

# МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## MECHANICS AND MATERIALS SCIENCE

УДК 539.431

П.Ясній, докт.техн.наук; Ю.Пиндус, канд.техн.наук; В.Фостик

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

### ВПЛИВ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНІСТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ D16T

Подано методику досліджень та визначено основні характеристики циклічної тріщиностійкості алюмінієвого сплаву марки D16T з урахуванням асиметрії циклу навантаження. Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) та визначено коефіцієнти рівняння Ердогана-Ратвані, яке описує всі ділянки КДВР за різних асиметрій циклу навантаження.

P. Yasniy, Yu. Pyndus, V. Fostyk

### INFLUENCE OF STRESS RATIO ON CHARACTERISTICS OF CYCLIC CRACK RESISTANCE OF ALUMINIUM ALLOY D16T

The technique of researches and the main characteristics of crack resistance of D16T aluminum alloy are presented. Crack growth rates diagrams are given and parameters of Erdogan-Ratvani fatigue crack growth model under variable stress ratios were determined.

На сучасному етапі розвитку механіки руйнування матеріалів вже достатньо глибоко досліджено закономірності втомного руйнування та визначено основні характеристики циклічної тріщиностійкості більшості конструкційних сплавів на стадії поширення втомних тріщин. Відомо, що основним параметром, який характеризує напружений стан у вершині втомної тріщини пружного тіла і контролює швидкість її росту, є коефіцієнт інтенсивності напруження (КІН)  $K$  [1]. Швидкість росту втомної тріщини (РВТ) суттєво залежить від коефіцієнта асиметрії циклу навантаження, який визначається як відношення мінімального до максимального КІН циклу навантаження  $R = K_{\min} / K_{\max}$  [2]. Одними із найважливіших характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу є кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР). Сімейства КДВР матеріалу характеризують залежність швидкості росту тріщини (РВТ) (приросту тріщини за цикл навантаження)  $dl/dN$  від максимального КІН  $K_{\max}$  або розмаху КІН  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ , а також від асиметрії циклу навантаження. Аналітичне (формульне) представлення КДВР дає можливість прогнозувати РВТ методом подциклового підрахунку приросту тріщини. Аналітичні вирази, які описують КДВР, є базовими для більшості моделей та методик прогнозування РВТ.

Типові КДВР будують у логарифмічних координатах, які обмежуються зліва пороговим коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{th}$ , нижче якого РВТ не відбувається, а справа критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень або циклічною в'язкістю руйнування  $K_{fc}$ .  $K_{fc}$  і  $K_{th}$  є важливими характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалу.

Швидкість РВТ залежить від багатьох факторів: механічних (амплітуда напружень, асиметрія циклу навантаження, частота), металургійних (мікроструктура, наявність включень, характер легування), фізико-хімічних (температура, середовище, радіаційний вплив) та геометричних розмірів тіла [2-7].

Слід відзначити важливе значення металургійних факторів, оскільки механічні властивості, хімічний склад та характеристики тріщиностійкості можуть відрізнятися у різних плавках одного й того ж сплаву. Це об'єктивно призводить до підвищення похибки кінцевого результату теоретичних розрахунків швидкості РВТ та прогнозування втомної довговічності конструкцій з тріщинами. Таким чином, для адекватної аналітичної оцінки РВТ доцільно будувати КДВР для кожної плавки матеріалу, особливо у випадках, коли КДВР планується використовувати для подальших наукових досліджень.

Відомо багато математичних моделей, які описують одну або декілька ділянок КДВР [8].

З урахуванням простоти і зручності, найчастіше використовують залежність запропоновану Перісом [9]:

$$dl/dN = C(\Delta K)^n. \quad (1)$$

Формула Періса адекватно описує лише середньоамплітудні ділянки КДВР, лінійну у логарифмічних координатах. Суттєвим недоліком цієї формули є те, що вона не враховує впливу асиметрії циклу навантаження. Разом з тим, формула (1) є базовою для більш складніших аналітичних виразів, які описують КДВР.

Із залежностей, котрі враховують вплив коефіцієнта асиметрії циклу навантаження на швидкість РВТ, найбільш відомою є формула Формена [10]:

$$dl/dN = \frac{C \cdot \Delta K^n}{[(1-R)K_{fc} - \Delta K]^m}, \quad (2)$$

яка задовільно описує середньоамплітудну та високоамплітудну ділянки КДВР. Її часто використовують у моделях РВТ за нерегулярного (експлуатаційного) навантаження, які враховують ефект затримки РВТ після перевантаження розтягом [11].

З літератури відома велика кількість залежностей, які описують всі три ділянки КДВР і враховують асиметрії циклу навантаження, зокрема модель запропонована МакЕвелі [12]

$$dl/dN = A(1-R)^2 \frac{K_{\max}^2 - K_{th}(K_{fc} - R \cdot K_{\max})}{K_{fc} - K_{\max}}, \quad (3)$$

та модель Ердогана-Ратвані [8]:

$$V = A \cdot (1-R)^n \frac{(K_{\max} - K_{th})^m}{K_{fc} - K_{\max}}. \quad (4)$$

Вказані залежності мають недоліки:

- вони є параметричними і не розкривають фізичної суті процесів, які відбуваються у вістрі тріщини;
- КІН, які входять у ці формули, є параметрами лінійної механіки руйнування і не можуть використовуватись для аналізу напруженого стану за значних пластичних деформацій матеріалу у вістрі тріщини;
- вони не описують кінетику росту коротких тріщин, які відіграють значну роль в загальній довговічності конструкції;
- вони не можуть претендувати на універсальність, оскільки залежать від великої кількості факторів: умов навантаження, геометричних розмірів зразка, температури випробувань тощо. Тобто експериментальні дослідження для побудови КДВР необхідно проводити у кожному конкретному випадку.

Проте, не заважаючи на вказані недоліки, КДВР є найбільш дієвими і найчастіше використовуваними характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалів. КДВР є необхідними для оцінки втомної довговічності елементів конструкцій і для розробки нових наукових підходів до прогнозування РВТ.

**Методика досліджень.** Для дослідження основних характеристик циклічної тріщиностійкості використовували плоскі прямокутні зразки з центральною тріщиною, виготовлені з алюмінієвого сплаву марки Д16Т, згідно з ГОСТ 25.506-85. Конструкція зразків ємтис панель обшивки крила транспортного літака з отвором під заклепку [13]. Креслення зразка зображене на рис.1. Механічні властивості та хімічний склад сплаву подані в табл. 1.

Випробування проводили на сервогидравлічній машині типу СТМ-100 з керуючим ПК типу ІВМ РС АТ 286. Температура випробувань 293 К, частота навантаження 10 Гц, асиметрія циклу навантаження  $R$  рівна: 0; 0,2; 0,4; 0,6. Форма циклу навантаження - синусоїда.

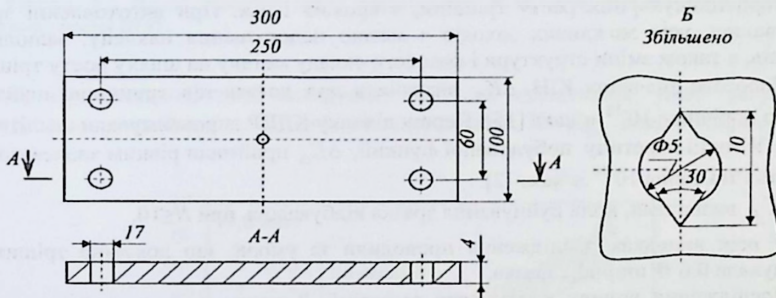


Рисунок 1 - Прямокутний зразок з концентратором із сплаву Д16Т.

Дослідження РВТ проводили згідно з вимогами [13]. Тріщину ініціювали при зусиллях, які розрахунково забезпечували б швидкість РВТ  $V = 5 \cdot 10^{-8}$  м/цикл. Залікові покази починали знімати при досягненні тріщиною довжини 9 мм в обидва боки від осі зразка з метою стабілізації динамічної рівноваги і усунення впливу концентратора на характеристики тріщиностійкості металу.

Таблиця 1 - Хімічний склад та механічні властивості сплаву марки Д16Т

| Cu, %                | Mg, % | Mn, %                     | Fe, % | Si, % | Ni, % | Zn, %            | Ti, % | Al     |
|----------------------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|--------|
| 4,34                 | 1,57  | 0,60                      | 0,40  | 0,43  | 0,08  | 0,25             | 0,06  | основа |
| $\sigma_{0,2}$ , МПа |       | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа |       | HV    |       | Модуль Юнга, МПа |       |        |
| 318                  |       | 433                       |       | 160   |       | 68669            |       |        |

Суть випробування базувалась на послідовному вимірюванні приросту тріщини  $\Delta l$  від числа циклів  $\Delta N$ . Вимірювання приросту тріщини проводили при її підростанні на величину не менше 0,1 мм. Результати вимірювань отримували у вигляді таблиці  $\Delta l / \Delta N$ . За цими даними розраховували швидкість РВТ як певний усереднений приріст за один цикл  $dl/dN = \Delta l / \Delta N$  і ставили їй у відповідність параметр руйнування – максимальний КІН  $K_{\text{max}}$ , який визначали за відомою формулою

$$K_{\max} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi l} \cdot Y, \quad (5)$$

де  $\sigma_{\max} = P_{\max}/F$  - максимальне напруження (брутто) циклу навантаження;  
 $P_{\max}$  - максимальне зусилля циклу навантаження;  $F$  - площа поперечного перерізу зразка;  $l$  - половина довжини тріщини;  $Y$  - поправкова функція яка розраховується за формулою [14]

$$Y = \left[ 1 - 0,025 \left( \frac{l}{W/2} \right)^2 + 0,06 \left( \frac{l}{W/2} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \frac{\pi \cdot l}{W}}, \quad (6)$$

де  $W$  - ширина зразка;  $l$  - половина довжини тріщини.

КДВР будували в подвійних логарифмічних координатах.

Спостереження за тріщиною здійснювали оптичним способом з використанням мікроскопа типу МБС-10.

Робочу ділянку зразка (вздовж ліній росту тріщини шириною 10 мм) додатково полірували для досягнення шорсткості в межах 0,05 та здійснювали розмітку у вигляді рисок, перпендикулярних росту тріщини, з кроком 1 мм. При виготовленні зразків дотримувались усіх можливих заходів з метою недопущення наклепу, залишкових напружень, а також зміни структури і фазового складу металу на шляху росту тріщини.

Порогове значення КІН  $\Delta K_{th}$  визначали при досягненні тріщиною швидкості росту, що дорівнює  $10^{-10}$  м/цикл [15]. Першу ділянку КДВР апроксимували аналітичним виразом. У точці перетину побудованої функції,  $\Delta K_{th}$  приймали рівним значенню коли швидкість РВТ рівна  $10^{-10}$  м/цикл [2].

$K_{fc}$  визначали, коли руйнування зразка відбувалось при  $N \leq 10$ .

У всіх випадках дослідження проводили за умови, що довжина тріщини не перевищувала 0,6  $W$  ширини зразка.

Дослідження впливу коефіцієнта асиметрії  $R$  циклу навантаження на розмах порогового КІН  $\Delta K_{th}$  здійснювали згідно з рекомендаціями [2,15].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для врахування впливу асиметрії циклу навантаження  $R$  на значення  $\Delta K_{th}$  (рис. 2) використовували формулу

$$\Delta K_{th} = (1 - R)^{\chi} \Delta K_{th0}, \quad (7)$$

де:  $\chi = 0,57$  - стала матеріалу, яку визначали методом найменших квадратів;

$\Delta K_{th0} = 2,58 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  - значення порогового КІН при  $R=0$ .

Встановлено, що при збільшенні коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R$  значення розмаху порогового КІН  $\Delta K_{th}$  зменшується на 40 % (табл.2) і не впливає на зміну циклічною в'язкістю руйнування  $K_{fc}$ .

Таблиця 2 - Характеристики циклічної тріщиностійкості сплаву Д16Т

| $R$                                        | 0    | 0,2   | 0,4   | 0,6  |
|--------------------------------------------|------|-------|-------|------|
| $\Delta K_{th}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ | 2,47 | 2,088 | 1,686 | 1,28 |
| $K_{fc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$        | 50   | 50,3  | 51,08 | 51,2 |

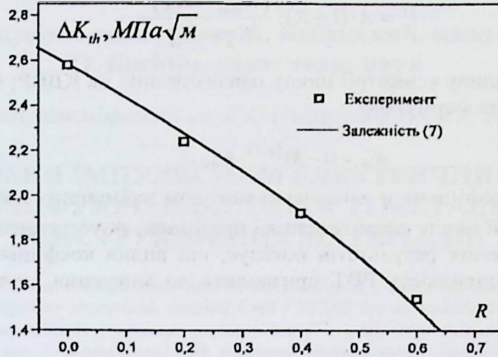


Рисунок 2 - Вплив асиметрії циклу навантаження  $R$  на зміну значень порогового КІН в алюмінієвому сплаві Д16Т.

Експериментальні дані швидкості РВТ за визначених умов регулярного навантаження, в подвійних логарифмічних координатах  $V \sim K_{max}$  подано на рис.3.

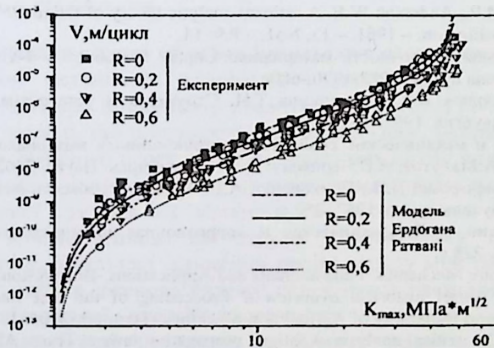


Рисунок 3 - Кінетичні діаграми втомного руйнування сплаву Д16Т за різних асиметрій циклу навантаження.

Для аналітичного відображення експериментальних даних швидкості РВТ при  $R=0$  використовували рівняння Ердогана-Ратвані, наступного вигляду:

$$V = A \frac{(K_{max} - K_{th})^m}{K_{fc} - K_{max}} \quad (8)$$

де:  $A=3 \cdot 10^{-8}$  та  $m=2,6$  - сталі матеріалу, визначені методом найменших квадратів при  $R=0$ ;  $K_{th}=2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  - значення порогового КІН, при  $R=0$ .

Аналітичний опис експериментальних даних швидкості РВТ при  $R=0,2; 0,4; 0,6$  проводили за формулою (4):

$$V = A \cdot (1 - R)^q \frac{(K_{\max} - K_{th})^n}{K_{fc} - K_{\max}},$$

де:  $q$  – коефіцієнт впливу асиметрії циклу навантаження на КДВР;  $K_{th}$  – пороговий КІП, який розраховували за формулою

$$K_{th} = (1 - R)^{(x-1)} \cdot K_{th0}. \quad (9)$$

При цьому коефіцієнт  $q$  визначали методом найменших квадратів для кожного коефіцієнта асиметрії циклу навантаження і приймали, як усереднене значення  $q=2.6$ .

Аналіз наведених результатів показує, що вплив коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R$  на швидкість РВТ призводить до зниження швидкості РВТ на всіх ділянках КДВР.

### Висновки

1. Визначено параметри моделі Ердогана-Ратвані та здійснено задовільний опис повних КДВР алюмінієвого сплаву марки Д16Т за різних асиметрій циклу навантаження.
2. Досліджено вплив коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R$  на основні характеристики циклічної тріщиностійкості сплаву Д16Т. Встановлено незначну зміну циклічної в'язкості руйнування  $K_{fc}$  та зниження  $\Delta K_{th}$  на 48% із збільшенням  $R$  від 0 до 0,6.

### Література

1. Paris P.C., Gomez M.P., Anderson W.E. A rational analytic theory of fatigue // The Trend in Engineering the University of Washington. – 1961. – 13, No1. – P.9–14.
2. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. Пособие: В 4-х т. Т.4 / Под ред. В. В. Панасюка.-К.:Наукова думка, 1988-1990.-680с.
3. Гринберг Н.М., Сердюк В.А., Малинкина Т.И. Структура и усталостная прочность магнєвєх сплавов.-М.: Металлургия, 1991.-153 с.
4. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / В.В.Москвичев, Н.А.Махутов, А.П.Черняев и др. -Новосибирск: Наука, 2002.-334 с.
5. Трошенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении.-К.: Наукова думка, 1987.-252 с.
6. Чечулин Б.Б., Хесин Ю.Д. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов. -М.: Металлургия, 1987.-228 с.
7. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.-Boca Raton: CRC Press, 1991.-793 с.
8. Toth L. Fatigue – A brief historical overview // Proceeding of the 1-st International Conference on Dynamics, Strength and Reliability of Agricultural Machines.-Тернопі.-2004.-P. 10-39.
9. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of fatigue propagation laws // Trans. ASME. J.Basic.Eng.-1963.-85, N 4.-P. 528–534.
10. R.G. Forman, V.E. Kearney, R.M. Engle. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures // Basis. Eng. Trans. ASME D 89, 1967. – P.459.
11. Nelson D.V., Fuchs H.O. Prediction of fatigue crack growth under irregular loading // American society for testing and materials. – 1976. – P.267-291.
12. McEuliy A.J. Phenomenological and microstructural aspects of fatigue // Microstructure and design of alloys.-London: Metals Society.-1974.-P. 204-225.
13. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов. – 1983. – 95 с.
14. Johnson W. S. Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading.-Philadelphia(Pa): ASTM STP No748, 1981, P. 85-102.
15. Herold H., Streitenberger M., Zinke M., Orazi L., Cammarota G. An experimental and theoretical approach for an estimation of  $\Delta K_{th}$  // Engineering Fracture Mechanics.-Blackwell Science Ltd.-2000.-Vol. 23.-P.805-812.

Одержано 14.01.2007 р.