



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

CONSIDERAȚII PRIVIND NECESITATEA ABORDĂRII FENOMENULUI DE OBOSEALĂ LA MAI MULTE SCĂRI. OBOSEALA MESOSCOPICĂ (I)

Ion DUMITRU, Pavel TRIPA, Lorand KUN

CONSIDERATIONS REGARDING THE NECESSITY OF FATIGUE APPROACH ON DIFFERENT SCALES. FATIGUE MESOSCOPIC (I)

An extensive literature review is presented in this paper, composed of several parts, regarding the present-day topic of mesoscopic fatigue of materials. This subject is scarcely represented in the literature from our country.

The authors present a short and accessible approach in order to familiarize research and production engineers with the new aspects of fatigue calculation based on the transition from macro to meso scale. Mesoscopic fatigue takes into account the material's behavior at the level of crystal grains.

Cuvinte cheie: oboseală, număr cicluri, macroscopic, mesoscopic
Keywords: fatigue, number of cycles, macroscopic, mesoscopic

1. Introducere

Fenomenele care conduc la ruperea prin oboseală diferă substanțial de cele care se observă la ruperile statice. Ruperile prin oboseală pot fi cauzate de anumite fisuri existente sau defecte de material. În vecinătatea acestora se produce o concentrare puternică a tensiunilor urmată de o propagare după o perioadă mai lungă sau mai scurtă de incubare.

În cadrul lucrării se analizează situația inexistenței unor asemenea defecte sau fisuri și când apare o perioadă de timp necesară formării primelor fisuri detectabile, înainte de ruperea finală. Această perioadă reprezintă o parte importantă din durata de viață, în special pentru domeniul durabilității la numere mari de cicluri. Corespunzător acestor regimuri de încărcare nu apar deformații plastice la scară microscopică (inginerească), în schimb acestea se concentrează în benzile de lunecare ale unor grăunți. Această observație a fost confirmată de numeroasele studii cu privire la modificările structurale la oboseală, în particular cu formarea benzilor de lunecare persistente asociate cu formarea extruziunilor și intruziunilor [1].

Una dintre caracteristicile de bază ale oboselii constă tocmai în neomogenitatea distribuției în material a deformațiilor ciclice, în special la numere mari de cicluri. Pornind de la acest aspect trebuie subliniată dificultatea elaborării unor metode de calcul care să fie folosite de ingineri pentru o evaluare predictivă cantitativă a rezistenței la oboseală a unei structuri bazată numai pe considerente macroscopice [2]. Aceasta se justifică direct prin faptul că înainte de inițierea fisurilor de oboseală nu apar modificări în ceea ce privește comportarea elastică a materialului. Cu toate că la scară microscopică detectarea degradării la oboseală nu este posibilă, la nivelul unor grăunți apar o serie de procese ireversibile care conduc la inițierea primelor fisuri de oboseală.

Cele de mai sus atrag atenția asupra necesității abordării calculului de oboseală la mai multe niveluri sau scări, în dependență directă cu domeniile de durabilitate.

2. Niveluri (scări) de abordare a fenomenului de oboseală

Fenomenului de oboseală îi sunt caracteristice trei scări sau niveluri de abordare:

a) *Scara microscopică* ($\sim 10^{-10}$ m) sau scara distanțelor interatomice (a dislocațiilor). Degradarea la acest nivel se analizează pe baza deformațiilor elasto-plastice și plastice concentrate în benzile de lunecare persistente.

b) *Scara mesoscopică* ($\sim 10^{-6}$ m) la nivelul unui grăunte sau a câțiva grăunți, când fenomenul de degradare este concentrat atât la granița grăunților cât și în interiorul acestora.

c) *Scara macroscopică* ($\sim 10^{-3}$ m) sau scara inginerească la care analiza se efectuează pe elemente de volum cu dimensiunile specifice unor discretizări obișnuite cu elemente finite.

Cele trei niveluri de abordare a fenomenului de oboseală trebuie discutate în directă dependență cu domeniile clasice de durabilitate, definite pe o curbă Wöhler (figura 1)

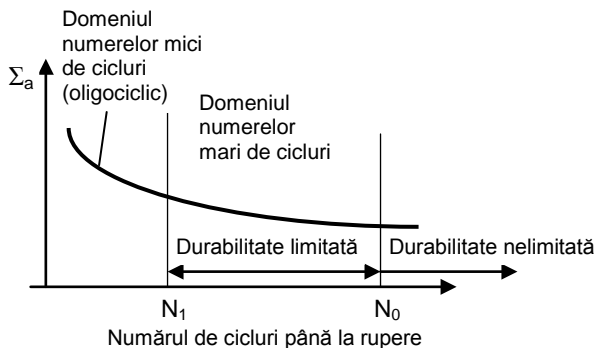


Fig.1 Curba Wöhler cu domeniile de bază ale durabilității

În domeniul numerelor mici de cicluri (domeniul oligociclic) observațiile fizice indică prezența deformațiilor plastice atât la nivelul macroscopic cât și mesoscopic. La nivelul mesoscopic grăunții metalului capătă niște deformații plastice omogene. Primele microfisuri în benzile persistente de lunecare apar destul de devreme și ele au un rol important asupra duratei de viață a structurii. Între tensiuni și deformații se pot stabili anumite relații care sunt influențate de regimul de încărcare. Odată cu mărirea sarcinii ciclice scara macroscopică și mesoscopică redau aceeași comportare a materialului.

În domeniul numerelor mari de cicluri până la rupere trebuie efectuată o analiză separată pentru subdomeniile *duratelor de viață limitată și nelimitată*. Analiza la nivel macroscopic atât pentru durata de viață limitată cât și nelimitată indică o cedare a structurii în condițiile unor solicitări elastice.

Din punct de vedere al scării mesoscopice situațiile sunt cu totul diferite. La scara mesoscopică grăunții cedează în condiții de solicitări elastice numai pentru duratele de viață nelimitate. Pentru duratele de viață limitate analiza la nivel mesoscopic indică prezența deformațiilor plastice într-un număr limitat de grăunți. Numai anumite cristale cu orientări nefavorabile capătă lunecări plastice, fapt ce conduce la o eterogenitate a distribuției microfisurilor. Durata până la

inițierea primei fisuri vizibile la scară microscopică reprezintă o parte importantă a durabilității la oboseală.

În figura 2 se prezintă distribuția deformațiilor plastice pentru o plasticitate generalizată (numere mici de cicluri până la rupere) și o plasticitate localizată pentru subdomeniul durabilității limitate.

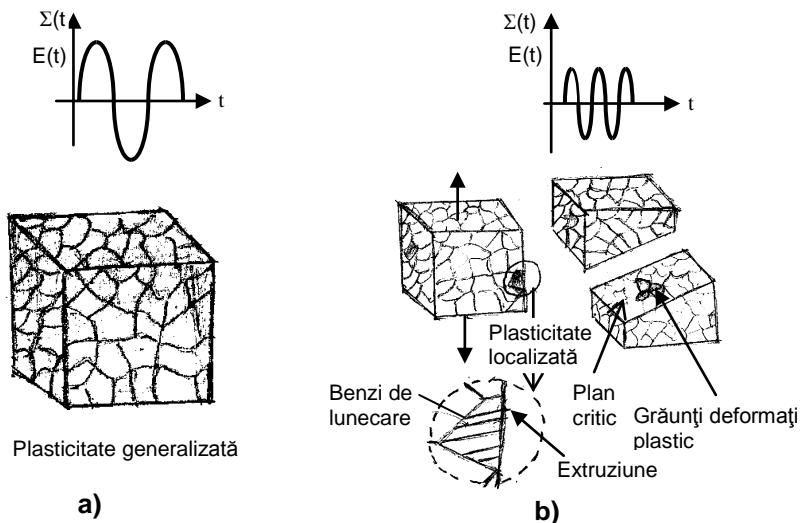


Fig. 2 Reprezentarea schematizată a deformațiilor plastice

3. Scara mesoscopică. Metode de trecere de la scara macroscopică la scara mesoscopică

Pe baza celor prezentate anterior reiese că fenomenul de degradare la oboseală atât pentru numere mari de cicluri până la rupere cât și pentru numere mici pornește de la nivelul grăunților, fapt ce impune abordarea obosealii la nivel mesoscopic. Scara macroscopică este definită printr-un element de volum reprezentativ (E. V. R.), volum V care se presupune omogen și izotrop în care tensiunile macroscopice Σ și deformațiile macroscopice E se presupun constante. În cazul metalelor E. V. R. conține un număr mare de cristale cu multiple orientări și diferite stări interioare. Scara mesoscopică are ordinul de mărime a unui grăunte, care constituie un element al volumului V .

Tensiunile și deformațiile mesoscopice notate cu $\underline{\underline{\sigma}}$ și $\underline{\underline{\varepsilon}}$ nu sunt omogene în E.V.R. și în consecință ele diferă de $\underline{\underline{\Sigma}}$ și $\underline{\underline{E}}$.

Notăția tensiunilor și a deformațiilor a avut în vedere că acestea sunt niște tensori de ordinul doi. În general, trecerea de la mărimile macroscopice la cele mesoscopice nu se poate face direct printr-o simplă mediere. În figura 3 sunt reprezentate scările macroscopice și mesoscopice pentru un metal policristalin.

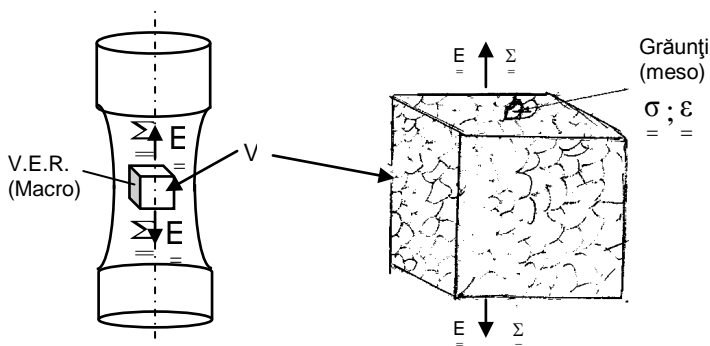


Fig. 3 Scara macroscopică și mesoscopică pentru un metal policristalin

Condițiile de trecere de la scara mesoscopică la scara macroscopică au fost stabilite de Hill și Mandel [3], [4], [5]. În conformitate cu acești autori tensiunile la scară mesoscopică sunt date de ecuația:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : \underline{\underline{\Sigma}} + \underline{\underline{\rho}} \quad (1)$$

unde: $\underline{\underline{A}}$ reprezintă un tensor de localizare al tensiunilor mesoscopice,

care ia în considerare atât dispunerea volumului V în cadrul elementului de rezistență considerat cât și dispunerea grăuntelui în cadrul V. E. R. Evident că acesta este un tensor de ordinul patru.

$\underline{\underline{\rho}}$ reprezintă tensorul tensiunilor reziduale (remanente) locale la nivel mesoscopic.

Pentru determinarea tensiunilor mesoscopice din relația (1) sunt necesare unele ipoteze simplificatoare cunoscute sub numele de *ipotezele Lin-Taylor*. În conformitate cu prima ipoteză, pentru numere mari de cicluri până la rupere, deformațiile $\underline{\underline{\varepsilon}}$ la scară mesoscopică se presupun egale cu deformațiile macroscopice $\underline{\underline{E}}$:

$$\underline{\underline{E}} = \underline{\underline{\varepsilon}} \Rightarrow \underline{\underline{E}}^e + \underline{\underline{E}}^p = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad (2)$$

Indicii e și p indică componentele elastice și plastice ale deformațiilor.

Rămânând în domeniul elastic (cazul oboselii la numere mari de cicluri), se poate neglija $\underline{\underline{E}}^p$ față de $\underline{\underline{E}}^e$. Rezultă:

$$\underline{\underline{E}} \approx \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad (3)$$

Acceptând de asemenea că grăunții și matricea au aceleași caracteristici elastice (aceleași module de elasticitate) se poate scrie egalitatea între tensorii elasticitate mesoscopici și macroscopici:

$$\underline{\underline{L}} = \underline{\underline{I}} \quad (4)$$

Se obține:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{I}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \quad \text{și} \quad \underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{L}} \cdot \underline{\underline{E}} \quad (5)$$

Din ecuațiile (3) și (5) rezultă:

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{L}} \cdot (\underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p) \quad (6)$$

Se evidențiază că $\underline{\underline{\varepsilon}}^p$ este un tensor deviator și care se obține din ecuația (7) care leagă între ele scara macroscopică de scara mesoscopică:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\Sigma}} - 2\underline{\underline{\mu}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad (7)$$

În aceste condiții, se definește tensorul deviator sau tensorul tensiunilor reziduale:

$$\underline{\rho} = -2\underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon}^p \quad (8)$$

unde $\underline{\mu}$ este constanta lui Lamé.

Ecuția (7) este cunoscută sub numele de ecuația Lin – Taylor. Din (7) și (8) se obține forma generală:

$$\underline{\sigma} = \underline{\Sigma} + \underline{\rho} \quad (9)$$

Din ecuația (9) se vede că pentru a calcula tensiunile mesoscopice este necesar să fie evaluate deformațiile plastice mesoscopice.

Se presupune de obicei că există un singur sistem de alunecare activ la nivelul unui grăunte. Acesta poate defini prin tensorul de orientare \underline{a} în raport cu un sistem de coordonate fix, sub forma:

$$\underline{a} = \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{n} \otimes \underline{m} + \underline{m} \otimes \underline{n} \right) \quad (10)$$

unde: \underline{n} este vectorul unitar normal la planul de alunecare (plan critic)

\underline{m} - direcția de alunecare din planul critic.

În aceste condiții, tensiunea tangențială dintr-un grăunte devine:

$$\underline{\tau} = \underline{\sigma} : \underline{a} \quad (11)$$

Deformația plastică mesoscopică $\underline{\varepsilon}^p$ se corelează cu amplitudinea

alunecării plastice mesoscopice $\underline{\gamma}^p$ sub forma:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\gamma}^p \cdot \underline{a} \quad (12)$$

Pe baza celor de mai sus ecuația Lin – Taylor (7), capătă altă formă:

$$\underline{\tau} = \underline{T} - \underline{\mu} \cdot \underline{\gamma}^p \cdot \underline{m} \quad (13)$$

unde \underline{T} și $\underline{\tau}$ reprezintă tensiunile tangențiale macroscopice și mesoscopice, după singura direcție de alunecare \underline{m} :

$$\underline{\tau} = \left(\underline{m} \cdot \underline{\sigma} \cdot \underline{n} \right) \cdot \underline{m} \quad (14)$$

$$T = \left(m \cdot \Sigma \cdot n \right) \cdot m \quad (15)$$

Trebuie subliniat că aceste ecuații care iau în considerare localizarea rupei prin oboseală consideră că materialul are o comportare perfect elasto-plastică fără prezența unor degradări anterioare la scară mesoscopică sau microscopică.

Pe baza celor de mai sus au fost propuse o serie de criterii mesoscopice pentru evaluarea duratei de viață în condiții de triaxialitate a tensiunilor (oboseala multiaxială). Dintre aceste criterii cele mai reprezentative sunt: *criteriul Van Dang* (C. V. D.), *criteriul Papadopoulos* și *criteriul Morel* [6], [7], [8], [9].

În cele ce urmează se face o prezentare în detaliu a criteriului Van Dang (C. V. D.) fiind în prezent unul dintre cele mai folosite criterii mesoscopice aplicabil pentru diverse elemente și structuri de rezistență din construcția de mașini.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Dumitru, I., *Bazele calculului la oboseală*. Editura Eurostampa, Timișoara, 2009.
- [2] Dumitru, I., Kun, L., *On the Multiaxial High Cycle Fatigue Damage Parameters*, Buletinul Universității Petrol și Gaze Ploiești, Vol. LXIII, Nr. 1/2011, pag. 117-126, Seria Tehnică.
- [3] Hill, R., *The essential structure of constitutive laws for metals composites and polycrystals*. J. Mech.Phys. Solides, No. 19, 1967.
- [4] Mandel, J., *Plasticité classique et viscoplasticité*. In Courses and lectures of CISM, No. 97, New-York, 1971, Springer-Verlag Publishers.
- [5] Mandel, J., *Adaptation d'une structure plastique écrouissable*. Mech. Res. Comm., No. 3, pag. 251-256, 1976.

Prof.Dr.Ing. Ion DUMITRU,
 Universitatea "POLITEHNICA" Timișoara, membru AGIR
 e-mail: dion@clicknet.ro
 Prof.Dr.Ing. Pavel TRIPA,
 Universitatea "POLITEHNICA" Timișoara, membru AGIR
 e-mail: ptripa@yahoo.com pavel.tripa@mec.upt.ro
 Drd.Ing. Lorand KUN,
 Universitatea "POLITEHNICA" Timișoara,
 e-mail: kunlori@yahoo.com