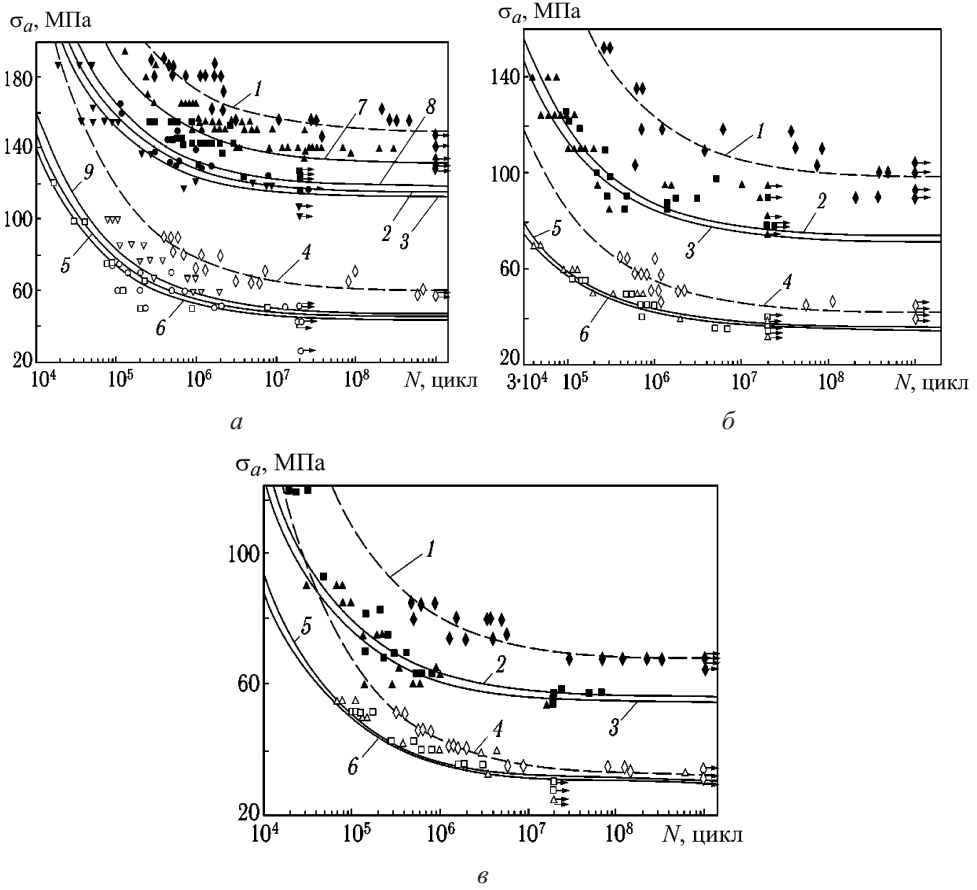


Рис. 3. Результати випробувань на втому (точки) та прогнозовані криві утоми для сплаву АМгБН: *а* – $R = -1$; *б* – $R = 0$; *в* – $R = 0,5$ (1–3, 7, 8 – гладкі зразки, 4–6, 9 – зразки з концентратором напружень) за частот навантажування 10 кГц (1, 4), 200 (2, 5), 35 Гц (3, 6), 3 кГц (7) і 500 Гц (8, 9).

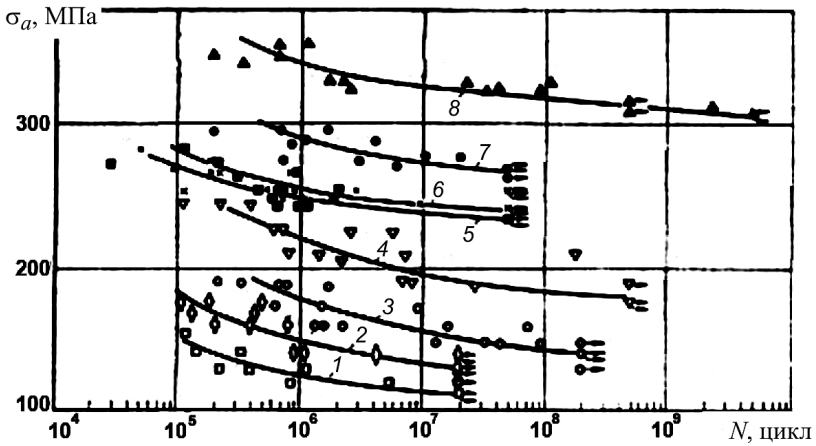


Рис. 4. Результати випробувань на втому (точки) та прогнозовані криві утоми для сплавів ВТ1-0 (1–4) та ПТ7М (5–8) за різної частоти навантажування: 1 – $f = 100$ Гц; 2 – $f = 500$ Гц; 3 і 7 – $f = 3$ кГц; 4 і 8 – $f = 10$ кГц; 5 – $f = 50$ Гц; 6 – $f = 300$ Гц.

Висновки

1. Для прогнозування циклічної довговічності елементів конструкцій, що мають великий ресурс ($10^8 \dots 10^{10}$ цикл навантажування і більше), за даними випробування зразків на високошвидкісній машині для випробувань на втому використано метод, оснований на енергетичному критерії втомного руйнування з урахуванням особливості розсіяння енергії у матеріалі за різних частот навантажування.

2. Для прогнозування кривої втоми при експлуатаційній (низькій) частоті навантажування за даними високочастотних випробувань на втому запропоновано формулу, що пов'язує механічні, теплофізичні та непружні властивості металу за втоми.

3. Розрахункові дані підтверджуються експериментальними.

Резюме

Проанализированы результаты испытаний на усталость образцов конструкционных материалов на базе до 10^{10} цикл нагружения. Предложена методика построения кривых усталости на больших базах нагружения с учетом частоты циклов и температуры розогрева образцов при испытании. Сравнение результатов прогнозирования с данными испытаний на усталость свидетельствует о достоверности методики.

1. *Ботвина Л. Р.* Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2004. – **70**, № 4. – С. 41 – 51.
2. *Махутов Н. А.* Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов // Там же. – С. 37 – 41.
3. *Матохнюк Л. Е., Войналович А. В., Яковлева Т. Ю.* Сопротивление усталости материалов на больших базах нагружения // Там же. – С. 52 – 56.
4. *Доможиров Л. И.* К определению характеристик сопротивления усталости в коррозионной среде на больших базах нагружения // Там же. – 2002. – **68**, № 10. – С. 41 – 46.
5. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 238 с.
6. *Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матохнюк Л. Е.* Особенности формирования дислокационной структуры никелевого сплава за дѣи циклического навантажування // Металознавство та обробка металів. – 2001. – № 4. – С. 19 – 25.
7. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
8. *Махутов Н. А., Гадолина И. В.* Уточнение параметров кривой усталости по результатам сравнительных испытаний при нерегулярном нагружении для сведения техногенного риска к приемлемому уровню // Математические модели техногенных и природных катастроф. – 2009. – **1**, № 1. – С. 27 – 30.
9. *Матохнюк Л. Е., Василюк И. М., Войналович А. В., Соколинский А. Б.* Применение методов высокочастотного нагружения для прогнозирования долговечности материалов на больших базах // Пробл. прочности. – 1988. – № 3. – С. 58 – 63.

Поступила 14. 11. 2013