

УДК 620.179.1

М.В. Карускевич, к.т.н, доц.
А.Д. Погребняк, к.т.н, доц.
Т.П. Маслак, асп.
С.В. Щепак, асист.

ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАКОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ АСИМЕТРИЧНОМУ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Проведено порівняльний аналіз ефективності використання двох методів оцінювання залишкової довговічності при асиметричному циклічному навантаженні. Показано, що метод, який ґрунтується на визначенні параметрів деформаційного рельєфу, що формується на поверхні плакованого алюмінієвого сплаву Д-16АТ, може конкурувати з відомим методом, який передбачає урахування показників асиметрії та використовує діаграму граничного стану матеріалів.

Comparative efficiency analysis of the two methods of the residual fatigue life estimation under asymmetric cyclical loading has been conducted. It is shown, that the method, based on the determination of the developed on the surface of aluminium alloy D-16AT deformation relief parameters has every reason to compete with known approach, that takes into account indices of asymmetry and uses the diagram of the material's ultimate state.

асиметричне циклічне навантаження, граничний стан, деформаційний рельєф, довговічність, плаковальний алюмінієвий сплав

Постановка проблеми

Важливі елементи багатьох сучасних конструкцій у процесі експлуатації часто зазнають сумісної дії статичних і циклічних навантажень у широкому діапазоні зміни довговічності та асиметрії циклу. Причиною передчасної відмови в роботі елементів планера літальних апаратів, лопаток і дисків газових турбін, осей вагонних коліс, паропроводів і теплообмінників та зниження несучої здатності є, зазвичай, втомні руйнування.

Статична компонента циклу експлуатаційного навантаження впливає на опір втомі матеріалу і відповідно на довговічність конструкції. Особливо актуальним є урахування асиметрії циклу напружень при багатоцикловому навантаженні, при якому втомне руйнування не супроводжується накопиченням значних макроскопічних деформацій і виникає раптово. У цих умовах втомну міцність прийнято оцінювати на основі діаграм граничних напружень Сміта або Хейя, які встановлюють взаємозв'язок граничних статичних і циклічних напружень для фіксованих значень довговічності. Такі діаграми будують на основі результатів експериментальних досліджень, які включають випробування на короткочасну або тривалу статичну міцність і на втому за декількох значень середнього напруження.

Альтернативою експериментальному методу побудови діаграм граничних напружень є емпіричні залежності, які дають змогу розраховувати характеристики опору втомі під дією статичних навантажень за експериментальними даними, отриманими під час втомних випробувань в умовах симетричних циклів і у процесі короткочасних статичних випробувань на розтягування, згин чи кручення.

У роботах [1–3] запропоновано новий підхід до побудови діаграм граничних напружень конструкційних матеріалів, який ґрунтується на використанні ступеневої трансцендентної функції і розроблених моделях граничного стану. Моделі, апробовані під час побудови діаграм граничних напружень для металевих і композитних матеріалів, показали задовільний збіг розрахунку з експериментальними даними [4]. Оцінювання поточного стану матеріалу і залишкової довговічності за конкретної комбінації циклічних і статичних напружень викликає практичний інтерес у багатьох випадках.

У роботах [5; 6] показано, що процес вичерпання циклічної довговічності металів навіть при однорідному напруженому стану, протікає неоднорідно по об'єму металу, а ініціюється і більш інтенсивно розвивається в його поверхневому шарі. В умовах неоднорідного напруженого стану роль поверхні зростає у зв'язку з наявністю градієнта напружень.

Натепер залежність циклічної довговічності від факторів, які формують стан поверхневого шару матеріалу, вивчена досить докладно [7; 8]. Встановлено вплив чистоти поверхні, напруженого стану, дії агресивних середовищ та інших факторів. Запропоновані численні методи підвищення довговічності та надійності деталей машин через зміцнення їх поверхні. Разом з тим багато питань, пов'язаних з оцінюванням ролі поверхні у вичерпанні циклічної довговічності, залишаються відкритими. Актуальним може бути проведення досліджень, спрямованих, перш за все, на отримання кількісних оцінок відповідних закономірностей з метою розроблення критеріїв втомного руйнування як основи для методів розрахунку.

Сучасні методи контролю фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів не завжди відповідають усім визначеним вимогам. Різноманітність застосовуваних конструкційних матеріалів, умов їх навантаження, вимог до чутливості методів діагностики визначають необхідність створення спектру методів і методик.

Мета – оцінювання ефективності урахування асиметрії циклічного навантаження під час визначення накопиченого втомного пошкодження та прогнозування залишкового ресурсу плакованих алюмінієвих конструкційних сплавів.

Постановка завдання

У роботах [9; 10] було запропоновано новий параметр пошкодження, який характеризує насиченість поверхні слідами мікропластичної деформації, подано методику його автоматизованого визначення, досліджено розподілення параметра пошкодження поблизу концентратора напруження, проведено моніторинг параметра пошкодження у процесі циклічного навантаження.

У роботах [9; 10] було досліджено деформаційний рельєф біля концентратора напружень у вигляді отвору на інкубаційній стадії втоми, тобто до появи втомної тріщини.

Залежність параметра пошкодження, який визначається як відношення площі поверхні з ознаками мікропластичної деформації до загальної площі поверхні, що контролюється в локальному об'ємі біля концентратора напружень від кількості циклів навантаження, найбільш коректно описується логарифмічною функцією (рис. 1).

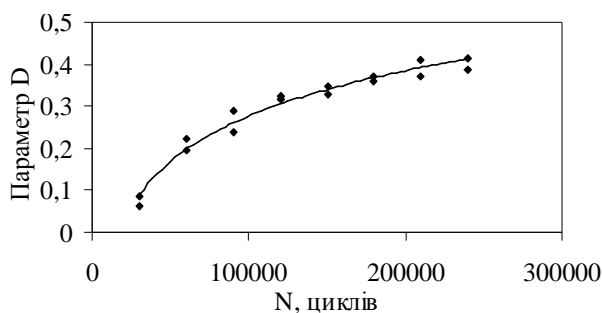


Рис. 1. Залежність параметра пошкодження від кількості циклів навантаження при $\sigma_{\max} = 68,7$ МПа

Заміри виконано біля отвору при $\sigma_{\max} = 68,7$ МПа, $N_{\text{руйн}} = 384\,400$ циклів, рівняння апроксимуючої лінії $D = 0,156 \ln N - 1,5173$ та квадрат коефіцієнта кореляції $R^2 = 0,97$.

Останнім часом отримано дані про еволюцію деформаційного рельєфу біля кінчика тріщини.

Типову залежність, отриману під час випробування зразків з боковим надрізом показано на рис. 2.



Рис. 2. Залежність параметра пошкодження у кінчику тріщини від довжини тріщини при $\sigma_{\max} = 39,24$ МПа

Визначення зв'язку параметрів деформаційного рельєфу з коефіцієнтом інтенсивності у кінчику тріщини надасть можливість удосконалити методику прогнозування кінетики втомних тріщин у плакованих алюмінієвих сплавах.

У поданій роботі на основі результатів досліджень деформаційного рельєфу біля концентратора напружень на інкубаційній стадії втоми показана можливість прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій, що підлягають сумісній дії циклічних і статичних навантажень. Розглянуто втомне руйнування гладких плоских зразків з алюмінієвого сплаву Д-16АТ. Для захисту від корозії листовий сплав Д-16АТ плаковано чистим алюмінієм, товщина плакованого шару становить 5–7 % товщини листа.

Саме плакований шар є носієм інформації про накопичене втомне пошкодження.

Зразки навантажувались осьовим змінним навантаженням, яке змінювалось за асиметричним циклом

$$\rho = \rho_m h(t) + \rho_a g(n),$$

де

m, a – статична та циклічна компоненти діючого навантаження;

$h(t)$ – одинична функція Хевісайда:

$$(h = 0, \text{ якщо } t < 0; h = 1, \text{ якщо } t \geq 0);$$

t – фізичний час;

$g(n)$ – невідома періодична функція кількості циклів n ($n = ft$) зміни циклічної компоненти;

f – частота навантаження.

Напруження асиметричного циклу задамо через максимальне σ_{\max} і мінімальне σ_{\min} напруження.

При цьому значення статичної σ_m і циклічної σ_a компонентів можна визначити за виразами:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2};$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}.$$

Кількісними показниками асиметрії циклу навантаження є коефіцієнт асиметрії R і коефіцієнт амплітуд A_σ .

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}};$$

$$A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}.$$

Для досліджуваної області багатоциклової втоми характерна довговічність $n \geq 10^5 \dots 10^6$ циклів. Частота циклічної компоненти f становила 25 Гц. Максимальне напруження при цьому не перевищувало границю плинності матеріалу. Втоми руйнування в таких умовах не супроводжується накопиченням пластичних деформацій і є квазікрихким за кімнатної температури випробувань.

Методика прогнозування довговічності за діаграмою граничного стану

Діаграма граничного стану при асиметричному навантаженні може бути описана наближенням рівнянням моделі [4]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^\lambda, \quad (1)$$

де

σ_a і σ_m – компоненти асиметричного циклу навантаження;

σ_n – границя витривалості при симетричному циклі навантаження;

σ_B – границя міцності матеріалу при розтяганні;

λ – коефіцієнт, що характеризує форму граничної діаграми.

Границю σ_n визначають з експериментально отриманого рівняння кривої втоми, що встановлює залежність між величиною n_R і σ_n та задається зазвичай у формі

$$n_R = \frac{1}{C(\sigma_n)^q} \Rightarrow \sigma_n = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (2)$$

де

C, q – коефіцієнти.

Скориставшись виразами (1), (2) запишемо рівняння для амплітуди циклічної компоненти щодо асиметричного циклу навантаження у вигляді

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^\lambda. \quad (3)$$

Коефіцієнт λ розраховують за результатами одичного базового експерименту від нульового циклу $\sigma_a = \sigma_m$ [4].

Попередні експериментальні дослідження включають випробування на короткочасну міцність з метою визначення границі міцності σ_B матеріалу і втомні випробування зразків в умовах симетричного циклу з метою отримання базової кривої втоми в координатах $\sigma - \text{Lg } N$ (рис. 3).

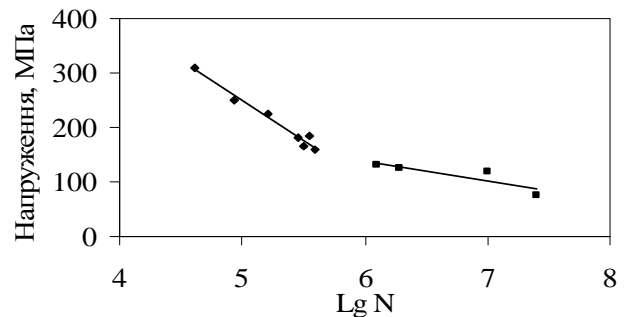


Рис. 3. Крива втоми при симетричному циклі

В результаті проведених випробувань і обробки їх результатів визначені коефіцієнти C і q в рівнянні (3) втомної кривої.

Одночасно на основі базового експерименту при віднульовому циклі, використовуючи відповідну формулу (2), визначено значення коефіцієнта λ .

За результатами втомних і короткочасних випробувань будують діаграму граничного стану для діапазону довговічності $10^5 - 2 \cdot 10^7$ циклів (рис. 4).

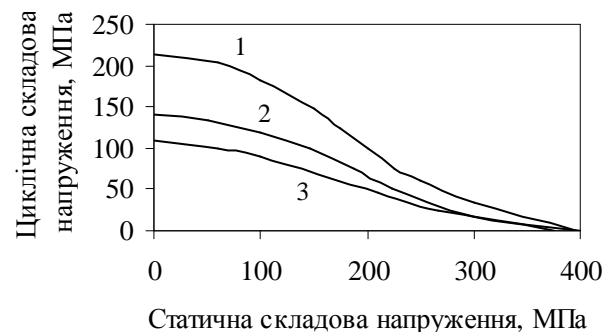


Рис. 4. Діаграма граничних амплітуд напруження сплаву Д-16АТ:

1 – довговічність 10^5 ;

2 – довговічність 10^6 ;

3 – довговічність $2 \cdot 10^7$

Методика прогнозування довговічності за параметрами деформаційного рельєфу поверхні

Методика прогнозування довговічності за параметрами деформаційного рельєфу поверхні за певних умов асиметричного навантаження (якщо $R = 0; 0,3; 0,42; 0,5; 0,6$) ґрунтується на використанні експериментальних регресійних моделей для кожного режиму. Вихідними даними для них є еволюція параметрів пошкодження поверхні у процесі навантаження.

У роботі [11] було визначено параметри структурного пошкодження поверхні матеріалу:

– параметр пошкодження D , який характеризує насиченість поверхні слідами мікропластичної деформації;

– фрактальну розмірність Dp/s , яка характеризує форму кластерів деформаційного рельєфу.

Моніторинг кількісних параметрів деформаційного рельєфу здійснювався у процесі асиметричного навантаження з різним поєднанням статичної σ_m і циклічної σ_a компонент циклу навантаження.

Запис параметра пошкодження та фрактальної розмірності здійснювався в межах до 1 млн. циклів (рис. 5; 6).

Отримані залежності кількісних параметрів деформаційного рельєфу алюмінієвого конструкційного сплаву дають можливість побудувати множинні регресійні моделі для оцінювання довговічності та залишкового ресурсу конструкції в умовах асиметричного навантаження.

Такі моделі мають вигляд:

$$N_{\text{зал}} = A - B \cdot D - C \cdot Dp/s.$$

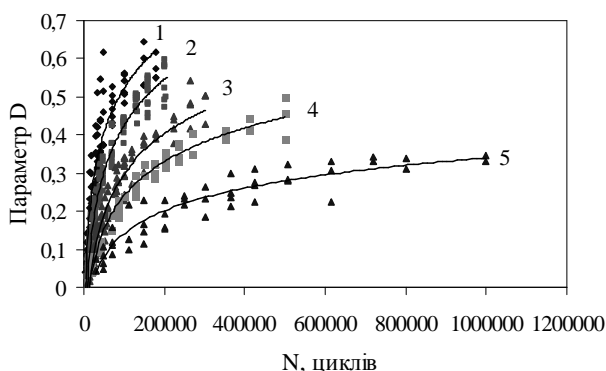


Рис. 5. Еволюція параметра пошкодження D в умовах асиметричного навантаження:

- 1 – коефіцієнт асиметрії $R = 0$;
- 2 – $R = 0,3$;
- 3 – $R = 0,42$;
- 4 – $R = 0,5$;
- 5 – $R = 0,6$

Приклад розрахунку залишкової довговічності сплаву Д16-АТ

Перед оцінюванням залишкового ресурсу треба певний об'єм попередніх експериментальних досліджень, що включає отримання необхідної вихідної інформації.

Припустимо, що треба визначити залишкову довговічність зразків алюмінієвого сплаву Д16-АТ на певному етапі дії асиметричного навантаження, який характеризується значеннями напружень циклу:

$$\sigma_{\max} = 234,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\min} = 70,12 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 82,19 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 152,31 \text{ МПа}.$$

У результаті попередніх експериментальних досліджень отримані такі значення характеристик сплаву Д16АТ:

$$\sigma_B = 430 \text{ МПа};$$

$$C = 6,686 \cdot 10^{-13};$$

$$q = 3,034;$$

$$\lambda = 3,578.$$

Вихідними даними для оцінювання довговічності сплаву Д-16АТ в умовах асиметричного навантаження напруженнями були діаграма граничного стану сплаву та результати моніторингу параметра пошкодження D та фрактальної розмірності Dp/s . Напруженому стану об'єкта, що досліджується, відповідає коефіцієнт

$$A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m};$$

$$A_\sigma = 0,54$$

або $R = 0,3$.

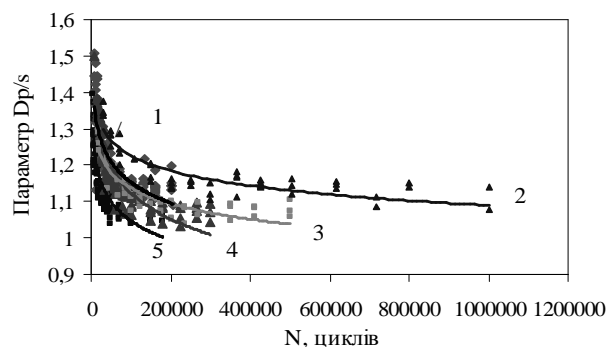


Рис. 6. Еволюція фрактальної розмірності Dp/s в умовах асиметричного навантаження:

- 1 – коефіцієнт асиметрії $R = 0,42$;
- 2 – $R = 0,6$;
- 3 – $R = 0,5$;
- 4 – $R = 0,3$;
- 5 – $R = 0$

Використовуючи діаграму граничного стану встановлюємо, що гранична довговічність в даному експерименті становить 372 000 циклів (рис. 2).

Якщо немає діаграми граничного стану, граничну довговічність можна визначити розрахунковим методом, використовуючи вираз (3). У цьому випадку нескладними обчисленнями отримуємо вираз для залишкової довговічності n_R відповідно до прийнятих умов асиметричного навантаження у вигляді

$$n_R = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^{\lambda q}}{C \sigma_a^q};$$

$n_R = 372\,000$ циклів.

Гранична довговічність може бути визначена також і за допомогою отриманих регресійних моделей, вихідними даними для якої є еволюція кількісних параметрів деформаційного рельєфу в процесі навантаження. Для поданого випадку співвідношення

$\sigma_a = 82,19$ МПа; $\sigma_m = 152,31$ МПа отримана така регресійна модель

$N_{\text{зал}} = 226,436 - 196,847D - 84,104Dp/s$.

Для розрахунку граничної довговічності, необхідно отримати поточні значення кількісних параметрів моделі після певних напрацювань.

У такому випадку ці значення відповідають $n_R = 20\,000$ циклів навантаження. Параметри деформаційного рельєфу визначалися у чотирьох точках контролю. У моделі використовується їх середнє значення. Граничну довговічність розраховують як суму кількості циклів до проведення інспекції стану поверхні і залишкової кількості циклів, яку визначають за регресійною моделлю. У такому випадку отримуємо значення $n_R = 235\,460$ циклів.

Порівняння результатів експерименту, розрахунків за діаграмами граничного стану (похибка 38 %) і за регресійними моделями еволюції деформаційного рельєфу (похибка 13 %) показують, що в останньому підході похибка значно менша, ніж у розрахунках за методом, оснований на використанні діаграми граничного стану.

Висновки

У роботі залишкову довговічність конструкційних плакованих алюмінієвих сплавів оцінювали на основі моделі граничного стану при асиметричному циклі навантаження і за результатами моніторингу стану поверхні за допомогою комп'ютеризованого оптичного методу, оснований на кількісному оцінюванні деформаційного рельєфу. В розглянутих умовах циклічного навантаження використання моделей еволюції деформаційного рельєфу забезпечило більшу точність прогнозу довговічності.

Література

1. Голуб В.П. Високотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении / В.П. Голуб, А.Д. Погребняк. – К: Наук. думка, 1994. – 228 с.
2. Голуб В.П. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / В.П. Голуб, В.И. Крижановский // Проблемы прочности. – 1994. – № 4. – С. 3 – 15.
3. Голуб В.П. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / В.П. Голуб, В.И. Крижановский, А.Д. Погребняк // Прикладная механика. – 2004. – № 11, 40. – С. 106–116.
4. Усталостная прочность металлических композитных материалов при асимметричном растяжении-сжатии / В.П. Голуб, В.И. Крижановский, А.Д. Погребняк, Е.С. Кочеткова // Прикладная механика. – 2006. – № 1. – С. 48–58.
5. Иванова В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
6. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
7. Троценко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справоч. / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский. – В 2 ч. – К: Наук. думка, 1987. – Ч. 1. – 512 с.
8. Форрест П. Усталость металлов / П. Форрест / пер. с англ. / под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
9. Моніторинг втоми конструкційних алюмінієвих сплавів / О.М. Карускевич, С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич та ін. // Вісник НАУ. – 2004. – № 1 (19). – С. 88–91.
10. Карускевич О.М. Эволюция поврежденности сплава Д16-АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины / О.М. Карускевич, С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич // Авиационно-космическая техника и технология. –Х.: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2004. – № 4 (12). – С. 29–32.
11. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М.В. Карускевич, Т.П. Маслак, Е.Ю. Корчук, А.С. Якушенко // Проблемы прочности. – 2008. – № 6. – С. 128–133.