

УДК 629.7

ВИКОРИСТАННЯ ЛОГАРИФМІЧНОГО ДЕКРЕМЕНТУ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. М. Гребенніков

m.grebennikov@khai.edu

ORCID: 0000-0001-7648-3027

О. Г. Дібір, канд. техн. наук

ag.dibir@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2366-6353

А. О. Кирпикін, канд. техн. наук

anatolkirpikin@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8883-0663

М. І. Пекельний, канд. техн. наук

m.pekelny@khai.edu

ORCID: 0000-0003-0989-2546

Національний аерокосмічний університет

ім. М. Є. Жуковського «Харківський
авіаційний інститут»,

61070, Україна, Харків, вул. Чкалова, 17

Проблема прогнозування залишкового ресурсу літаків і вертольотів є дуже актуальною з точки зору безпеки польотів. У даній роботі на базі проведених досліджень зміни механічних характеристик при накопиченні втоми матеріалів пропонується контролювати строк служби по зміні дисипативних характеристик. При втомному пошкодженні накопичувальний логарифмічний декремент згасання коливань δ зростає до граничного максимального значення δ_m , що відповідає критичній довжині магістральної втомної тріщини, яка призводить до руйнування. Граничне значення δ_m може встановлюватися залежно від кількості енергії, витраченої на розвиток магістральної втомної тріщини з урахуванням нешкідливої частини спожитої енергії. Із накопиченням втомних пошкоджень логарифмічний декремент зростає за рахунок витрат енергії на збільшення втомних тріщин і внутрішнього тертя. Це враховується коефіцієнтом α , який дозволяє виокремити небезпечну частину енергії, що йде на розвиток магістральної втомної тріщини. Задача прогнозування довговічності складається з двох етапів. Спочатку визначається δ_m для критичної довжини тріщини. Після цього за двома значеннями логарифмічного декременту при відповідних циклах навантаження за формулою Періса прогнозують кількість циклів до руйнування – до критичної довжини тріщини.

Ключові слова: ресурс, логарифмічний декремент, енергія, витрачена на руйнування, «небезпечна» частина розсіяної енергії, критична довжина тріщини.

Вступ

Проблема прогнозування залишкового ресурсу літаків і вертольотів є дуже актуальною з точки зору безпеки польотів, бо треба знати, коли слід припинити польоти через недостатню міцність конструкції. У Національному аерокосмічному університеті «ХАІ» проводилися дослідження по змінненню механічних характеристик матеріалів і конструкцій у процесі накопичення втомних пошкоджень, зокрема, модуля пружності E , коефіцієнта Пуассона μ , власної частоти коливань ω , логарифмічного декременту (ЛД) згасання коливань δ . Усі вони змінюються при накопиченні втоми, але різною мірою. Модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, частота власних коливань змінюються на 5–10%. ЛД δ збільшується на 60–80%. У ході досліджень була розроблена апаратура, яка дозволяє швидко і просто, без будь-яких датчиків вимірювати цю величину. Виходячи з цього, пропонується за результатами наших досліджень контролювати ресурс по зміні дисипативних характеристик ЛД.

Визначення енергетичних параметрів втоми і критичної довжини тріщини

При втомному пошкодженні накопичувальний ЛД δ зростає до граничного значення δ_m , що відповідає критичній довжині магістральної втомної тріщини. Величина δ_m встановлюється залежно від кількості енергії, витраченої на розвиток магістральної втомної тріщини з урахуванням нешкідливої частини спожитої енергії.

Із накопиченням втомних пошкоджень зростання ЛД відбувається за рахунок витрат енергії на збільшення втомних тріщин і внутрішнього тертя. Це враховується коефіцієнтом α [1], який дозволяє виокремити небезпечну частину енергії, що йде на розвиток магістральної втомної тріщини.

Задача прогнозування довговічності складається з двох етапів. Перший етап – визначення критичної довжини тріщини. Після цього за двома значеннями ЛД при відповідних робочих циклах

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© М. М. Гребенніков, О. Г. Дібір, А. О. Кирпикін, М. І. Пекельний, 2023

навантаження за формулою Періса прогнозують кількість циклів до руйнування – до критичної довжини тріщини.

У [1] показано, що для металів, незалежно від кількості циклів до руйнування, частка енергії, витраченої на руйнування W_d , постійна

$$W_d = N_f \left[W_{tc} - W_{-1} \left(\frac{W_{tc}}{W_{-1}} \right) \right], \quad (1)$$

де N_f – число циклів до руйнування; W_{tc} – загальна енергія, що незворотно розсіюється за цикли навантаження; W_{-1} – енергія, що розсіюється за цикл необоротно з напругою, що дорівнює межі втоми (для бази $N_f=10^7$ симетричних циклів навантаження); α – параметр втомного руйнування.

Енергія W_d називається «небезпечною» частиною розсіяної енергії від циклів деформацій, що йдуть до втомного руйнування.

ЛД δ через енергію, що розсіюється у зразку, структурі, й сумарну енергію пружних коливань визначається наступним чином:

$$\delta = \frac{\Delta W_c}{2W_c}, \quad (2)$$

де W_c – енергія пружної деформації тіла за цикл навантаження; ΔW_c – повна розсіяна необоротна енергія за цикл навантаження.

При руйнуванні граничне значення δ_m дорівнює сумі початкового значення ЛД δ_0 до втомного навантаження, приросту за рахунок небезпечної бічної розсіяної енергії δ_d і безпечної частини розсіяної енергії δ_n

$$\delta_m = \delta_0 + \delta_d + \delta_n.$$

Кількість енергії, яка витрачається на розвиток втомної тріщини за один цикл навантаження ΔW_d , можна знайти як [2]

$$\Delta W_d = \Delta G_1 \cdot \Delta F, \quad (3)$$

де $\Delta F = \Delta h \cdot \Delta l$ – приріст площі втомної тріщини; Δh , Δl – приріст глибини та довжини втомної тріщини відповідно; ΔG_1 – енергія, потрібна на розвиток одиниці поверхні тріщини.

Панелі крила, фюзеляжу, оперення працюють у плоскому напруженому стані, для якого ця енергія ΔG_1 визначається таким чином [2]:

$$\Delta G_1 = \frac{(\Delta K_1)^2}{E},$$

де $\Delta K_1 = K_{1 \max} - K_{1 \min}$ – амплітуда коефіцієнта інтенсивності напружень; E – модуль пружності.

У формулі (1) розглядається симетричний цикл навантаження, для якого прийнято $K_{1 \min} = 0$ [2], тоді $\Delta K_1 = K_{1 \max}$.

Коефіцієнт інтенсивності напружень визначається як [2]:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l_{cr}} F, \quad (4)$$

де σ – робоче напруження; l_{cr} – довжина тріщини; $F = f(\bar{l})$ – поправний коефіцієнт з урахуванням довжини тріщини; $\bar{l} = l_{cr}/b$ – відносна довжина тріщини; b – ширина пластини.

Підставляючи ці значення в (3), можна визначити приріст небезпечної енергії

$$ddW = \frac{\sigma^2 \pi l_{cr} F^2}{E} dl dh. \quad (5)$$

Після інтегрування (5) можна отримати в загальному вигляді

$$W_d = \frac{\sigma^2 \pi}{E} \varphi(l_0, l_{cl})(h_{cl} - h_0),$$

де l_0 – початкова довжина тріщини; l_{cl} – критична довжина втомної тріщини; h_{cl} – критична глибина втомної тріщини; h_0 – початкова глибина тріщини; функція $\varphi(l_0, l_{cl}) = (h_{cl} - h_0) \int_{l_0}^{l_{cl}} l_{cr} F^2 dl = t \int_{l_0}^{l_{cl}} l_{cr} F^2 dl$.

У першому наближенні можна вважати $h_0 = 0$, $h_{cl} = t$, де t – товщина обшивки.

Граничне значення «небезпечної» енергії i , відповідно, ЛД визначається критичною довжиною втомної тріщини. Критичну довжину тріщини l_{cl} можна знайти за формулою [2]

$$l_{cl} = \frac{1}{\pi F^2} \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_{02}} \right)^2,$$

де K_{1c} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень; σ_{02} – умовна межа текучості.

Лише частина енергії витрачається на руйнування, інша – на внутрішнє тертя. Повний приріст ЛД $\Delta\delta_t$ складається з двох частин

$$\Delta\delta_t = \delta_d + \delta_n,$$

Повний ЛД δ , спричинений ростом тріщини, знаходиться відповідно до (2).

Із співвідношення (1) можна отримати відношення «небезпечної» енергії за цикл навантаження до всієї поглиненої енергії за цикл

$$\frac{W_{dc}}{W_{tc}} = 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{tc}} \right)^\beta, \quad (6)$$

де W_{dc} – «небезпечна енергія», поглинена за цикл навантаження; W_{tc} – загальна енергія, поглинена за цикл навантаження; $\beta=1-\alpha$.

На основі (2) і (6) можна визначити сумарний приріст ЛД $\Delta\delta_t$

$$\Delta\delta_t = \frac{\delta_d}{1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{tc}} \right)^\beta}. \quad (7)$$

Невідомі параметри втомного руйнування матеріалу W_{-1} і β можна визначити з експериментів під час випробувань на втому [3, 4, 5] з урахуванням (7) за різних рівнів напруження

$$\frac{\delta_d}{\delta_{c1}} = 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{tc1}} \right)^\beta; \quad \frac{\delta_d}{\delta_{c2}} = 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{tc2}} \right)^\beta,$$

де δ_{c1} , δ_{c2} – відповідно ЛД вимірюються в експериментах на втому при різних рівнях напруження; W_{tc1} , W_{tc2} – загальна енергія, поглинена за цикл навантаження при різних рівнях напруги, які відповідають ЛД.

Прогнозування повної довговічності

Прогноз довговічності базується на рівнянні росту втомної тріщини [2]

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m,$$

де C і m – константи, визначені експериментально; ΔK – амплітуда коефіцієнта інтенсивності напружень.

Як згадувалося раніше, $\Delta K_1 = K_{1 \max}$ береться для симетричного циклу

$$\frac{dl}{dN} = C(K_{1 \max})^m. \quad (8)$$

У цьому виразі ми маємо два невідомі параметри C і m .

Величина $K_{1 \max}$ береться з (4) і підставляється в (8)

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \sigma_a^m \cdot \pi^{0,5m} \cdot l_{cr}^{0,5m} \cdot F^m.$$

Розділивши змінні і проінтегрувавши, можна отримати

$$\int_{l_0}^{l_{cl}} \frac{dl}{l_{cr}^{0,5m} \cdot F^m} = C \cdot \sigma_a^m \cdot \pi^{0,5m} \int_{N_0}^{N_f} dN,$$

де l_0 – довжина зародкової тріщини; N_0 – кількість циклів до появи зародкової втомної тріщини; N_f – кількість циклів до руйнування; σ_a – амплітуда напружень.

Це рівняння можна перетворити в такий вигляд:

$$\frac{\Psi(l_{cl}, m)}{C \cdot \pi^{0,5m}} = \sigma_a^m \cdot N_f, \quad (9)$$

$$\text{де } \Psi(l_{cl}, m) = \int_{l_0}^{l_{cl}} \frac{dl}{l_{cr}^{0,5m} \cdot F^m}.$$

На підставі (9) N_f можна визначити таким чином:

$$N_f = \frac{\Psi(l_{cl}, m)}{C \cdot \sigma_a^m \cdot \pi^{0,5m}}. \quad (10)$$

Щоб знайти значення C і m , необхідно провести принаймні два вимірювання ЛД за різних час роботи.

Значення C можна отримати з (10)

$$C = \frac{\Psi(l_{cr}, m)}{\sigma_a^m \cdot \pi^{0,5m} \cdot N_i}, \quad (11)$$

де l_{cr} – поточна довжина тріщини; N_i – поточна кількість циклів навантаження.

Виходячи з рівняння (11), C для двох вимірювань має бути

$$\frac{\Psi_1(l_{cr1}, m)}{\Psi_2(l_{cr2}, m)} = \frac{N_1}{N_2},$$

де Ψ_1, Ψ_2 – значення $\Psi(l_{cr}, m)$ для двох кількостей циклів навантаження; l_{cr1}, l_{cr2} – довжини тріщин для двох кількостей циклів.

Відповідно, величина m може бути визначена з рівняння

$$1 - \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\delta_0}{\delta_1} \right)^{0,5(0,5m-1)} - \frac{N_1}{N_2} \left(\frac{\delta_0}{\delta_2} \right)^{0,5(0,5m-1)}.$$

Слід підкреслити, що величина m має значення не постійної характеристики матеріалу, а постійної величини для конкретної частини або елемента конструкції.

Це дає змогу знайти кількість циклів до руйнування N_f із наступного рівняння:

$$N_f = N_i \frac{1 - \left(\frac{\delta_0}{\delta_d} \right)^{0,5(0,5m-1)}}{1 - \left(\frac{\delta_0}{\delta_i} \right)^{0,5(0,5m-1)}}, \quad (12)$$

де N_i – кількість циклів на i -тому етапі випробувань; δ_i – ЛД на i -тому етапі випробувань; δ_d – величина ЛД, що відповідає «небезпечній» енергії, яка йде на руйнування і знаходиться з формулі (7).

По величинах повного ресурсу (12) і поточному значенні втомного навантаження знаходиться залишковий ресурс N_{res}

$$N_{res} = N_f - N_i,$$

де N може вимірюватися у циклах навантаження для зразків, у програмах навантажень при випробуваннях вузлів, агрегатів і конструкцій літаків, у льотних годинах при експлуатації літаків і вертольотів.

Висновок

Розроблено методику прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій по змінному логарифмічному декременту згасання власних коливань, яка була перевірена при випробуванні зразків зі сплавів 2024, Ti-6Al-4V, сталі 449A. Експериментально, по розробленій в ХАІ методиці, були визначені α – параметри втомного руйнування. Експерименти по прогнозуванню довговічності проводилися в ХАІ на зразках, які моделювали роботу на згин крила й оперення. Для цього зразки випробувалися також на згин. Результати випробувань і прогнозування наведені в таблиці.

Таблиця. Прогнозування довговічності на зразках зі сплаву 2024

Амплітуда вимушених коливань, мм	Кількість циклів навантаження $N_c \cdot 10^4$	δ_i	Довговічність $N_c \cdot 10^4$	
			По обчисленням	З експерименту
19	0	0,0184	–	–
	2	0,0202	11,80	–
	4	0,0225	11,54	–
	6	0,0258	11,45	–
	8	0,0311	10,30	–
	10	0,0388	10,00	10,44
25	0	0,0207	–	–
	1	0,0225	5,84	–
	2	0,0247	5,76	–
	3	0,0275	5,64	–
	4	0,0316	5,45	–
	5	0,0385	5,00	5,22

Аналіз експериментів показує, що на ранніх етапах тестування прогноз завищує довговічність на 10–15%, похибка поступово зменшується, а на останньому етапі тестування довговічність знижується із запасом 4–5%. Потрібно провести достатню кількість експериментів на натурних конструкціях для перевірки цієї методики і впровадження її у практику.

Література

1. Трошенко В. Т. Усталость и неупругость материалов. Киев: Наукова думка, 1971. 268 с.
2. Трошенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1987. 345 с.
3. Буланов В. В., Кирпикин А. А., Сулова А. Г. Вопросы методики прогнозирования остаточного ресурса конструкции. *Прочность конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. трудов Харьковского авиационного института. 1990. Вып. 9. С. 62–67.
4. Буланов В. В., Кирпикин А. А. Об изменении физико-механических характеристик композиционных материалов в процессе накопления усталостных повреждений. *Прочность конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. трудов Харьковского авиационного института. 1978. Вып. 5. С. 103–106.
5. Дибир А. Г., Кирпикин А. А., Пекельный Н. И. Аппроксимация изменения демпфирующих характеристик в процессе циклических нагрузжений. *Открытые информационные компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «Харьк. авиац. ин-т». 2008. Вып. 38. С. 88–91.

Надійшла до редакції 27.02.2023