A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

METODE DE DETERMINARE A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ
partea a II-a

Daniel Gheorghe LAKATOS, Mircea BEJAN

METODHS FOR DETERMINING THE RESISTANCE TO FATIGUE - II

Although the total number of parts that break during service is not great, however over 50 % of the breaks are caused by fatigue cracking or corrosion fatigue, and so is of a great importance the knowledge and mastery of this phenomenon.

The present work contains both a summary of methods for determining the resistance to fatigue and also the procedures for determining the coefficient of safety in different situations.

Cuvinte cheie: durabilitate, rezistență, oboseală, diagramă
Keywords: durability, resistance, fatigue, diagram

● O altă metodă de de determinare a coeficientului de siguranță la oboseală în domeniul durabilității nelimitate este ***metoda bazată pe menținerea constantă a tensiunii minime*** în cazul diagramei Haigh schematizată după Goodman. În această situație $\sigma_{min} = \text{const.}$ [4].

Coordonatele punctului L_3 care reprezintă ciclul limită de comparație se găsesc prin intersecția dreptelor având ecuațiile:

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{-1}} + \dfrac{\sigma_{med_L}}{\sigma_r} = 1 \\ -\dfrac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{min}} + \dfrac{\sigma_{med_L}}{\sigma_{min}} = 1 \end{array}\right\}$$

Din ecuația a doua rezultă:

$$\sigma_{med_L} = \sigma_{min} + \sigma_{am_L}$$

Înlocuind în prima ecuație a sistemului se obține:

$$\frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{am_L} + \sigma_{min}}{\sigma_r} = 1$$

de unde

$$\sigma_{am_L} = \frac{\sigma_{-1}\left(\sigma_r - \dfrac{\sigma_{med} - \sigma_{am}}{2}\right)}{\sigma_r + \sigma_{-1}}$$

Coeficientul de siguranță calculat pe baza amplitudinilor devine:

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{am}} = \frac{\sigma_{-1}\left(\sigma_r - \dfrac{\sigma_{med} - \sigma_{am}}{2}\right)}{\sigma_{am}\left(\sigma_r + \sigma_{-1}\right)}.$$

● ***Metoda V.D.I. aplicată în cazul diagramei Haigh*** schematizată după Serensen. Conform metodei V.D.I. ($\sigma_{med} = \text{const.}$) ciclul limită de comparație este reprezentat prin punctul L_1, coordonatele sale regăsindu-se prin intersecția dreptei care trece prin punctele A și C și a unei drepte paralelă cu axa ordonatelor care trece prin punctul P.

$$\left\{\begin{array}{l} \sigma_{am_L} + \dfrac{\sigma_{med_L}}{\dfrac{\sigma_0\sigma_{-1}}{2\sigma_{-1}-\sigma_0}} = 1 \\ \sigma_{med_L} = \sigma_{med} \end{array}\right\}$$

Înlocuind pe σ_{med_L} din a doua ecuație în prima se obține:

$$\frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{med}}{\dfrac{\sigma_0\sigma_{-1}}{2\sigma_{-1}-\sigma_0}}$$

de unde:

$$\sigma_{am_L} = \sigma_{-1}\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\dfrac{\sigma_0\sigma_{-1}}{2\sigma_{-1}-\sigma_0}}\right)$$

Pe această bază se poate calcula coeficientul de siguranță :

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{am}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{am}}\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\dfrac{\sigma_0\sigma_{-1}}{2\sigma_{-1}-\sigma_0}}\right)$$

Înlocuind pe σ_{med_L} din a doua ecuație în prima se obține:

$$\frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{am_L}\sigma_{med}(2\sigma_{-1}-\sigma_0)}{\sigma_{am}\sigma_0\sigma_{-1}} = 1$$

de unde:

$$\sigma_{am_L} = \frac{\sigma_{am}\sigma_0\sigma_{-1}}{\sigma_{am}\sigma_0 + \sigma_{med}(2\sigma_{-1}-\sigma_0)}$$

În aceste condiții coeficientul de siguranță calculat pe baza amplitudinilor devine:

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{am}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{am} + \sigma_{med}\left(\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}\right)}$$

● Conform ***metodei Soderberg aplicată în cazul diagramei Haigh schematizată după Serensen*** ciclul limită se alege păstrând constant gradul de asimetrie al ciclului efectiv, deci ciclurile limită se situează pe drepte care trec prin originea sistemului de axe.

Initial se determină coordonatele punctului L_2 care reprezintă caracteristicile ciclului limită cu care se compară ciclul efectiv P. Punctul L_2 se situează la intersecția dreptelor având ecuațiile:

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{\sigma_{am_L}}{\sigma_{-1}} + \dfrac{\sigma_{med_L}}{\dfrac{\sigma_0\sigma_{-1}}{2\sigma_{-1} - \sigma_0}} \\ \sigma_{am_L} = \dfrac{\sigma_{am}}{\sigma_{med}}\sigma_{med_L} \end{array}\right\}$$

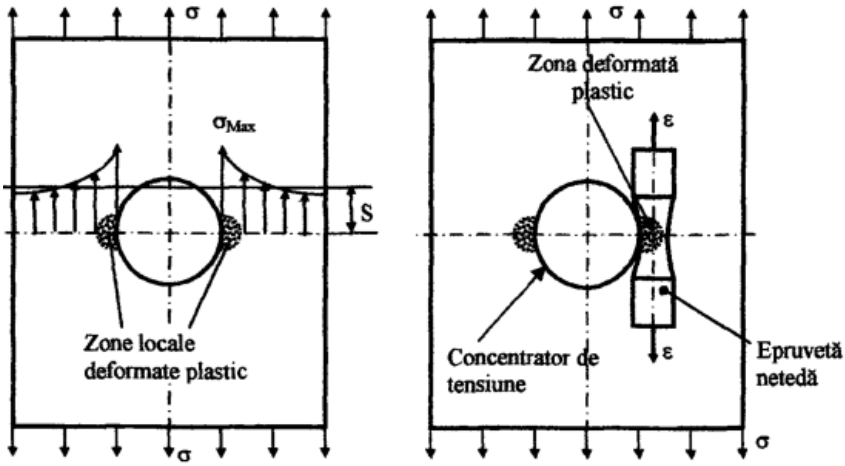
4. Calculul durabilității la solicitări variabile pe baza deformațiilor (Strain-Life)

Metoda prezentată în paragraful anterior, conform căreia tensiunile pot caracteriza o solicitare ciclică a avut la bază o analiză elastică.

Acest mod de abordare este specific încărcărilor reduse care produc deformaţii elastice.

În practică există numeroase situaţii de piese sau elemente de rezistenţă la care deşi tensiunile nominale rămân în domeniul elastic, apariţia unor suprasarcini ocazionale sau prezenţa unor concentratori de tensiuni, pot conduce la apariţia unor deformații plastice în zone limitate de material (figura 3). Evident că în asemenea situaţii, cu toate că în jurul acestor zone materialul este solicitat elastic, tensiunea

nominală, S nu mai poate caracteriza comportarea la solicitări variabile a piesei sau elementului de rezistenţă considerat.



a) b)

Fig. 3 Placă cu concentrator de tensiune solicitată la tracțiune
a) distribuția tensiunilor reale și nominale; b) zonă deformată plastic și epruveta care modelează comportarea materialului în prezența deformațiilor plastice

Pentru calculului durabilităţii pe baza deformațiilor după efectuarea încercării epruvetei până la rupere se trasează ***curba convențională*** și ***curba caracteristică reală***.

Curba caracteristică convențională (engineering stress-strain curve) se trasează folosind coordonatele: tensiunea convențională, S și definiția specifică convențională e.

$$S = \frac{F}{A_0}$$

unde: F reprezintă forța aplicată;
A_0 reprezintă aria secțiunii inițiale a epruvetei.

Deformația specifică convențională se obține din raportul :

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

unde: L_0 - reprezintă lungimea inițială a bazei tensometrice;

L - reprezintă lungimea aceleiași baze tensometrice la o anumită încărcare F.

Având în vedere că în cursul încercării secțiunea epruvetei se modifică, rezultă tensiunea reală σ:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

unde: A reprezintă aria instantanee a secțiunii epruvetei.

Similar se obține și deformația specifică reală ε considerând o bază tensometrică instantanee:

$$\varepsilon = \int_{Lo}^{L} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Pe baza tensiunilor σ și a deformațiilor reale ε se trasează curba caracteristică reală.

La durabilități mici de până la 10^5 cicluri, încercările la oboseală se efectuează folosind epruvete netede (fără concentratori de tensiuni). Pe parcursul încercării se menține constantă amplitudinea deformației specifice a ciclului de solicitare, $\varepsilon_{am} = \Delta\varepsilon / 2$ până se produce cedarea, când se înregistrează numărul de inversiuni (semicicluri) 2N.

Controlul deformației în cursul încercării se face cu ajutorul unui extensometru.

Amplitudinea deformației specifice totale se descompune în 2 componente:

$$\varepsilon_{am} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varepsilon_{e_{am}} + \varepsilon_{p_{am}}$$

unde:

$\varepsilon_{e_{am}} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2}$ - amplitudinea deformației specifice elastice;

$\varepsilon_{p_{am}} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ - amplitudinea deformației specifice plastice.

Pe baza celor două ecuații se obține amplitudinea deformației totale:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f^{'}}{E}(2N)^b + \varepsilon_f^{'}(2N)^c$$

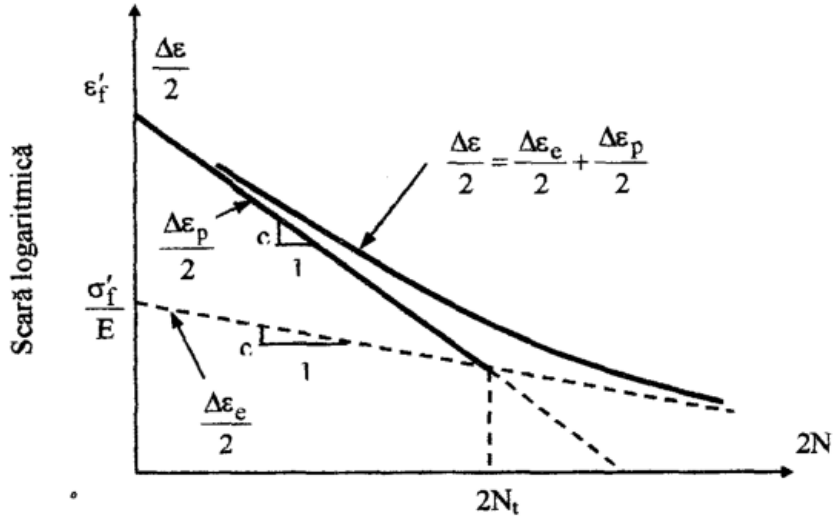


Fig. 4 Variația amplitudinii deformațiilor în funcție de numărul de inversiuni[1]

Curba amplitudinii deformației specifice totale se obține prin însumarea ordonatelor celor două drepte [4].

Cunoscând numărul de inversiuni pentru care are loc tranzacția este foarte importantă în ce privește alegerea unui material sau

[1] Expresia mai este cunoscută sub numele de ecuația Coffin-Manson și ea stă la baza calculului durabilității folosind deformațiile (Strain-Life) sau metoda ε-N

tratament care trebuie aplicate. Spre exemplu, pentru un număr de inversiuni $2N_t \approx 2 \cdot 10^3 \approx\sim 1000$ cicluri, pentru o piesa proiectată să aibă o durabilitate mai mare de $2N_t$ se va alege un material cu rezistența la rupere mare, iar pentru durabilitați sub 1000 de cicluri un material ductil.

5. Calculul la solicitări variabile pe baza propagării fisurilor. Metoda tolerării defectelor

Fisura reprezintă un concentrator de tensiuni, a cărui rază la vârf tinde spre zero, ceea ce face ca tensiunile reale teoretice să tindă spre infinit.

În condițiile unor încărcări cu sarcini finite, materialul se acomodează cu prezența unei fisuri inițial ascuțite, astfel încât tensiunile reale capătă valori finite.

Faptul că raza la vârful fisurii este diferită de zero și că tensiunile au valori finite, conduc la posibilitatea definirii deplasării de deschidere a vârfului fisurii, "crack-tip opening displacement" (CTOD).

Pe baza tensiunii maxime a ciclului efectiv de solicitare, σ_{max} se poate calcula coeficientul de siguranță $c_\sigma = \sigma_{max_L} / \sigma_{max}$

Evoluția unei fisuri în cursul propagării poate fi urmărită cel mai simplu pe baza diagramei: lungimea fisurii raportat la numărul de cicluri aplicat, N.

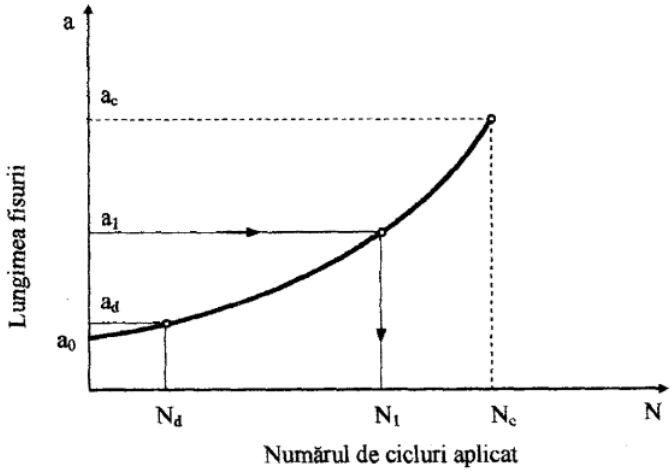


Fig. 5 Diagrama de variație a lungimii fisurii în funcție de numărul de cicluri

Având trasată o asemenea curbă și cunoscând lungimea fisurii a_1 la un moment dat se poate stabili numărul de cicluri până la rupere, N_1.

În principiu, odată cu creșterea lungimii fisurii respectiv cu creșterea nivelului de solicitare crește și viteza de propagare a fisurii la oboseală.

Pornind de la acestă observație a apărut ideea că viteza de propagare a fisurii de oboseală poate fi corelată cu variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK (factorul de intensitate a tensiunii corespunzător la un moment dat).

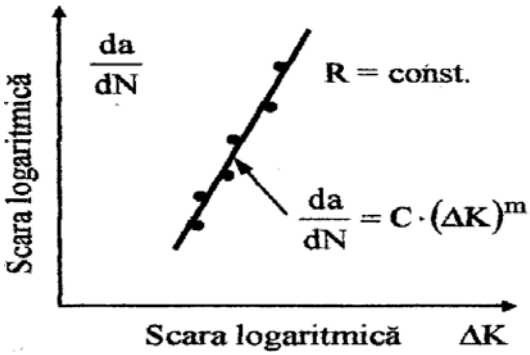


Fig. 6 Metoda trasării diagramei (da/dN)-ΔK

6. Concluzii

■ Ruperea prin oboseală este cauzată de acțiunea simultană a tensiunilor ciclice, a tensiunilor medii de întindere și a deformațiilor plastice. Dacă unul din acești factori lipsește, fisura prin oboseală nu se inițiază și ca urmare nici nu se extinde.

■ În literatura de specialitate există numeroase metode de determinare a coeficientului de siguranță în funcție de tipul de solicitare la care va fi supusă piesa în timpul serviciului. Cea mai utilizată metodă de calcul la oboseală este cea bazată pe analiza tensiunilor având ca element de bază trasarea curbei lui Wöhler.

■ Metoda bazată pe analiza tensiunilor este aplicabilă materialelor fără fisuri solicitate elastic și fabricate din oțel sau materiale feroase.

BIBLIOGRAFIE

[1] Rusu, O., Teodorescu, M., Lascu-Simion, N., *Oboseala metalelor – Baze de calcul I*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992.
[2] Rusu, O., Teodorescu, M., Lascu-Simion, N., *Oboseala metalelor – Aplicatii ingineresti II*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992.
[3] Buzdugan, Gh., Blumenfeld, M., *Calculul de rezistenta al pieselor de masini*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1979.
[4] Dumitru, I., *Bazele calculului la oboseala*, Editura Eurostampa, Timisoara, 2009.
[5] Newman, J.C.Jr., Phillips, E.P., Swain, H.M., *Fatigue-Life Prediction Methodology using Small-Crack Theory*, International Journal of Fatigue, vol.21, Issue 2, pag.109-119, 1999.
[6] Bejan, M., *Rezistenta materialelor*, vol 1 și 2, ediția a V-a și a IV-a, Editura AGIR, București, 2009 şi Editura MEGA, Cluj Napoca, 2009.
[7] Pănoiu, Gh., Bejan, M., *O metodologie de calcul la oboseală după codul ASME*. Știință și Inginerie, vol. 17 Editura AGIR, București, 2010, ISSN 2067-7138, *pag.* 649-654.

NOTĂ: Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul "Creșterea calităţii studiilor doctorale în ştiinţe inginereşti pentru sprijinirea dezvoltării societăţii bazate pe cunoaştere", contract: POSDRU/107/1.5/S/78534, proiect cofinanţat din Fondul Social European prin Programul Operaţional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

Drd.Ing. Daniel Gheorghe LAKATOS
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca,
membru AGIR
e-mail: lakatosdaniel_2005@yahoo.com

Prof.Dr.Ing. Mircea BEJAN
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca,
membru AGIR
e-mail: Mircea.Bejan@rezi.utcluj.ro