

УДК 629.7.083

НАГОРНИЙ Л.В., старший науковий співробітник

ВНУКОВ А.В., провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук

ЖИКОЛ П.О., науковий співробітник

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ПРИЗНАЧЕНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОМІЖНИМ І ХВОСТОВИМ РЕДУКТОРАМ ВЕРТОЛЬОТІВ З ПОЗИЦІЙ МЕХАНІКИ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ

Розглянуто механізм формування втомних тріщин у металі та наведено підхід до оцінки величини граничного напруження, при досягненні якого відбувається зрушення та підростання тріщини

Ключові слова: втомне руйнування, напруження, багатоциклова втома

При визначенні можливості продовження призначених показників авіаційній техніці широко застосовуються методи визначення граничного стану елементів конструкції з використанням різних критеріїв.

Для елементів конструкції літального апарата в області багатоциклової втоми, коли кількість циклів напруження перевищує 10^7 циклів, при визначенні припустимого періоду експлуатації без руйнування і навіть зародження втомної тріщини найбільш часто у якості критерію застосовують рівень напруження нижче границі втоми.

Завантаженість корпусів проміжних та хвостових редукторів вертольотів визначається загальним навантаженням редукторів і характеризується низькоамплитудною вібрацією та низьким рівнем максимального напруження циклу [1]. До моменту досягнення передбачуваного граничного стану ці елементи при експлуатації можуть напрацьовувати $10^{10} \dots 10^{11}$ циклів. Корпуси виготовляються із магнієвого сплаву МЛ-5 з границею міцності не менше 220 МПа, який схильний до міжкристалічної корозії.

Як відомо, в області малоциклової і багатоциклової втоми довговічність елемента конструкції визначає стан його поверхні.

Зі зростанням тривалості навантаження все більш важливу роль у місці виникнення осередку руйнування грає навколишнє середовище. Його агресивний вплив на матеріал знижує міцність поверхні й сприяє зародженню руйнування саме з поверхні. В області ж довговічностей більше 10^7 циклів навантаження, коли відбувається спонтанний перехід до формування осередку руйнування під поверхнею, метал стає замкнутою системою й стан поверхні не впливає більше на тривалість навантаження до руйнування елемента конструкції.

Питанням розвитку тріщин при виникненні на поверхні металів корозійних уражень приділено багато уваги, наприклад, в роботі [2].

Розглянемо отримані на теперішній час дані про процес зародження тріщин під поверхнею, який може виникнути в металах від різних по природі осередків.

Перший тип осередку. Зародження тріщини в матеріалі походить від ливарних пор або раковин, що характерно для елементів конструкцій складної геометрії, на які діють низькі рівні зовнішніх циклічних навантажень [1]. Зародження тріщини під поверхнею може відбуватися в області багатоциклової втоми через високу концентрацію напружень у звичайному литому матеріалі або в монокристалічному матеріалі, утворення якого відбувається при кристалізації сплаву.

Другий тип осередку. Зародження тріщини виникає на стику зерен через втрату матеріалом зерномежевої міцності [3]. При зниженні рівня напружень і зростанні довговічності імовірність прояву осередку руйнування на межах зерен зростає через природну різномірність зерномежевої міцності по об'єму (особливо в деформованих матеріалах).

Третій тип осередку. Тріщина зароджується навколо включень або зміцнювальних часток, що є вираженою неоднорідністю матеріалу [4].

Перші три випадки формування осередку руйнування під поверхнею пов'язані з вирішальною роллю концентрації напружень навколо несучільності, неоднорідності або включення матеріалу. Створювана концентрація напружень вище, ніж на поверхні матеріалу, що й визначає виникнення тріщини під поверхнею.

Четвертий тип осередку. Тріщина стартує з утворенням гладкої фасетки зламу без яких-небудь ознак множинного ковзання в сусідніх площинах у межах одного структурного елемента, орієнтованих у просторі під різними кутами до сформованої фасетки. Таку ситуацію спостерігали, наприклад, в алюмінієвих [5], а також у титановому і жароміцних сплавах. Характерно, що формування гладкої фасетки відбувається при різних частотах циклічного навантаження від 0,1 Гц до 20 кГц. Визначальну роль у формуванні початкової гладкої фасетки грає втрата металом пластичної стійкості в умовах гідростатичного стискання й скручування під дією циклічного навантаження. Таким чином, формування гладкої фасетки зламу як осередок руйнування матеріалу під поверхнею варто відносити до специфічного процесу нагромадження ушкоджень в умовах втрати металом пластичної стійкості в локальному об'ємі з найбільш інтенсивним напруженим станом в умовах стискання й дифузії залишкових газів і (або) хімічних елементів самого матеріалу.

П'ятий осередок руйнування. Численними експериментальними дослідженнями морфології рельєфу зламу в сталях, титанових і нікелевих сплавах встановлено, що в області надбагатоциклової втоми у осередку руйнування спочатку формується майже кругова або напівеліптична за формою фронту тріщини так звана тонка гранульована зона (ГРН-зона) [6]. Вона може формуватися навколо включень, а також виникати самостійно як початкова зона руйнування. Після формування ГРН-зони йде самостійне, нове зародження тріщини із принципово іншою морфологією рельєфу. Звертає на себе увагу той факт, що «гранули» у багатьох випадках являють собою сферичні частки. Їхня форма не залежить від виду металу й способу проведення випробувань (високочастотне навантаження 20 кГц або низькочастотне навантаження 35 Гц) [5].

При аналізі відомих в експлуатації випадків руйнування редукторів від втомних тріщин корпусів було виявлено, що виникнення тріщин було «ініційоване»

лише виробничими дефектами (дефектами матеріалу) або корозійними ураженнями з виникненням міжкристалічної корозії [1].

Проведемо оцінку завантаженості корпусу редуктора при наявності в ньому дефектів матеріалу з позиції механіки втомного руйнування.

Процес зародження тріщини від втоми може бути охарактеризований з використанням коефіцієнта інтенсивності напруження K_{th} на підставі такого співвідношення [1]:

$$K_{th} = \sigma \sqrt{\pi a} Y(a). \quad (1)$$

Співвідношення (1) зв'язує номінальні напруження σ , розміри тріщини a та безрозмірну поправку на розміри тріщини $Y(a)$. На підставі (1) можна оцінити величину граничного напруження σ_r , у тому числі і для магнієвих сплавів, при досягненні якої відбувається зрушення та зростання тріщини. Для цього необхідно знати порогову величину K_{th} , яка характеризує собою граничне напруження матеріалу, при досягненні якого може мати місце зрушення тріщини. Підставляючи її в формулу (1), маємо:

$$a_{кр} = \frac{K_{th}^2}{(\pi \sigma_r^2) [Y(a)]^2}. \quad (2)$$

Мінімальний розмір $a_{кр}$ може бути розглянутий в якості початкового дефекту деякої довжини та конфігурації, який еквівалентний цій тріщині. Для магнієвих сплавів при розмірі початкового дефекту 0,5 мм та рівні напруження 50 МПа (5 кг/мм²) може виникнути зародження тріщини від втоми [7]. Однак в діапазоні так званих коротких тріщин відбувається зміна вказаної вище залежності (2). Цей діапазон може лежати як раз в інтервалі 0,2...1,0 мм. Стосовно магнієвих сплавів для тріщин довжиною менше 0,5 мм має місце лінійне зниження порогової величини коефіцієнта інтенсивності напруження K_{th} при відповідному зниженні довжини початкового дефекту.

Відносно дефектів матеріалу, які розташовані під поверхнею, ситуація стає більш складною щодо оцінки граничного стану й рівня напружень для зрушення втомної тріщини.

Необхідно враховувати не лише розмір дефекту в напрямку можливого зрушення тріщини. Як правило, дефект має форму поверхні з криволінійними межами. І утворення тріщин визначається величиною коефіцієнта інтенсивності напруження, яка залежить від співвідношення півосей зазначеного дефекту.

У зв'язку з цим для оцінки дефектів на поверхні або на невеликій глибині від поверхні використовують співвідношення, запропоноване Мураками [8]. При досягненні рівня напруження, близького до межі витривалості матеріалу, виникає зрушення тріщини шляхом формування початкової зони руйнування, площа якої однозначно пов'язана з границею втоми матеріалу. Це співвідношення має

такий вигляд:

$$\Delta K_{th} = 0,5\Delta\sigma\sqrt{\pi\sqrt{area}}. \quad (3)$$

В формулу (3) входить коефіцієнт “*area*”, що враховує площу поверхні дефекту. Він використовується замість розміру тріщини. Залежність між ΔK_{th} і “*area*” можна записати у такому вигляді [7]:

$$\Delta K_{th} = \alpha_{ar} (\sqrt{area})^{1/3}. \quad (4)$$

На підставі формул (3) і (4) маємо:

$$\Delta\sigma = \frac{\alpha_{ar}}{0,5\sqrt{\pi} (\sqrt{area})^{1/6}}. \quad (5)$$

В формули (4) і (5) входить коефіцієнт пропорційності α_{ar} , величина якого залежить від розмірів гілок дендритів. Для кольорових сплавів він знаходиться в інтервалі 0,267...0,443. Для дефектів у сталях величина коефіцієнта пропорційності α_{ar} дорівнює 0,72. Величина коефіцієнта пропорційності для сплаву МЛ-5 знаходиться як середнє значення між найбільш слабкими алюмінієвими сплавами та сплавами на основі заліза.

Із співвідношення (5) можна оцінити рівень напруження, при якому виникає зрушення тріщини, якщо відома площа дефекту, від якого виникла тріщина.

Розглянемо випадок руйнування корпусу хвостового редуктора вертольота Мі-8Т [1] внаслідок виникнення і росту тріщини від втоми. Відомо, що тріщина зародилася при початковій площі дефекту 4 мм². Тоді на підставі формули (5) отримаємо $\Delta\sigma = 1$ МПа.

Виконана оцінка напруження у цьому випадку, а також аналіз інших прикладів руйнування корпусів редукторів вертольотів [1] свідчить про те, що зародження тріщини в корпусі мають місце при відповідному рівні напруження в області надбагатоциклової втоми. Це відповідає уявленням про їх навантаження в звичайних умовах експлуатації. Тому без пошкодження матеріалу корпусу редуктора у вигляді корозійних розтріскувань або інтернування ливарних дефектів зародження тріщин від розрахункових змінних навантажень не повинно виникати у визначені виробником періоди експлуатації редукторів.

Таким чином, якщо до межі напруцювання редуктора (вичерпання ресурсу) не відбулося його руйнування, то виникає можливість продовження йому призначених показників (оскільки границя циклічної довговічності ще не досягнута. При цьому вважається, що виникнення втомної тріщини та її зростання ще не відбулося).

ЛІТЕРАТУРА

1. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации: монография. – Уфа, 2003. – 803 с.

2. Петров Л.Н., Сопрунюк Н.Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
3. Shanyavskiy A.A. Bifurcation diagram for in-service fatigued metals // Original Research Article, Procedia Engineering, Volume 2, Issue 1, April 2010, P. 241-250.
4. Murakami Yu. Metals Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic inclusions. Elsevier Ltd, London, UK, 2002, 298 p.
5. Proceedings of the International Conference VHCF-5, Edited by C.Berger, H.-J.Christ, DVM, June 28-30, 2011, Berlin, Germany, 980 p.
6. Shiozawa K., and Lu L. Very high-cycle fatigue behavior of shot-peened high-carbon chromium bearing steels // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 25, (2002), P. 813-822.
7. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосоновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. – К.: Наукова думка, т. 1, 1993, т. 2, 1994.
8. Справочник по коэффициентам напряжений: В 2-х томах / Под ред. Ю.Мураками. – М.: Мир, 1990.

Надійшла до редакції 15.10.2015