

С.Р. Ігнатович, д.т.н., Є.В. Каран, к.т.н.,
(Національний авіаційний університет, Україна)

І.І. Джавадова
(АТ «АНТОНОВ», Україна)

Залишковий ресурс авіаційних панельних конструкцій з алюмінієвих сплавів при випадковому зростанні втомних тріщин

Запропонована модель росту втомних тріщин в алюмінієвих сплавах, у якій використовується показник степені m закону Періса. З використанням отриманих результатів проведено моделювання випадкового росту тріщини в листових конструкціях обшивки фюзеляжу літака та отримані прогнозні значення їх напрацювання до граничного значення довжини тріщини.

Вступ.

Обслуговування авіаційних конструкцій за їх фактичним станом є найбільш прийнятною стратегією, що забезпечує оптимізацію технічного обслуговування авіаційної техніки в експлуатації і яка спрямована на скорочення кількості традиційних планових форм обслуговувань. Поряд з обслуговуванням за станом може застосовуватися і стратегія прогнозного обслуговування, де у якості індексу прогнозування використовується залишковий ресурс [1]. Наприклад, для панельних конструкцій літака (обшивка фюзеляжу) прогнозується розподіл напрацювання, що відповідає росту втомних тріщин від порогового розміру виявлення a_d до критичної довжини a_f .

Прогнозування залишкового ресурсу базується на положенні щодо випадкового росту втомної тріщини. Найбільш розповсюдженою моделлю, що описує ріст втомних тріщин є степеневий закон Періса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

де a – половина довжини тріщини; N – число циклів навантажування; ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) в циклі; C і m – коефіцієнти регресії для матеріалу.

Напрацювання конструкції при зростанні тріщини в діапазоні напівдовжин від a_d до a_f визначається з рівняння (1) як

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_d}^{a_f} \frac{da}{(\Delta K)^m}, \quad (2)$$

Згідно з моделлю (1) випадковий ріст тріщини при детермінованому ΔK буде визначатися випадковими величинами коефіцієнтів C і m .

Треба зазначити, що в абсолютну більшість моделей випадкового росту втомних тріщин, побудованих на базі рівняння (1), закладається кореляційна залежність між коефіцієнтами m і C . Це положення має фундаментальне значення для опису випадкового росту втомних тріщин – воно дає можливість використовувати при моделюванні один параметр (C або m) замість двох [2].

Метою роботи є отримання залежності між коефіцієнтами m і C закону Періса для алюмінієвих сплавів, побудова моделі випадкового росту втомних

тріщин і на її базі отримати прогностичний розподіл залишкової довговічності авіаційних листових конструкцій на стадії росту тріщин від початкової до критичної довжини.

Модель випадкового росту втомних тріщин.

Питання наявності кореляції між коефіцієнтами m і C степеневому закону Періса вже багато років є дискусійним [3].

Вважається, що константи закону Переса залежать від умов випробувань (асиметрії циклу навантаження $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$, геометрії та розмірів зразків і т.п.) але не є константами матеріалу [3]. Головне те, що в багатьох експериментальних дослідженнях різних за класом матеріалів (сталі, кольорові сплави) підтверджується кореляція між цими параметрами. Для металевих матеріалів величина $\log C$ лінійно зменшується зі збільшенням значень m . Виходячи з цього, можна записати

$$C = \frac{V_F}{\Delta K_F^m}, \quad (3)$$

де V_F і ΔK_F – постійні, причому V_F має розмірність швидкості росту тріщини, а ΔK_F – розмірність КІН.

Зі співвідношення (3) випливає відома експериментальна залежність:

$$\log C = \log V_F - m \cdot \log \Delta K_F. \quad (4)$$

Тоді запис закону Періса (1) з врахуванням (3) буде мати вигляд

$$\frac{da}{dN} = V_F \left(\frac{\Delta K}{\Delta K_F} \right)^m. \quad (5)$$

При $\Delta K = \Delta K_F$ із (5) маємо $da/dN = V_F$. Тобто, якщо для набору діаграм втомного руйнування, які описуються законом Періса, виконується залежність (4), то ці діаграми мають спільну точку пересічення з координатами $(\log \Delta K_F; \log V_F)$.

Проаналізуємо експериментальні дані щодо росту втомних тріщин, які приведені в публікаціях, виключно для конструкційних алюмінієвих сплавів, хоча аналогічні результати мають місце і для інших матеріалів. Усі залежності, які будуть використовуватися, представлені для вимірів швидкості росту тріщини в м/цикл і КІН в МПа·м^{1/2}. Логарифми величин – десятинні.

Усі експериментальні дані, що аналізуються, можна розділити на лабораторні та міжлабораторні. В лабораторних дослідженнях випробування проводилися на одному чи різних матеріалах але за спільною методикою (однакові зразки, умови навантаження, способи визначення КІН). В міжлабораторних даних матеріали можуть бути однакові, але методики випробувань різні.

Класичними дослідженнями, що демонструють випадковий ріст втомної тріщини в однакових умовах випробувань одного і того ж матеріалу (лабораторні дослідження), є дослідження [4]. Досліджувався ріст втомних тріщин в центрі пластинчатих зразків з алюмінієвого сплаву 2024-T3 при коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,2$. Після обробки даних з траєкторій росту тріщин в 68 зразках, отримано [5]:

$$\log C = -6,66 - 1,04 \cdot m. \quad (6)$$

Коефіцієнт m для цих 68 зразків змінюється від 2,25 до 3,2 і має нормальний розподіл [4].

В роботі [2] проведені випробування пластинчатих зразків з множинними отворами, виготовленими зі алюмінієвого сплаву Д16 АТ. За однаковими методиками випробувань і визначення КІН було отримано 32 значень коефіцієнтів закону Періса, показник степені m змінювався у діапазоні від 1,5 до 6. Регресійна залежність між m і C (коефіцієнт кореляції $R^2=0,977$) має вигляд

$$\log C = -6,75 - 1,0955 \cdot m. \quad (7)$$

Порівняння результатів із [2] і [4], отриманих при лабораторних дослідженнях двох типів алюмінієвих сплавів, показує задовільне їх співпадіння у відповідному діапазоні значень m (рис. 1).

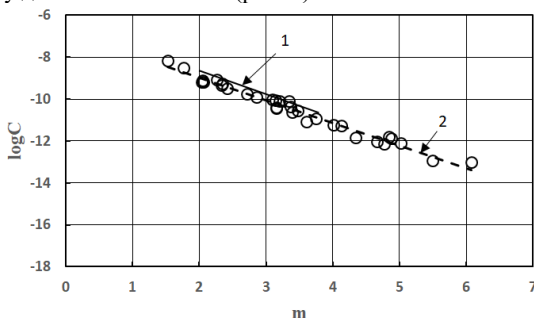


Рис.1. Залежність між коефіцієнтами закону Періса для алюмінієвих сплавів 2024 ТЗ (лінія 1) і Д16 АТ (точки і лінія 2). Лінія 1 відповідає рівнянню (6), лінія 2 – рівнянню (7).

Дані щодо кінетики росту втомних тріщин, які відносяться до міжлабораторних випробувань алюмінієвих сплавів 2024 ТЗ і 7075 Т6, приведені у роботі [6]. В ній зібрані результати випробувань різних авторів за різними методиками і приведені значення коефіцієнтів m і C діаграм втомного руйнування.

Об'єднані дані різних випробувань кінетики росту втомних тріщин для сплавів 2024 ТЗ (20 значень) і 7075 Т6 (36 значень), які приведені в роботі [6], дані для сплаву Д16 АТ (31 значення) [2], а також результати випробувань різних модифікацій алюмінієвих сплавів (20 значень) з роботи [7], представлені на рис. 2 і описуються залежністю (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,924$)

$$\log C = -6,446 - 1,1554 \cdot m. \quad (8)$$

З врахуванням значень коефіцієнтів регресії у рівняннях (4) і (8), модель (5) для росту втомних тріщин в алюмінієвих сплавах буде мати вигляд

$$\frac{da}{dN} = 3,58 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\Delta K}{14,3} \right)^m, \quad (9)$$

де швидкість росту вимірюється в м/цикл, а КІН – в МПа·м^{1/2}

Згідно з виразом (9) випадковий ріст втомної тріщини буде визначатися тільки значенням випадкової величини показника степені m .

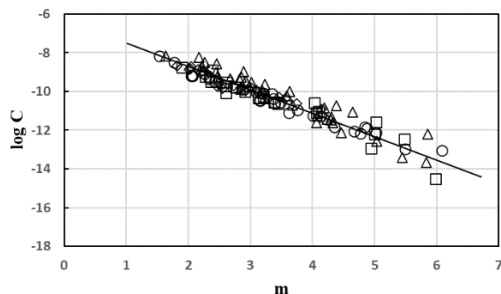


Рис.2. Узагальнена залежність між коефіцієнтами закону Періса для різних алюмінієвих сплавів. Точки (○) відповідають сплаву Д16 АТ [2]; точки (Δ) – сплаву 7075 Т6 [6]; точки (□) – сплаву 2024 Т3 [6]; точки (◇) - модифікаціям алюмінієвих сплавів [7]; лінія – регресійна залежність (8).

Для прогнозування напрацювання пошкодженої листової панелі обшивки фюзеляжу визначимо число циклів зростання втомної тріщини від порогового розміру a_d до поточної напівдовжини a_N . Використовуючи модель (9) отримуємо

$$N = \frac{14,3^m}{3,58 \cdot 10^{-7}} \int_{a_d}^{a_N} \frac{da}{(\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} = \frac{5,6 \cdot 10^6}{2-m} \left(\frac{14,3}{\Delta\sigma\sqrt{\pi}} \right)^m \left(a_N^{\frac{1-m}{2}} - a_d^{\frac{1-m}{2}} \right), \quad (10)$$

де довжина тріщини вимірюється в метрах, а напруження – в МПа.

Приймаємо наступні значення параметрів, що входять до виразу (10): $a_d=0,001$ м; $a_N=a_f=0,0463$ м; $\Delta\sigma=78,63$ МПа. Значення m використовуємо на базі статистики можливих значень цього показника для росту тріщин в алюмінієвих сплавах, які використовувалися для побудови залежності на рис. 2. Розрахунки за формулою (10) показують, що розподіл залишкової довговічності відповідає логарифмічно нормальному закону (рис. 3) з числовими характеристиками: математичне очікування $\mu[N]=249529$ циклів; середнє квадратичне відхилення $\sigma[N]=176059$ циклів.

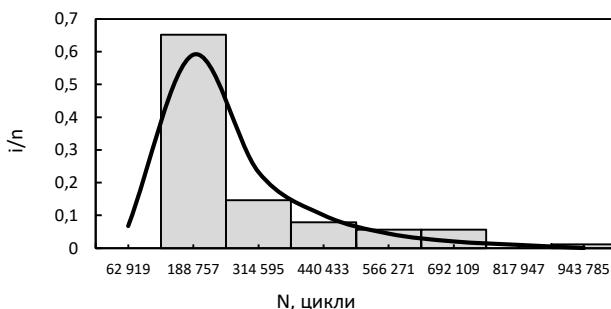


Рис. 3. Гістограма і функція щільності розподілу (лінія) залишкової довговічності для панельних конструкцій фюзеляжу літака.

Висновки

1. З врахуванням параметрів узагальненої залежності між коефіцієнтами закону Періса, запропонована модель росту втомних тріщин в алюмінієвих сплавах, у якій швидкість тріщини визначається лише одним змінним параметром – показником степені m . Ця модель може використовуватися для моделювання випадкового росту втомних тріщин з врахуванням випадкових значень параметру m .

2. З використанням запропонованої моделі проведені розрахунки залишкової довговічності панельної конструкції фюзеляжу літака з врахуванням випадкового росту втомної тріщини. Прогнозні значення напрацювання конструкції з тріщиною мають логарифмічно нормальний розподіл з числовими характеристиками, які залежать від значень початкової та граничної довжини тріщини.

Список літератури

1. Wang Y., Gogu C., N Binaud et al. Predictive air frame maintenance strategies using model-based prognostics. Proc. of Instit. of Mech. Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. – 2018. – **232** (6). – P. 690-709.
2. Ignatovich S.R., Karan E.V. Fatigue crack growth kinetics in D16AT aluminum alloy specimens with multiple stress concentrators. Strength Materials. – 2015. – No 4. – P. 586-594.
3. Carpinteri A., Paggi M. Are the Paris' law parameters dependent on each other? Frattura ed Integrità Strutturale. – 2007. – **2**. – P. 10-16.
4. Virkler D.A., Hillberry B.M., Goel P.K. The statistical nature of fatigue crack propagation. AFFDL-TR-78-43. Air Force Flight Dynamics Laboratory – 1978.
5. Baker M., Stanley I. Assessing and modelling the uncertainty in fatigue crack growth in structural steels. HSE Research Report RR643 – 2008.
6. Sinclair G.B., Pierie R.V. On obtaining fatigue crack growth parameters from the literature. Intern. Journ. of Fatigue. – 1990. – **12** No 1. – P. 57 – 62.
7. Bergner F., Zouhar G. A new approach to the correlation between the coefficient and the exponent in the power law equation of fatigue crack growth. Intern. Journ. of Fatigue. – 2000. – **22**. – P. 229 – 239.