

A XII-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională "Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti", SEBEŞ, 2012

# ASUPRA UNOR PARTICULARITĂŢI ALE OBOSELII DE FRETTING (II)

Tiberiu MĂNESCU jr.

## ON SOME PARTICULARITIES OF FRETTING FATIGUE (II)

Fretting is a process which invariably occurs on contracting surfaces of tightly metal joints subjected to vibration loading. The superficial damage caused by the rubbing of the contacting surfaces together with the severe stress gradient under the contact region accelerate the nucleation and early growth of cracks witch can lead to catastrophic failure of there is a least one of the components of the fitting subjected to a remote fatigue load. This is the so called fretting fatigue phenomenal. The aircraft industry is per hops one of the most affected by the fretting fatigue problem.

Cuvinte cheie: oboseală de fretting Keywords: fretting fatigue

### 3. Predicții ale durabilității la oboseala de fretting

Aşa după cum s-a arătat, cu toate că studiile asupra oboselii de fretting au apărut cu mulți ani în urmă, până în prezent nu există un parametru unanim acceptat pentru aprecierea durabilității sub forma unor curbe Wöhler. Unul dintre primii parametri a fost introdus de Ruiz și este definit ca produsul dintre amplitudinea lunecării  $\delta$  și valoarea maximă a tensiunii tangențiale ( $\tau$ · $\delta$ ) [5]. Ulterior, acest parametru a fost corectat ( $\tau$ · $\delta$ · $\sigma_B$ ), [5], [6].

În ultimii ani se folosește tot mai frecvent ca parametru de apreciere a durabilității, amplitudinea tensiunii  $\sigma_B$  pentru diferite valori ale lui P, Q și R. În figura 4 se prezintă rezultatele experimentale pentru

aliajul Ti-6Al-4V, din care rezultă influența forței tangențiale Q asupra durabilității la încercări cu peste 10<sup>5</sup> cicluri (figura 4 [7]).



Fig. 4 Curbele la oboseala de fretting ale oţelului Ti-6Al-4V [7]

Mărirea forței tangențiale Q, precum și micșorarea razei R a suprafețelor în contact au condus la o micșorare a rezistenței la oboseală, chiar dacă forța de apăsare P rămâne constantă (figura 4). Influența mărimii semiaxei zonei de contact **a** asupra duratei de viață la oboseala de fretting a fost analizată de Nowell pentru un aliaj Al4%Cu (HE15-TF), (figura 5 [4])

Studiile experimentale au evidențiat o tendință contrară și anume o scădere a durabilității odată cu creșterea lungimii semiaxei zonei de contact în condițiile menținerii constante a raportului Q/P și a tensiunii  $\sigma_B$ . Mai mult, Nowell semnalează existența unei zone de tranziție de lățime  $\mathbf{a}_0$  pe care se produce o scădere bruscă a durabilității la oboseală de fretting (figura 5).

Cele de mai sus justifică necesitatea continuării unor asemenea studii pentru o evidențiere cât mai precisă a modului în care se interconectează multitudinea de parametri implicați în oboseala de fretting.

#### 4. Inițierea și propagarea fisurilor la oboseala de fretting

Cele mai multe studii experimentale efectuate până în prezent sau concentrat asupra *inițierii fisurilor*. În acest sens se pot aminti aplicațiile criteriilor macroscopice: Crossland, Findley, Sines, Smith-Watson-Topper, Mc Diarmid, Papadopoulos, Fatemi-Socie și SusmelLazarin. Fiecare dintre aceste criterii se bazează pe calculul unui parametru de degradare  $\Gamma$  în funcție de diferite combinații ale tensiunilor și deformațiilor dintr-un plan critic localizat în zona de contact.



Fig. 5 Influența mărimii zonei de contact asupra durabilității la oboseala de fretting [4]

Astfel, în figura 6, a și figura 6, b se prezintă distribuția parametrilor Smith-Watson-Topper ( $\Gamma_{SWT}$ ) și a parametrului Fatemi-Socie ( $\Gamma_{FS}$ ) într-un plan median central, normal la suprafața de contact [8], [9].



Fig. 6 Contururile curbelor izoparametrice  $\Gamma_{SWT} \cdot E/(p_0)^2$  şi  $\Gamma_{FS} \cdot E/(p_0)^2$ 

Pentru trasarea curbelor de variație ale parametrilor de degradare atât pe interfața de contact cât și sub aceasta este necesar să se calculeze tensiunile și deformațiile în diferite puncte M(x,y). Pentru

aceasta se poate aplica metoda medierii în volume limitate (figura 7). Conform acestei metode în nodurile discretizate din fiecare volum elementar se calculează tensiunile tangențiale și deformațiile unghiulare folosind soluțiile propuse de Mindlin [3].



Fig. 7 Schematizarea abordării criteriilor de multiaxialitate pe baza medierii volumelor elementare

Revenind la figura 6, a și figura 6, b se vede că ambele criterii evidențiază prezența unei zone locale critice pe suprafața de contact în vecinătatea punctului pentru care x/a = -1. Prezența acestei zone critice în care se inițiază fisurile de oboseală a fost confirmată și de analiza mesoscopică, la nivelul grăunților pentru un aliaj de aluminiu (figura 8) [10].



Fig. 8 Variația parametrului  $\Gamma_{VD}$  de-a lungul axei centrale a zonei de contact [10]

Abordarea mesoscopică a avut la bază criteriul Van Dang, pentru care parametrul de degradare  $\Gamma_{VD}$  este dat de relația:

$$\Gamma_{VD} = \frac{\max_{t} \left\{ \max\left[ \left\| \hat{\tau}(\vec{n}) \right\| + \alpha \cdot \Sigma_{H}(t) \right] \right\}}{\beta}$$
(10)

unde:

 $\hat{\tau}\big(\vec{n},t\big) \text{ este tensiunea tangenţială mesoscopică corespunzătoare stării stabilizate după un anumit număr de cicluri, <math>\Sigma_{H}(t)$  este presiunea hidrostatică macroscopică, iar  $\alpha$ ,  $\beta$  – constante de material.

Aplicarea criteriului Van Dang presupune găsirea la fiecare moment de timp **t**, a planului pentru care  $\|\hat{\tau}(\vec{n},t)\|$  atinge valoarea maximă [11].

Inițierea fisurii în conformitate cu criteriul Van Dang se produce atunci când  $\Gamma_{VD} \ge 1$ .

În mod obișnuit inițierea fisurilor de oboseală corespunde propagării fisurilor microstructurale scurte a căror lungime este comparabilă cu dimensiunile microstructurii [12]. Inițierea fisurilor marchează **stadiul I** care caracterizează faza de incipiență a degradării la oboseala de fretting (figura 9).



Fig. 9 Reprezentarea diferitelor stadii ale evoluției fisurii la oboseala de fretting

Cercetările actuale au arătat că în condițiile pentru care suprafețele de contact aderă una peste cealaltă, pe ambele margini ale zonei de contact, de pe interfața formată apar nişte singularități ale tensiunilor care depind de rezistența la adeziune [13], [14].

După cum se știe, în zonele în care tensiunile calculate tind spre infinit sau apar singularități ale câmpului de tensiuni, prezența fisurilor este inevitabilă (Fig.10b). Abordarea câmpului de tensiuni din vecinătatea acestor singularități se face folosind conceptele mecanicii ruperii. Cu alte cuvinte, adeziunea introduce un câmp de tensiuni cu o limită asimptotică, analog cu cel care se produce la contactul dintr-o sferă (reală) cu suprafața întinsă care aderă pe un corp circumferențial (virtual) fisurat și al cărui ligament central nefisurat este egal cu semiaxa de contact  $\mathbf{a}_{max}$ 

(figura 10, a). Semiaxa  $\mathbf{a}_{max}$  corespunde unei forțe de apăsare  $P_{max}$  la care forțele de atracție, care produc efectiv adeziunea, cresc până la valoarea maximă.

**Stadiul II** corespunde propagării stabile a unei fisuri scurte înclinate cu un anumit unghi față de suprafața de contact. În acest stadiu contactul are încă un rol important asupra extinderii fisurii (figura 9). Câmpul de tensiuni corespunzător acestui stadiu este luat în considerare prin factorii locali de intensitate a tensiunii, K<sub>1</sub> şi K<sub>2</sub>, corespunzător unor fisuri infinitezimale:

$$\begin{split} & \mathsf{K}_{1} \!=\! \mathsf{a}_{11}(\alpha) \!\cdot\! \mathsf{K}_{\mathsf{I}} \!+\! \mathsf{a}_{12}(\alpha) \!\cdot\! \mathsf{K}_{\mathsf{II}} \\ & \mathsf{K}_{1} \!=\! \mathsf{a}_{21}(\alpha) \!\cdot\! \mathsf{K}_{\mathsf{I}} \!+\! \mathsf{a}_{22}(\alpha) \!\cdot\! \mathsf{K}_{\mathsf{II}} \end{split} \tag{11}$$

unde:

$$a_{11}(\alpha) = \frac{1}{4} \cdot \left( 3\cos\frac{\alpha}{2} + \cos\frac{3\alpha}{2} \right)$$
$$a_{12}(\alpha) = -\frac{3}{4} \cdot \left( \sin\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{3\alpha}{2} \right)$$
(12)

$$a_{21}(\alpha) = \frac{1}{4} \cdot \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right)$$
$$a_{22}(\alpha) = \frac{1}{4} \cdot \left( \cos \frac{\alpha}{2} + 3\cos \frac{3\alpha}{2} \right)$$



Fig.10 Contactul cu adeziune și variația tensiunilor  $\sigma_{yy}$  [14]

Factorul de intensitate al tensiunii, corespunzător modului I este dat de relația:

$$K_{I} = \frac{P_{max}^{*} - P_{max}}{2 \cdot a_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{max}}}$$
(13)

unde  $P_{max}^*$  este forța care se obține din ecuația lui Hertz punând condiția ca **a** = **a**<sub>max</sub> [15]. În mod analog se definește și K<sub>II</sub>:

$$K_{II} = \frac{Q_{max}}{a_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{max}}}$$
(14)

Corespunzător stadiului II, fisura avansează de-a lungul direcției  $\alpha$  până când K<sub>2</sub> devine egal cu zero:

$$K_2 = \frac{1}{4} \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right) \cdot K_1 + \frac{1}{4} \left( \cos \frac{\alpha}{2} + 3\cos \frac{3\alpha}{2} \right) \cdot K_{II} = 0 \quad (15)$$

În cursul stadiului II fisura are perioade de închidere care trebuie luate în considerare [16].

**Stadiul III** corespunde propagării fisurilor macroscopice și el este controlat de tensiunea axială din epruvetă,  $\sigma_{B}$ . Factorul de intensitate al tensiunii corespunde modului I de rupere și este dat de relația:

$$K_{I} = \sigma_{B} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b}{Q'}} \cdot F$$
(16)

unde Q' şi F sunt nişte funcţii de lungime efectivă a fisurii **b** şi dimensiunile epruvetei. Viteza de propagare a fisurii în stadiul III este dată de ecuaţia lui Paris:

$$\frac{db}{dN} = C \cdot \left(\Delta K_{I}\right)^{n}$$
(17)

unde C, n sunt constante de material.

Ruperea finală corespunzătoare *stadiului IV* se produce atunci când K<sub>I</sub> dat de ecuația (16) atinge valoarea critică K<sub>IC</sub>. Din condiția K<sub>I</sub> =  $K_{IC}$  se obține lungimea finală a fisurii **b**<sub>f</sub> (figura 9).

#### 5. Concluzii

■ În lucrare se face o analiză a celor mai importante aspecte ale durabilității materialelor la oboseala de fretting. Inițial se prezintă tehnica experimentală și parametri care intervin în condițiile unor asemenea încercări. Pe baza celor de mai sus se discută particularitățile trasării curbelor Wöhler în condițiile oboselii de fretting.

O atenție deosebită s-a acordat evidențierii unor particularități ale iniţierii şi propagării fisurilor în urma aplicării unor criterii macroscopice şi mesoscopice.

■ Inițierea fisurilor s-a analizat pe baza celor mai recente cercetări care iau în considerare prezența zonei de adeziune. Se subliniază că dacă adeziunea este posibilă pentru două suprafeţe de contact caracterizate prin energiile superficiale  $\gamma_1$  şi  $\gamma_2$ , acestea pot să

adere și să formeze o nouă interfață. Noua interfață poate favoriza creșterea razei zonei de contact, atingând valoarea maximă **a**<sub>max</sub>. Adeziunea determină și singularitatea câmpului de tensiuni specifică zonelor cu fisuri.

■ În final se analizează cele patru stadii ale evoluției unei fisuri la oboseala cu fretting luând în considerare conceptele mecanicii ruperii.

#### BIBLIOGRAFIE

[5] Ruiz, C., Boddington, P.H.B., Chen, K.C., *An investigation of fatigue wear in a dovetail joint,* Exp. Mech. 24(3), pag. 208-217, 1984.

[6] Nowell, D., Dini, D., Hills, D.A., *Recess developments in the understanding of fretting fatigue,* Engineering Fracture Mechanics 73, pag. 207-222, 2006.

[7] Hines, J.A., Lutjering, G., *Fatigue Fracture*. Engineering Materials and Structures, 1999, Vol. 22, pag. 657-665.

[8] Smith, K.N., Watson, P. Topper, T.H., Journal of Materials, JLSMA, Vol. 5, 1970.

[9] Fatemi, A., Socie, D.F., *A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out of phase loading,* Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures, 11, pag. 149-165, 1988.

[10] Araujo, J.A., Mamiya, E.N., *The application of a mesoscopic scale approach in fretting fatigue,* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 25, no. 31, 2003.

[11] Dang Van, K., Griveau, B., Message, O., *On a new multixial fatigue limit criterion: Theory and Application. Biaxial and Multiaxial fatigue, EGT3,* Mechanical Engineering Publication, London, pag. 479-496, 1989.

[12] Fouvry, S., Elleuch, K., Simeon, G., *Predict of crack nucleation under partial slip fretting conditions*, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 37.6, pag. 349-567, 2002.

[13] Ginna Kopoulos, A.E., Lindley, T.C., Suresh, S., *The role of adhesion in contact fatigue*, Acta Mater., Vol. 47, No. 18, pag. 4653-4664, 1999.

[14] Ginna Kopoulos, A.E., Lindley, T.C., Suresh, S., Similarities of stress concentration in contact at round punches and fatigue notches: implication to fretting fatigue crack initiation, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, No. 23, pag. 561-571, 2003.

[15] Venkatesh, T.A., Conner, B.P., Lee, C.S., Ginna Kopoulos, A.E., Lindley, T. C., Suresh, S., *An experimental investigation of fretting fatigue in Ti-6Al-4V: the rol of contact conditions and microstructure,* Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 32 A, pag.1131-1146, 2001.

[16] Proudhon, H., Fouvry, S., Yantio, G.R., *Determination and prediction of the fretting crack initiation: introduction of the (P, Q, N) representation and definition of a variable process volume,* Private comunication, 2010.

Drd.Ing. Tiberiu MĂNESCU jr. Universitatea "Eftimie Murgu" din Reşiţa e-mail: tibijunior@yahoo.com