

ASPECTE PRIVIND MICROSTRUCTURA ÎN DETERMINAREA DURATEI DE VIATA LA OBOSEALA A MATERIALELOR

Claudiu Ovidiu, POPA
Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca

Cuvinte cheie: fisuri de oboseala , initiere, propagare, defecte structurale

The criteria concerning the number of cycles to fatigue failure are presented in this paper. The total fatigue life is the sum of the life spent on nucleation, small crack growth and long crack growth. In the early stage on fatigue behavior, the defects in internal structure of material such dislocation, vacancies and others present an very important role. The stress fields of the dislocations near the sliding interface of a two-body contact system and a model for the nucleation life are presented.

1. INTRODUCERE

Asa cum arata Lin [8], peste 90% din defectele cu urmasi catastrofice au fost cauzate de oboseala materialelor. Aceasta se manifesta prin aparitia unui defect al materialului piesei în conditiile în care tensiunile aplicate fluctueaza la valori mai mici decât cele care pot duce la ruperea materialului în cazul încarcarilor statice, ca urmare a actiunii sarcinilor pe o anumita durata de timp sau dupa un anumit numar de cicluri de solicitare.

Daca durata de viata la oboseala a unei piese este limitata la un numar de cicluri de solicitare cuprins în intervalul 10^3-10^5 se poate vorbi despre *oboseala la un numar redus de cicluri* (Low Cycle Fatigue, LCF) [3]. Specific acestui caz este faptul ca materialul a fost supus unor valori mari ale tensiunilor care produc deformatii plastice macroscopice.

Modalitatea general acceptata de tratare a acestui caz este aplicarea legii Coffin-Manson care exprima relatia dintre amplitudinea deformatiei plastice (Δe_p) si durata de viata la oboseala (numarul de cicluri de solicitare pâna la defectarea piesei, N):

$$N = \frac{\Lambda}{(\Delta e_p)^{\alpha}} \quad (1.1)$$

în care Λ si α sunt constante determinate experimental (pentru majoritatea otelurilor carbon $\alpha \cong 2,0$).

Un alt tip de oboseala este *oboseala la un numar mare de cicluri de solicitare* (High Cycle Fatigue, HCF). În acest caz în materialul piesei apar doar deformatii plastice microscopice iar numarul de cicluri de solicitare pâna la aparitia defectului poate fi de ordinul milioaneilor. Pentru a defini domeniul în care a fost initiat defectul, Ottosen si Stenström (citati în [3]) au propus o metoda care presupune existenta unei *zone deteriorate* aflata în dezvoltare în câmpul de tensiuni.

Conform Lin [8], în cazul LCF, chiar daca fisura se poate initia de timpuriu, dominanta în stabilirea duratei de viata este etapa de crestere a acesteia, respectiv de *propagare* a fisurii, în timp ce în cazul HCF predomina *initierea* fisurii. Un exemplu în care propagarea fisurii determina durata de viata la oboseala este acela al sudurilor unei piese, caz în care se presupune întotdeauna existenta unei fisuri initiale.

Oricum, la materialele cu rezistenta ridicata majoritatea duratei de viata este data de etapa de nucleatie, chiar la un numar mic de cicluri de oboseala.

În cazul în care dominanta în durata de viata a piesei este propagarea fisurii, studiul presupune utilizarea teoriilor de mecanica ruperii cu luarea în considerare a *factorului intensitatii tensiunilor*.

În cazul în care dominanta este initierea fisurii, iar încarcarea este uniaxiala si de amplitudine constanta, pentru determinarea numarului de cicluri de solicitare la care se

produce distrugerea piesei prin oboseala se poate utiliza curba Wohler trasata pe baze experimentale.

Complexitatea problemei creste în cazul în care nivelul tensiunilor nu este constant sau acestea sunt multiaxiale sau si mai mult, atunci când acestea sunt *rotitoare*.

Un alt element important în studiul contactelor de oboseala este cel al tensiunilor reziduale. Se definesc trei nivele ale acestor tensiuni si anume:

- tensiuni reziduale care actioneaza la nivel *macroscopic*;
- tensiuni reziduale care actioneaza la nivelul *grauntelui de material*;
- tensiuni reziduale care actioneaza la nivelul *structurii cristaline*.

Deoarece fenomenul de oboseala implica distrugerea *verigii celei mai slabe* a materialului, rezistenta la oboseala depinde de o multitudine de factori cum ar fi: prezenta si dimensiunile porilor, respectiv a incluziunilor, neregularitatile suprafetei, gradul ei de uzare, temperatura acesteia, lubrifiantul utilizat etc.

2. STADIILE DE APARITIE SI DE DEZVOLTARE ALE FISURILOR DE OBOSEALA

Metodele actuale de predictie a duratei de viata la oboseala în componentele metalice iau în considerare 3 stadii: initierea fisurii, propagarea în lungime si, în final, ruperea. Ultimele 2 etape pot fi studiate utilizând *mecanica ruperii liniar elastice* (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) sau *elasto-plastice* (Elasto-Plastic Fracture Mechanics, EPFM). Initierea fisurii este etapa de început a acumularii defectelor, în care fisurile mici (a caror lungime este mai mica decât suma diametrelor câtorva graunti) deviaza semnificativ de la comportamentul de rupere prezis pentru fisurile lungi, datorita mediului heterogen în care se produc.

Stadiul de initiere a fisurii se poate împarti în 2 faze: *nucleatia* fisurii si *cresterea fisurii mici*. Nucleatia este un proces local complex de formare a fisurii la o scara microstructurala, caracterizata prin suprafete de rupere netede, înclinate fata de directia încarcerii. Acest tip de distrugere este corespunzator Modulii II de rupere (modul M II, figura 1). Cercetarile experimentale au aratat ca marimea nucleatiei este de ordinul dimensiunii unui graunte.

Comportamentul fisurii de lungime mica corespunde unui regim de rupere elasto-plastic, atunci când lungimea fisurii atinge o valoare egala cu cea a 10 graunti de diametru mediu. Cresterea fisurii mici este caracterizata de suprafete de rupere striate, perpendiculare pe directia sarcinii. Acest tip de distrugere este caracteristic Modulii I de rupere (M I, figura 1).

Cele 2 etape trebuie sa fie modelate separat deoarece sunt guvernate de mecanisme diferite.

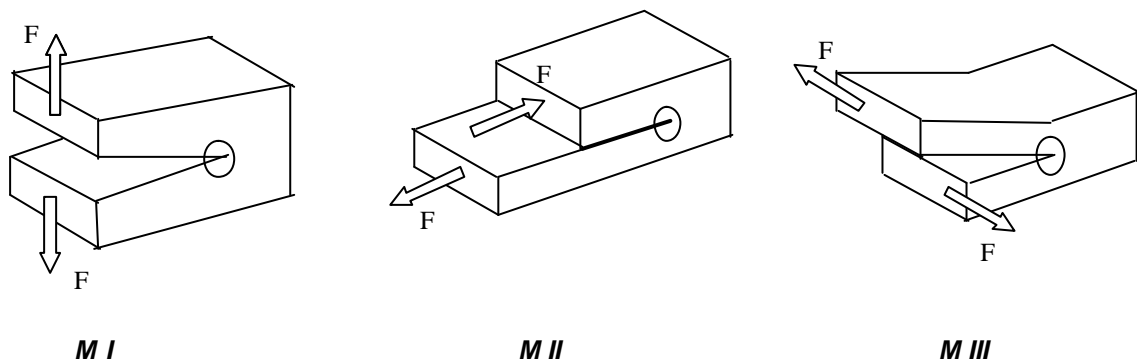


Fig. 1 Modulile fundamentale de rupere a materialelor

În studiul propagării fisurii de oboseala un rol important îl are *factorul intensitatii tensiunii* (SIF) care definește câmpul de tensiuni din frontul fisurii. Pentru stabilirea acestui factor se propun diferite criterii și se identifică o anumită *valoare de prag*, care depinde de limita de oboseala la inițierea fisurii. Pentru valori ale factorului mai mici decât cele ale pragului, fisura nu se propaga. Pentru valori ale factorului intensitatii tensiunii mai mari decât valoarea de prag se poate identifica o *zona de creștere stabilă* a fisurii, zona în care această creștere poate fi exprimată cu ajutorul legii Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (2.1)$$

în care: $\frac{da}{dN}$ reprezintă creșterea fisurii pe durata unui ciclu de solicitare;

- ΔK - amplitudinea factorului intensitatii tensiunii;
- C, m – coeficientul, respectiv exponentul legii Paris și depind de material.

Creșterea fisurii, de la o mărime inițială la una critică, poate fi analizată, în principiu, prin integrarea legii Paris, numărul de cicluri de solicitare necesare creșterii fisurii de la o lungime inițială a_i la una finală a_j fiind:

$$N = \int dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C[\Delta K(a)]^n} \quad (2.2)$$

În figura 2 se prezintă [16] distribuția duratei de viață, în diferitele etape de creștere a fisurilor, pentru 16 oțeluri moi, supuse unei oboseli la un număr mare de cicluri de solicitare. Se constată că nucleația a apărut ca o fisură de lungime aproximativ egală cu cea a unui graunte (0.07 mm). Regimul fisurii de lungime mică se extinde pe durata dintre inițiere până când fisura atinge o lungime de aproximativ 8 ori mărimea medie a unui graunte (0.6 mm). Fisura de lungime mare corespunde creșterii de la această valoare până la distrugerea piesei. Se observă că panta dreptei aferente creșterii fisurilor mari este aproximativ aceeași, spre deosebire de cazul corespunzător fazei de creștere a fisurilor mici. Diferențierea este atribuită mediilor heterogene în care apar fisurile.

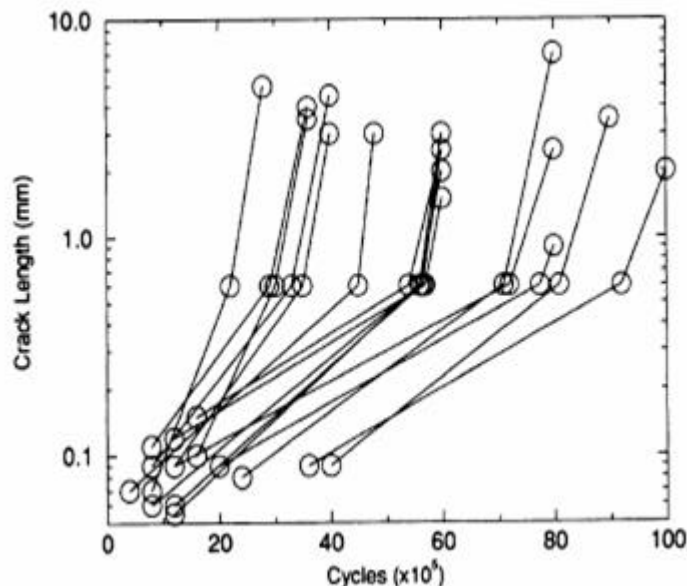


Fig. 2 Curbe de creștere a fisurilor funcție de numărul de cicluri de solicitare

3. DEFECTE ALE STRUCTURII CRISTALINE

Printre defectele structurale ale materialului se pot aminti [5]: defecte unidimensionale (dislocatii - marginale sau elicoidale), defecte bidimensionale (limite dintre graunti, sublimite), vacante, incluziuni, impuritati chimice etc .

Defectele structurale ale caror dimensiuni într-o directie le depasesc pe cele atomice se numesc defecte unidimensionale. Reprezentativ pentru acestea sunt *dislocatiile*. Ele sunt distorsiuni ale structurii cristaline a materialului. La nivel microscopic o distorsiune poate sa fie generata de imperfectiuni în configuratia regulata a rețelei cristaline. Daca imperfectiunea apare sub forma unui plan atomic suplimentar, atunci distorsiunea rețelei defineste o dislocatie marginala. Extremitatea planului atomic suplimentar marcheaza linia de dislocatie simbolizata cu \wedge . În planul în care se afla cuprinsa linia de dislocatie, alunecarea se face cu usurinta prin miscarea consecutiva a atomilor dintr-o pozitie de echilibru în alta, ceea ce implica propagarea dislocatiei [2].

Daca propagarea dislocatiei se face pâna la o suprafata libera a cristalului, rezultatul propagarii va fi o alunecare relativa cu o distanta atomica. Planul în care se propaga dislocatia se numeste plan de alunecare.

Propagarii dislocatiilor i se opun obstacole cum ar fi: limitele graunților, particule straine, alte configuratii de dislocatii etc. Datorita distorsiunii puternice în zona adiacenta dislocatiilor, se induce un câmp de tensiuni independent de câmpul de tensiuni generat de fortele exterioare. Tensiunea tangentiala este maxima în planul de alunecare, schimbând semnul în dreptul liniei de dislocatie.

Vectorul Burgers caracterizeaza cantitativ dislocatiile si reprezinta masura directiei si deplasarii unui atom aflat deasupra planului de alunecare fata de atomul corespondent initial, aflat sub planul de alunecare. Mărimea vectorului Burgers este constanta de-a lungul unei linii de dislocatie, fiind egala cu distanta de echilibru interatomica.

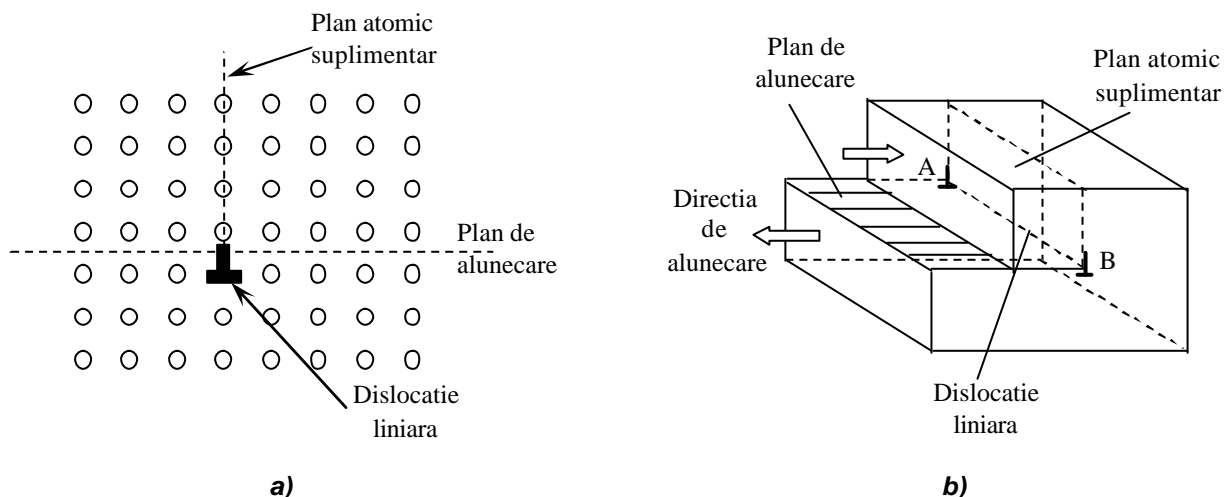


Fig. 3 Elemente care definesc dislocatia

Vacantele (termen tradus impropriu din limba engleza, "vacancies") sunt locuri atomice din retea neocupate de atomi). Acestea pot sa apara pe doua cai, cunoscute sub denumirea de *defecte Schottky* respectiv *defecte Frenkel*.

Limitele dintre graunti sunt de defecte bidimensionale care apar într-un agregat policristalin si reprezinta regiuni de trecere de la un graunte cu o anumita orientare cristalina la alti graunti cu orientare cristalina diferita.

4. MODELAREA INITIERII FISURII DE OBOSEALA

Daca fisura este initiata la o adâncime între 0 si 2 μm fata de suprafata piesei, se considera ca este o fisura de suprafata. Adoptarea valorii de 2 μm are doua considerente si anume [1]:

1. În timpul experimentelor s-a constatat ca un mare numar din fisurile de suprafata nu au depasit o adâncime mai mare de 2 μm în timpul fazei de initiere a fisurii;
2. Pentru o fisura initiata la o adâncime mai mica de 2 μm , durata de propagare a acesteia pâna la suprafata este atât de mica încât poate fi considerata o fisura de suprafata.

Fisura initiata în apropierea suprafetei este considerata cea pentru care gama valurilor adâncimilor este cuprinsa între 2 μm si $0,4 \cdot B$, unde B este jumătate din latimea zonei de contact hertzian dintre 2 piese.

Pentru adâncimi mai mari de $0,4 \cdot B$ se poate vorbi despre fisuri initiate în substrat, întrucât efectele zonei de suprafata sunt nesemnificative în initierea fisurii.

4.1 CÂMPURILE DE TENSIUNI ALE DISLOCATIILOR DE LA INTERFATA PIESELOR

Câmpul de tensiuni de la limita dislocatiei din apropierea interfetei de alunecare dintre doua corpuri a fost studiat pentru prima data de Head [6]. În situatia prezentata în figura 4, pentru cazul în care vectorul Burghers b_y este perpendicular pe suprafata de alunecare ($\theta = 0$) în punctul de coordonate $(s, 0)$, câmpul de tensiuni poate fi exprimat astfel [1]:

$$t'_{xx} = D' \left\{ \frac{x[(y-s)^2 - x^2]}{r_1^2} + 2sx \frac{(2s-y)(y+s)^2 + (3y+2s)x^2}{r_2^2} \right\} \quad (4.1)$$

$$t'_{yy} = D' \left\{ \frac{x[3(y-s)^2 + x^2]}{r_1^2} + 2sxy \frac{3(y+s)^2 - x^2}{r_2^2} \right\} \quad (4.2)$$

$$t'_{xy} = D' \left\{ \frac{(y-s)[(y-s)^2 - x^2]}{r_1^2} + s \frac{(s-y)(y+s)^3 + 6y(y+s)x^2 - x^4}{r_2^2} \right\} \quad (4.3)$$

în care: $D' = Eb_y / 4p(1-n^2)$; $r_1 = (y-s)^2 + x^2$; $r_2 = (y+s)^2 + x^2$; $b_y = b \cdot \cos q$

- t'_{ij} - câmpul de tensiuni ale unei dislocatii având componenta vectorului Burgher b_y perpendiculara pe suprafata de alunecare;
- $E_1 = E_2 = E$ - modulul Young pentru cele doua corpuri;
- $n_1 = n_2 = n$ - coeficientii lui Poisson pentru cele doua corpuri;
- q - unghiul de înclinare a benzii de alunecare.

Câmpul de tensiuni ale unei dislocatii având componenta b_x paralela cu suprafata de alunecare ($q = p/2$), în cazul unor conditii de alunecare la limita, $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ la $y = 0$, iar u_y si τ_{yy} sunt continue de-a lungul $y = 0$, sunt [1]:

$$t''_{xx} = D'' \left\{ \frac{(y-s)[(y-s)^2 + 3x^2]}{r_1^2} - \frac{y(y+3s)(y+s)^3 + 2[y^3 + s^3 + (y+s)^3]x^2 + (3y+4s)x^4}{r_2^3} \right\} \quad (4.4)$$

$$t''_{yy} = D'' \left\{ \frac{(y-s)[(y-s)^2 - x^2]}{r_1^2} - y \frac{y(y-s)(y+s)^3 + 6s(y+s)x^2 - x^4}{r_2^3} \right\} \quad (4.5)$$

$$t''_{xy} = D'' \left\{ \frac{x[(y-s)^2 - x^2]}{r_1^2} - x \frac{(y+s)^2(y^2 - 4sy + s^2) + 2syx^2 - x^4}{r_2^3} \right\} \quad (4.6)$$

în care: $D'' = \frac{Eb_x}{4p(1-n^2)}$; $b_x = b \cdot \sin q$.

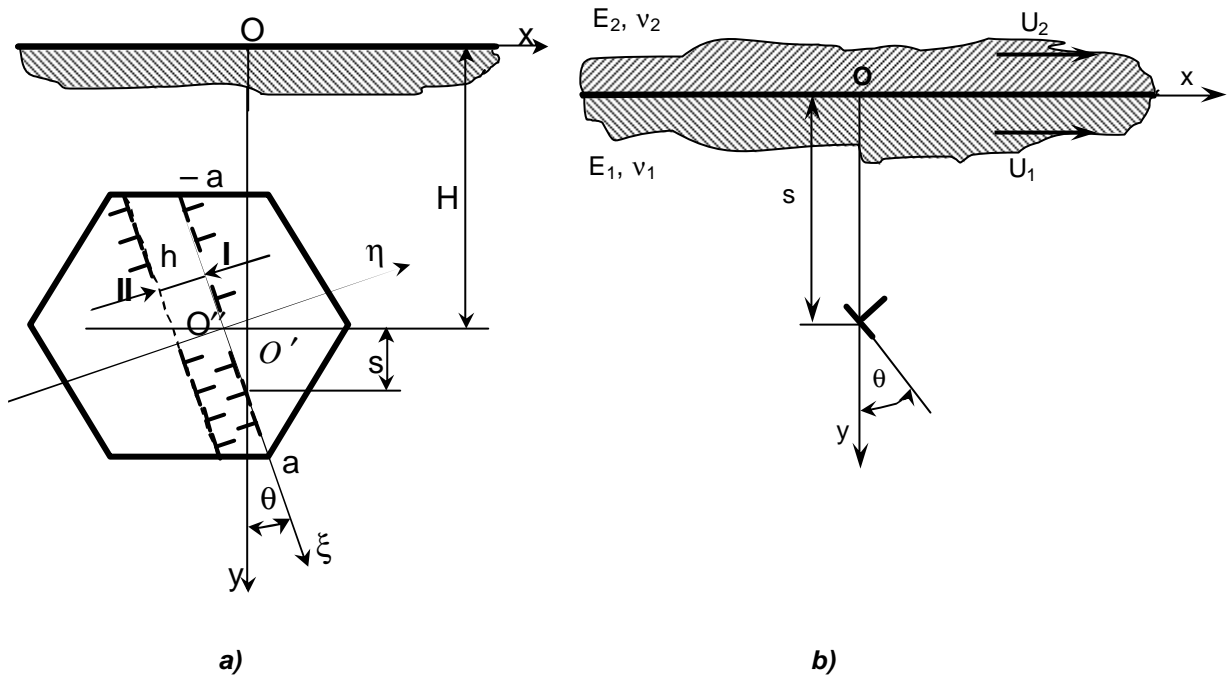


Fig. 4 Dislocatii in apropierea suprafetei înclinate cu unghiul ?

În cazul în care vectorul Burger are un unghi q arbitrar fata de axa Oy (cazul general prezentat în figura 4 b) tensiunea tangentiala care tinde sa deplaseze dislocatia prin alunecare se poate exprima printr-o relatie de forma:

$$t_{xy} = (\cos^2 q - \sin^2 q)(t'_{xy} + t''_{xy}) - \sin q \cos q (t'_{yy} + t''_{yy} - t'_{xx} - t''_{xx}) \quad (4.7)$$

Aceasta ecuatie poate fi utilizata în determinarea tensiunii totale data de catre toate dislocatiile de pe stratul I, t_i^D , în vederea determinarii numarului de cicluri de sollicitare corespunzatoare duratei de initiere a fisurii [1], [16].

4.2 MODEL MICROMECHANIC DE NUCLEATIE A FISURII

Mecanismul nucleatiei fisurii este un proces complex fiind influentat de material încarcare, temperatura, zona limitrofa etc. Modelele propuse trebuie sa prezinte atât cantitativ numărul de cicluri de sollicitare necesare nucleatiei fisurii cât si parametrii microstructurii, pentru a se putea crea corelatia dintre acestia si comportarea la oboseala.

Cu toate ca exista o multitudine de expresii pentru modelarea ratei de crestere a fisurii, exista doar un numar redus de modele analitice privind nucleatia fisurii.

Majoritatea observatiilor arata faptul ca fisurile tind sa nucleeze în apropierea suprafetei libere datorita faptului ca aici se afla sarcinile cele mai mari, dar si datorita faptului ca deformatia fiecarui graunte se va concentra într-un plan cristalografic preferential (pe când în interior, deformatia unui plan cristalografic este împiedicata de restrictiile impuse de grauntii înconjuratori).

Rezultatele experimentale arata ca defectele din material pot cauza nucleatia fisurii de-a lungul unui plan de alunecare preferential, actionând ca un concentrator de tensiuni. Ruperea coeziunii prin benzile de alunecare poate provoca nucleatii chiar daca nu este prezent nici un defect.

Exista 2 tipuri fundamentale diferite de benzi care induc nucleatia fisurii. Primul (Forsyth), presupune cazul în care o fisura foarte mica (mult mai mica decât marimea grauntelui) nucleaza de-a lungul unui plan de alunecare foarte devreme în timp. Marimea zonei plastice este relativ mica, fiind egala sau mai mica decât marimea fisurii. Aceasta se propaga prin Modul II (figura 1, M II) pâna când întâlnește un obstacol, cel mai adesea limita unui graunte.

Al doilea tip este nucleatia brusca a fisurii. Acest caz apare atunci când se formeaza foarte devreme o banda de alunecare care se întinde peste graunte, dar nu se formeaza nici o fisura. Prin continuarea solicitarii ciclice, banda de alunecare este blocata de limita grauntelui, nu creste în lungime, dar adâncimea si latimea benzii de alunecare cresc usor pâna când se formeaza brusc o fisura. Acest comportament este observat în multe aliaje printre care si otelul.

Modelul Tanaka–Mura pentru determinarea numarului de cicluri necesare nucleatiei fisurii se aplica în cazul componentelor metalice la care nucleatia ia nastere prin distrugeri date de tensiuni tangentiale transgranulare.

Se pleaca de la conditia de echilibru pentru prima încarcare:

$$t_1^D + (t_1 - k) = 0 \quad (4.8)$$

în care:

- k este tensiunea de frecare (are ca semnificatie fizica rezistenta materialului la miscarea dislocatiei; este o functie de duritatea Rockwell a materialului, de temperatura si tensiunea de curgere a materialului);
- t_1 este tensiunea tangentiala aplicata (trebuie ca $t_1 > k$ pentru ca distrugerea datorata acumularii dislocatiilor sa apara);
- t_1^D este tensiunea totala datorata tuturor dislocatiilor din stratul I (figura 4).

Se presupune ca nucleatia fisurii are loc atunci când energia totala de deformatie a dislocatiilor înmagazinata dupa N_n cicluri, este egala cu energia de rupere a grauntelui:

$$N_n \Delta U = 2rW_s \quad (4.9)$$

Se obtine astfel numarul de cicluri de solicitare necesare nucleatiei fisurii [16]:

$$N_n = \frac{4GW_s}{(\Delta t - 2k)^2 p(1-n)d} \quad (4.10)$$

în care:

- d este diametrul grauntelui;
- W_s este energia specifica de rupere pe unitatea de suprafata;
- ν este coeficientul lui Poisson;
- G este modulul de elasticitate transversal al materialului;
- Δt amplitudinea tensiunii tangentiale pe stratul de alunecare.

Ecuatia (4.10) mai poate fi scrisa sub forma:

$$\Delta t = 2k + \left(\frac{4GW_s}{p(1-n)} \right)^{\frac{1}{2}} d^{-\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

care este de forma ecuatiei Hall-Petch (de dependenta dintre rezistenta la oboseala si marimea grauntelui).

Ipoteze si limitari ale modelului:

1. Grauntele este omogen, nu si isotrop – dislocatiile se pot misca liber la limita grauntilor;
2. Defectele se acumuleaza într-un singur sistem planar de alunecare. Nucleatia fisurii apare pe suprafata grauntilor care nu sunt atât de constrânsi ca aceia din interior;
3. Marimea nucleatiei fisurii este egala cu marimea grauntelui;
4. Miscarea dislocatiilor este ireversibila.

Modele similare se propun pentru determinarea numarului de cicluri de sollicitare necesare cresterii fisurilor mici [1], [16].

Modelarea propagarii fisurilor presupune determinarea cât mai exacta a valorii factorului intensitatii tensiunii, foarte des utilizate fiind Metoda Elementului Finit (Finit Element Method, FEM) sau Metoda Elementelor de Frontiera (Boundary Element Method, BEM).

Durata de viata totala a unui element supus sollicitarii de oboseala cuprinde numarul total de cicluri necesare atât initierii cât si propagarii fisurii.

5. BIBLIOGRAFIE

1. CHENG, W. s. a. – *Micromechanics Modelling of Crack Initiation Under Contact Fatigue*, Journal of Tribology, vol. 116, January 1994;
2. CIOCLOV, D. – *Mecanica ruperii materialelor*, Editura Academiei R.S.R., Bucuresti, 1977.
3. EKBERG, A., BJHARNEHED H. – *Rolling Contact Fatigue of Wheel/Rail System – A Literature Survey*, Division of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1995.
4. de los RIOS, E.R., NAVARRO, A. – *Considerations of Grain Orientation and Work Hardening on Short-Fatigue-Crack Modelling*, Phil. Mag. A, vol. 16, no. 3, 1990.
5. FRUNZA, G. – *Plasticitate si rupere. Elemente de mecanica ruperii*, Tipografia Universitatii “Stefan cel Mare”, Suceava, 1996.
6. HEAD, A. K. – *Edge Dislocation in Inhomogeneous Media*, The Proceedings of The Physical Society, Section B, vol. 66, part 9;
7. KRAISHEK, M.K., KHAN S. A. – *Maximum stress triaxiality ratio criterion for mixed mode crack initiation in anisotropic materials*, Department of Mechanical Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 1997.
8. LIN T.H. – *Micromechanics of Crack Initiation in High – Cycle Fatigue*, Advances in Applied Mechanics, vol. 29, 1992.
9. LIU, M., FARRIS, T. N. – *Effect of Three – Dimensional Near Surface Defects on Rolling and Sliding Contact Fatigue*, Journal of Tribology, vol. 116, October, 1994.
10. MURA, T., NAKASONE, Y. – *A Theory of Fatigue Crack Initiation in Solids*, ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 57, 1990.
11. OLARU, D. N. – *Tribologie. Elemente de baza asupra frecarii, uzarii si ungerii*, Litografia Institutului Politehnic “Gheorghe Asachi”, Iasi, 1995.
12. PAVEL, T. – *Mecanica plasticitatii si a ruperii*, Centrul de multiplicare Universitatea “Politehnica” Timisoara, 1997.
13. TAIRA, S., TANAKA, K. and HOSHINA, M. – *Grain Size Effect on Crack Nucleation and Growth in Long-Life Fatigue of Low-Carbon Steel*, Fatigue Mechanics, ASTM STP 675, Ed. Fong, J.T., 1979
14. TANAKA, K., MURA, T. – *A Dislocation Model for Fatigue Crack Initiation*, ASME J. Appl. Mech., Vol. 48, 1981.
15. TRIPA, P. – *Mecanica plasticitatii si a ruperii*. Centrul de multiplicare Universitatea “Politehnica” Timisoara, 1997.
16. TYRON, R. G. – *Probabistic Mesomechanical Fatigue Mbdel*, Lewis Research Center, Grant NGT-51053, April 1997.