

Contribuții la calculul deteriorării materialelor îi echipamentelor de proces. I

VALERIU V. JINESCU*

Universitatea Politehnica București, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Catedra de Echipamente de Proces,
Splaiul Independenței, Nr.313, 060042, București, România

The calculus of the materials deterioration is the scientific base concerning the maintaining process or taking out the process equipments components, structures, engines gas or steam turbines, aircrafts, steam pipes etc. The materials behaviour in correlation with the types of loadings is an important step on the way of deterioration calculation. This is why one analyses and systematises the most important aspects of materials behaviour: static loaded below and over the creep temperature, rapid and shock loaded, fatigue loaded taking into account or not the cracks.

Keywords: materials behaviour, statical, rapid or shock loading, creep, fatigue

Evaluarea prin calcul a gradului de deteriorare a unei structuri oarecare este importantă în decizia menținerii sau scoaterii acesteia din funcțiune. Din punct de vedere fizic, deteriorarea poate fi determinată de agresivitatea mediului față de materialul de construcție, de creșterea peste limita admisă a valorii parametrilor de regim (presiune, temperatură, forță, viteză), de variația acestora în timp, de comportarea materialului în condițiile concrete ale solicitării etc.

În vederea calculului deteriorării este necesară întâi analiza și sistematizarea datelor privind comportarea materialelor la solicitări statice (sub și deasupra temperaturii de fluaj), la solicitări ciclice (care determină „oboseala” materialului), la solicitări rapide și prin șoc.

În general materialele sunt clasificate în materiale ductile (se deformează semnificativ înainte de rupere) și fragile (rupere fără deformații plastice), în funcție de capacitatea lor de deformare la temperatura mediului ambiant. În realitate, în anumite condiții de solicitare, un material considerat ductil se comportă fragil (materialul s-a fragilizat). Temperatura peretelui unui reactor sub presiune, de exemplu, precum și intensitatea solicitării termomecanice pot schimba comportarea materialului din ductil în fragil. Un material ductil care se deformează mult înainte de rupere, este considerat tenace. Astfel de materiale sunt preferate pentru recipientele sub presiune.

Comportarea materialelor solicitate static

Comportarea materialelor fără fisuri și respectiv cu fisuri se tratează diferit.

a. La solicitarea monotonă (cvasistatică) cu forța F a unei epruvete standard, lustruită și fără fisuri, dintr-un anumit material, se obține o diagramă caracteristică în coordonate tensiune - deformație specifică sau raportată. În acest scop se utilizează următoarele concepte:

-concepte ingineresti (convenționale),

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{A_0} \text{ - tensiune;} \\ \varepsilon &= \frac{\Delta l}{l_0} \text{ - deformație specifică sau raportată;} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

în care A_0, l_0 este aria secțiunii transversale inițială, respectiv lungimea inițială a epruvetei iar $\Delta l = l - l_0$ este lungimea epruvetei ca urmare a solicitării cu forța F , unde l este lungimea epruvetei după solicitare.

În aceste relații nu se ține seama de faptul că pe parcursul solicitării aria secțiunii transversale variază și ea cu $\Delta A = A - A_0$ unde A este aria secțiunii transversale la un moment dat al procesului de deformare. Pe baza ipotezei constanței volumului epruvetei solicitate, se poate scrie că $A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$.

Utilizarea conceptelor ingineresti σ și ε (1), la solicitarea în stare plastică, de exemplu, duce la rezultate diferite de realitate, ceea ce face ca la tensiuni superioare limitei de curgere să se recurgă la conceptele naturale;

-concepte naturale (după Hencky),

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{F}{A} \text{ - tensiunea naturală;} \\ \varepsilon_n &= \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \text{ - deformația specifică sau raportată naturală.} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Aceste concepte se utilizează la solicitările în stare plastică.

Între conceptele naturale și cele ingineresti există următoarele corelații:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_n &= \ln(1 + \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

La tensiuni sub limita de curgere se acceptă că materialele metalice se comportă liniar elastic, conform legii lui Hooke.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

unde E este modulul de elasticitate longitudinal. Dincolo de limita de curgere comportarea acestor materiale este neliniară și este redată de legea funcție de putere (atribuită lui Hollomon (1945)):

$$\sigma_n = M_\sigma \cdot \varepsilon_n^k, \quad (5)$$

în care M_σ și k sunt constante de material, funcție de temperatură. Pentru $k = 1$ și $M_\sigma = E$ legea (5) devine legea lui Hooke (4).

Se utilizează, uneori, legea Ramberg - Osgood, scrisă sub forma:

* Tel.: (+40) 021 402 94 88

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E} + \left(\frac{\sigma_n}{M_\sigma} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6)$$

în care modulul de elasticitate longitudinal E , calculat de pe diagrama σ - ε diferă neesențial de modulul calculat cu relația $E = \sigma_n / \varepsilon_n$.

Legile (5) și (6) se scriu uneori sub formă adimensională [1]:

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n,0}} = \beta \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{n,0}} \right)^{\frac{1}{k}}; \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n,0}} = \frac{\sigma_n}{\sigma_{n,0}} + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{n,0}} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (8)$$

în care $\varepsilon_{n,0}$ și $\sigma_{n,0}$ sunt deformația specifică naturală și tensiunea naturală de referință (uzual $\varepsilon_{n,0} \approx \sigma_{n,0} / E$).

Un material solicitat static este caracterizat de următoarele caracteristici mecanice: σ_c – limita de curgere la temperatura încercării; σ_r , ε_r – rezistența de rupere, respectiv deformația specifică sau raportată la rupere; $Z = (1 - A_r / A_0)$ – gătuirea la rupere, unde A_r este aria secțiunii transversale a epruvetei după rupere. Z dă indicații cu privire la ductilitatea materialului, la fel ca și deformația specifică la rupere, ε_r .

Corpul reactorului pentru presiuni medii și mari se realizează monobloc. În domeniul presiunilor mari se recurge uneori la autofretarea corpului monobloc. Începând cu zona superioară a presiunilor mari se recurge la corpuri multistrat fretate. La presiuni ultraînalte se recurge la corpuri fretate din cilindri care la rândul lor sunt autofretați.

$\dot{\varepsilon} = (d\varepsilon/dt)_{\varepsilon=\text{const}}$. Pentru fabricarea recipientelor sub presiune, în general, se recomandă utilizarea unor materiale tenace, cu capacitate relativ mare de deformare înainte de rupere.

b. Pentru o epruvetă cu fisuri de lungime $2a$ (fig. 1), se utilizează un concept relativ nou, factorul de intensitate a tensiunii, care conține atât tensiunea aplicată, cât și lungimea fisurii. În cazul solicitării departe de fisură, cu tensiuni normale σ , factorul de intensitate a tensiunii în zona fisurii are expresia generală,

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (9)$$

în care Y este un factor dependent de geometria corpului și de forma fisurii.

Din acest punct de vedere, comportarea materialelor este caracterizată de tenacitatea la rupere, K_{Ic} , care reprezintă starea critică a materialului sau a structurii cu fisuri.

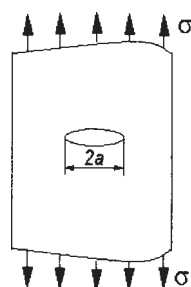


Fig. 1. Fisură într-o placă plană, perpendiculară pe direcția tensiunii σ

c. Condiția de admisibilitate a solicitării statice, în cazul comportării liniar elastice a materialului, pentru:

-materiale fără fisuri,

$$\sigma \leq \sigma_{lim}, \quad (10)$$

unde σ_{lim} este tensiunea limită, admisă pentru materialul corpului. De exemplu, sub temperatura de fluaj, $\sigma_{lim} = \sigma_c / c_c$ sau $\sigma_{lim} = \sigma_r / c_r$ în care c_c și c_r sunt coeficienți de siguranță, supraunitari;

-materiale cu fisuri,

$$K_I \leq K_{lim}, \quad (11)$$

unde K_{lim} este valoarea limită, admisă pentru materialul corpului; $K_{lim} = K_c / c_k$ în care c_k coeficient de siguranță, supraunitar.

Pentru materiale cu capacitate mare de deformare înainte de rupere, care au fisuri, se utilizează și alte concepte, precum deschiderea sau deplasarea la vârful fisurii, δ , integrala J etc. [2].

Comportarea materialelor solicitate static în condiții de fluaj

La solicitarea la temperaturi superioare temperaturii de fluaj se modifică comportarea materialului în comparație cu solicitarea acestuia la temperaturi inferioare temperaturii de fluaj, T_f .

În condiții de fluaj comportarea materialului depinde de timp. În general, deformația specifică crește în timp (la $\sigma = \text{const.}$), iar tensiunea scade în timp (la $\varepsilon = \text{const.}$)

Fluajul propriu-zis (curgerea lentă în timp) al materialului este caracterizat de viteza de fluaj la tensiune constantă,

$$\dot{\varepsilon} = (d\varepsilon/dt)_{\sigma=\text{const.}}$$

iar fenomenul de relaxare este caracterizat de viteza de variație a tensiunii la deformație specifică constantă,

Variația în timp a deformației specifice totale $\varepsilon(t)$ în condiții de fluaj este reprezentată în figura 2. Se disting trei zone caracteristice: I - zona fluajului primar; II - zona fluajului stabilizat ($\dot{\varepsilon} = \text{const.}$); III - zona fluajului accelerat. Deformația specifică totală reprezintă suma dintre deformația specifică inițială, $\varepsilon(0)$ și deformația specifică vâscoelastică, crescătoare în timp, $\varepsilon_{ve}(t)$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) + \varepsilon_{ve}(t).$$

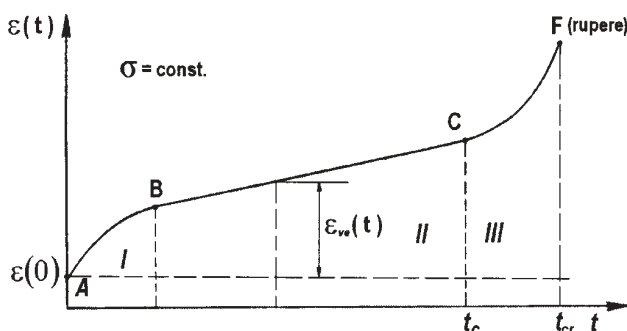


Fig. 1. Curbă de fluaj ($T > T_f$ și $\sigma = \text{const.}$): variația în timp a deformației specifice totale $\varepsilon(t)$

Pentru comparație s-a reprezentat deformația specifică la solicitarea sub temperatura de fluaj când $\varepsilon(t) \equiv \varepsilon(0) = \text{const.}$ (fig. 2).

Comportarea materialelor metalice solicitate uniaxial în condiții de fluaj este descrisă prin variația deformației

specifice determinată de solicitarea cu o tensiune constantă, σ , pe o durată t . Ecuaplia constitutivă, utilizată de obicei pentru zona fluajului primar (I) are expresia:

$$\varepsilon_{ve}(t) = A \cdot \sigma^n \cdot t^m, \quad (12)$$

în care A , n și m sunt constante de material. Viteza de fluaj, în acest caz $\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_{ve}(t)$,

$$\dot{\varepsilon}(t) = A \cdot m \cdot \sigma^n \cdot t^{m-1}.$$

Pentru zona fluajului stabilizat (II) se utilizează legea Norton,

$$\dot{\varepsilon}(t) = B(t) \cdot \sigma^n. \quad (13)$$

Din compararea ultimelor două relații rezultă că $A \cdot m \cdot t^{m-1} = B(t)$, care este o funcție de timp [3].

La $T \geq T_{\beta}$, în locul rezistenței la rupere și a limitei de curgere de la $T < T_{\beta}$, se utilizează următoarele caracteristici limită (caracteristici tehnice):

- rezistența de durată, σ_d , în locul rezistenței de rupere de la solicitarea statică;
- limita de fluaj, σ_{fl} , în locul limitei de curgere de la solicitarea statică.

Caracteristicile mecanice σ_c și σ_r depind de temperatură și sunt independente de durata solicitării. Reprezentarea lor într-o diagramă $\sigma - t$ sunt două drepte paralele cu abscisa (fig. 3, a).

În schimb rezistența de durată (fig. 3, b) se micșorează cu trecerea timpului, iar limita de fluaj (fig. 3, c) la o temperatură dată se micșorează odată cu micșorarea vitezei de fluaj.

Cu o viteză de fluaj mai mică, după o durată de solicitare t , se obține o deformare specifică, $\varepsilon \approx \dot{\varepsilon} \cdot t$, mai mică.

Rezistența de durată se utilizează la calculul rezistenței admisibile atunci când condiția de bună funcționare o reprezintă integritatea structurii sau reactorului,

$$\sigma_{ad} = \sigma_d / c_d.$$

Limita de fluaj se consideră la calculul rezistenței admisibile atunci când condiția de bună funcționare o reprezintă limitarea deformării componentei calculate (de exemplu rotorul unei turbine, etanșarea corp-capac ...) $\sigma_{ad} = \sigma_{fl} / c_{\beta}$, unde c_d și c_{β} sunt coeficienți de siguranță; $c_d > 1$ iar $c_{\beta} \geq 1$.

Comportarea materialelor solicitate dinamic, rapid sau prin șoc

S-a constatat experimental că durata solicitării influențează caracteristicile mecanice ale materialelor. Limita de curgere a unor oțeluri carbon, de exemplu, crește cu mărirea vitezei de solicitare, respectiv cu micșorarea duratei t a creșterii sarcinii aplicate. Pe de altă parte, s-a constatat că la solicitarea rapidă a unor oțeluri, uneori rezistența acestora la rupere se mărește cu până la 50%.

Rezistența la rupere a metalelor și aliajelor feroase și neferoase solicitate prin șoc, σ_{rs} , crește în raport cu rezistența lor la solicitarea statică, σ_r , conform relației:

$$(14)$$

în care k_d este un coeficient dinamic subunitar, a cărui valoare scade cu mărirea lui σ_r [3; 4].

Comportarea materialelor solicitate la oboseală

Ca urmare a solicitării ciclice capacitatea de rezistență a unui material scade odată cu mărirea numărului ciclurilor de solicitare, n (fig. 4). Efectul solicitării ciclice este oboseala materialului, motiv pentru care o astfel de solicitare este numită solicitare la oboseală.

Solicitarea la oboseală cu tensiuni normale, σ , este caracterizată prin tensiunea maximă, σ_{max} , tensiunea minimă, σ_{min} și durata t_{cc} , a unui ciclu. În mod analog solicitarea la oboseală cu tensiuni tangențiale, τ , este caracterizată de mărimi similare: τ_{max} , τ_{min} și t_{ct} .

Raportul

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}},$$

reprezintă coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare. În general, se spune că $R \in (-\infty; \infty)$. La o analiză mai atentă se constată că, în realitate, nu este așa. Acest raport trebuie calculat distinct pentru solicitarea ciclică:

- cu tensiuni de întindere, $\sigma_{max} > 0$ și $\sigma_{max} \geq |\sigma_{min}|$, caz în care $R_{max} = 1$ când $\sigma_{max} = \sigma_{min}$ (solicitare statică de întindere) și $R_{min} = -1$, când $\sigma_{max} = |\sigma_{min}|$ și $\sigma_{min} < 0$, (solicitare alternant simetrică). Cu alte cuvinte, în acest caz $R \in [1; -1]$;

- cu tensiuni de compresiune, $\sigma_{max} < 0$ și $|\sigma_{max}| \geq |\sigma_{min}|$, caz în care $R_{max} = 1$, dacă $\sigma_{max} = \sigma_{min} < 0$ (solicitare statică de compresiune) și $R_{min} = -1$ când $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}| > 0$ (solicitare alternant simetrică). Aici $R \in [1; -1]$.

În ambele cazuri solicitarea pulsatorie ($\sigma_{min} = 0$) se caracterizează prin valoarea:

$$R = \frac{0}{\sigma} = 0 \text{ și respectiv } R = \frac{0}{-|\sigma_{max}|} = 0.$$

Tratată astfel definiția coeficientului de asimetrie, rezultă că R are un domeniu restrâns de valori, $R \in [1; -1]$.

În mod analog se pune problema la solicitarea ciclică cu tensiuni tangențiale, pentru care:

$$R = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}.$$

Oboseala materialului se datorează deformării locale a materialului solicitat, inițierii și creșterii fisurilor. Tensiunile determină formarea liniilor de alunecare în cristalele metalelor solicitate, acestea se transformă în microfisuri

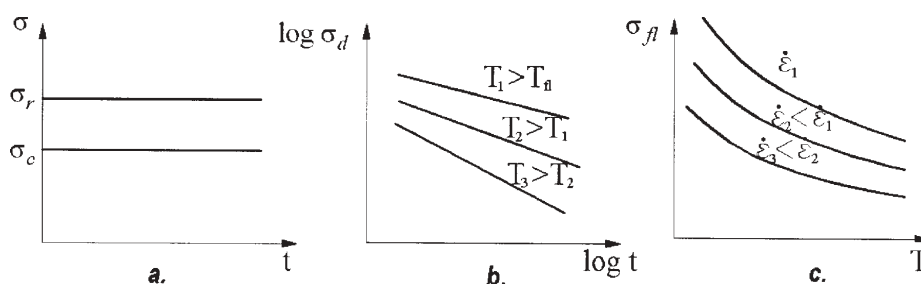


Fig. 3. Dependența: a - de timp a rezistenței de rupere și a limitei de curgere la solicitarea statică sub temperatura de fluaj; b - de timp a rezistenței de durată la diferite temperaturi; c - de viteza de fluaj $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$ și de temperatură a limitei de fluaj.

care cresc, eventual se unesc, formează fisuri care se propagă până la ruperea cu o deformare plastică relativ mică.

În general există o origine a rupei, un punct din care fisura începe să crească. Aceasta se află adesea într-o creștătură sau într-un defect al materialului (incluziune nemetalică, por, defect de sudură, zgârietură sau excavație superficială, decarburare locală etc.).

Evaluarea comportării la solicitări ciclice se face în esență în două moduri: fără considerarea fisurilor și cu considerarea efectului fisurilor, defectelor etc.

Comportarea materialelor la solicitări ciclice, fără a considera prezența fisurilor

Atunci când în condițiile solicitării fisurile nu se propagă, sau dacă lungimea acestora nu este detectabilă, calculele se efectuează fără a considera fisurile.

Comportarea materialelor solicitate ciclic se reprezintă grafic sub forma curbei Wöhler, în diagramă semilogaritmă. Aceasta redă dependența dintre tensiunea maximă, $\sigma_{\max}$, sau amplitudinea tensiunii, σ_a , și numărul ciclurilor de solicitare până la rupere, N (fig. 4, a). Se notează cu n numărul efectiv de cicluri de solicitare. În general $n \leq N$.

În ultimele decenii s-a recurs și la reprezentarea în diagramă dublu logaritmă a curbei de oboseală prin dependența $\epsilon(N)$ dintre amplitudinea deformației totale și numărul ciclurilor de solicitare (fig. 4, b).

În domeniul policiclic ($n > N_0$) rezistența materialului la solicitarea cu tensiunea alternantă este de primă importanță, caz în care se recurge la dependența $\sigma_a - N$. În domeniul oligociclic ($N \leq 10^4$), deformația plastică este importantă, motiv pentru care aici curba de durabilitate la oboseală o reprezintă dependența dintre amplitudinea deformației totale, ϵ_a , și numărul ciclurilor de solicitare până la rupere, N .

Pe curba Wöhler ABCD, trasată în diagramă semilogaritmă, se disting trei domenii (fig. 4, a):

I – domeniul solicitării oligociclice sau al numărului redus de cicluri de solicitare, în care $\sigma_a \in [\sigma_{nr}, \sigma_c(N_c)]$, iar $N \in [1/4; N_c]$. Aici $\sigma_{nr} = \sigma_r \cdot (1 + \epsilon_r)$ este tensiunea naturală (reală) la rupere; σ_r, ϵ_r – tensiunea și deformația specifică la rupere; $\sigma_c = \sigma_c(N_c)$ este limita de curgere a materialului după N_c cicluri de solicitare. În condițiile acestui domeniu, materialul este solicitat în stare elasto-plastică;

II – domeniul durabilității limitate în care $N \in [N_c; N_0]$ și $\sigma_a \in [\sigma_c(N_c); \sigma_{-1}]$;

III – domeniul solicitării nelimitate în care la tensiunea σ_{-1} , ruperea unei epruvete standard nu se produce, chiar pentru un număr nelimitat, $N \geq N_0$, de cicluri. În acest caz dreapta CD este paralelă cu abscisa. Tensiunea σ_{-1} reprezintă limita de oboseală la solicitarea alternant simetrică.

S-a constatat, în ultimele decenii, că în acest domeniu limita la oboseală uneori nu este constantă ci scade cu mărirea lui N (dreapta CD, în fig. 4, a), însă cu o pantă mai mică decât în domeniul II.

Trebuie observat că punctul B este comun domeniilor I și II, iar punctul C este comun domeniilor II și III; sunt puncte de intersecție ale curbelor care definesc respectivele domenii.

În unele industrii durata de viață necesară a unor componente adesea depășește 10^8 cicluri. De exemplu [5]:

- discurile turbinelor cu gaze din aeronautică, 10^{10} cicluri;
- căile ferate pentru trenurile de mare viteză, 10^9 cicluri;
- motoarele automobilelor, 10^8 cicluri.

Cele mai multe date referitoare la oboseala materialelor, redate sub forma curbelor Wöhler, sunt limitate la $10^6 - 10^7$ cicluri. La $n > 10^7$ cicluri se consideră că limita la oboseală

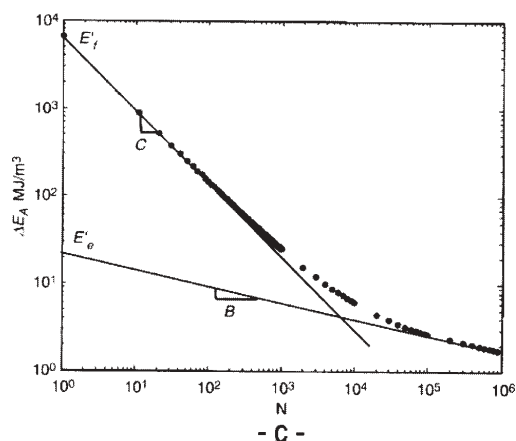
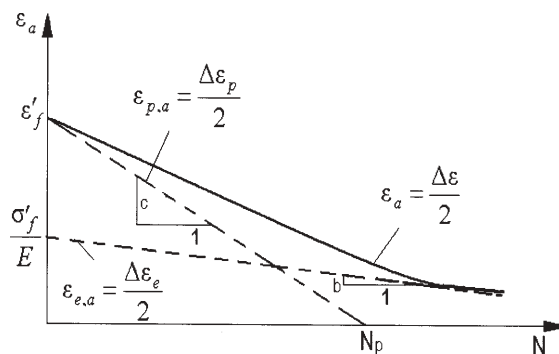
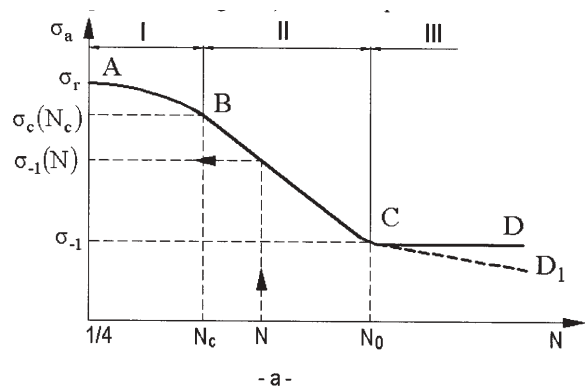


Fig. 4. Dependența de numărul ciclurilor de solicitare, N , pentru o epruvetă lustruită: a - curbei Wöhler la solicitare alternant simetrică (diagramă semilogaritmă); b - a amplitudinii deformației specifice totale (diagramă dublu logaritmă); c - a densității de energie la solicitare uniaxială, ΔE_a (diagramă dublu logaritmă).

este constantă. Există însă multe materiale a căror rezistență la oboseală scade și la $n > 10^7$ cicluri.

Wöhler a introdus limita $N_0 = 10^6$ cicluri, pentru oboseala materialelor [6] deoarece în secolul XIX numărul ciclurilor de solicitare pentru mașinile cu abur era mult mai mic decât al mașinilor moderne, pentru care se poate ajunge la megacicli ($\approx 10^9$) de solicitare. Ca urmare, în prezent, conceptul de durată de viață nelimitată nu este întotdeauna corect [7]. Mașinile moderne lucrează la turații ridicate și în consecință durata lor de viață la oboseală este de $10^9 - 10^{10}$ cicluri. Bathias [30] a introdus conceptul de rupere prin oboseală la gigacicli de solicitare.

Intervalul $10^6 - 10^9$ cicluri de solicitare este de mare interes pentru tehnologia modernă [5].

În prezent se consideră, în general, că o epruvetă care nu s-a rupt la 10^7 cicluri, are o durabilitate infinită, ceea ce reprezintă o convenție impusă de considerente economice.

În unele cazuri rezistența la oboseală a scăzut cu 100 - 200 MPa în intervalul $10^6 - 10^9$ cicluri [5]. Aceasta impune

adeseori, pentru ma^oinile moderne, determinarea rezistenței la oboseală pe cale experimentală la 10^9 cicluri.

Binând seama de constatarea că la $n > 10^6$ rezistența la oboseală scade, în general cu o pantă diferită de cea de la $n < 10^6$ rezistența la oboseală se va nota ca funcție de N . În aceste cazuri limita la oboseală nu mai există, ea se înlocuiește cu $\sigma_{-1}(N)$.

Pentru un element constructiv rezistența la oboseală la solicitarea alternant simetrică cu tensiuni normale depinde de N și se calculează cu relația

$$\sigma_{-1,p}(N) = \frac{\varepsilon_d \cdot \gamma_s}{K_\sigma} \cdot \sigma_{-1}(N), \quad (15)$$

în care:

ε_d - este coeficient dimensional;

γ_s - coeficient de stare a suprafeței;

K_σ - coeficient de concentrare a tensiunilor normale;

$\sigma_{-1}(N)$ - rezistența la oboseală a unei epruvete standard, lustruite, după N cicluri de solicitare.

O relație analoagă se scrie pentru rezistența la oboseală la solicitarea cu tensiuni tangențiale a unui element constructiv oarecare,

$$\tau_{-1,p}(N) = \frac{\varepsilon_d \cdot \gamma_s}{K_\tau} \cdot \tau_{-1}(N), \quad (16)$$

unde:

$\tau_{-1}(N)$ este rezistența la oboseală a unei epruvete standard, lustruite, solicitată cu tensiuni tangențiale alternant simetrice, după N cicluri de solicitare;

K_τ - coeficientul de concentrare a tensiunilor tangențiale. K_σ și K_τ sunt supraunitare.

Pentru materialele la care pentru $n > N_0$ dreapta CD este paralelă cu abscisa, în relațiile anterioare rezistența la oboseală se înlocuiește cu limita la oboseală (σ_{-1} sau τ_{-1}).

Oboseala materialelor este modul predominant de pierdere a integrității structurilor. În prezent predicția duratei de viață la oboseală se face cu erori mari, chiar atunci când se dispune de date certe ale proprietăților materialelor [8].

La descrierea comportării unui material solicitat la oboseală prin trasarea curbei Wöhler (fig. 4, a), în general, se obține o distribuție statistică a valorilor numărului de cicluri până la rupere la o amplitudine a tensiunii, σ_a , dată; curbele trasate corespund unei anumite probabilități de rupere P_r sau de supraviețuire $P = 1 - P_r$ (fig. 5).

La o solicitare ciclică stabilă, între perioada unui ciclu, t_c , numărul efectiv de cicluri de solicitare n și durata t a solicitării există relația

$$n \cdot t_c = t. \quad (17)$$

În cazul solicitărilor ondulate ($\sigma_m \neq 0$) rezistența la oboseală, reprezentată de tensiunea maximă, se calculează cu relația

$$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m. \quad (18)$$

Deoarece σ_a și σ_m depind de coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, rezultă că practic orice material are o infinitate de rezistențe la oboseală. Din punct de vedere practic se corelează σ_a cu σ_m în cuprinsul aceleiași durate de viață.

Cele trei domenii I, II și III (fig. 4) ale curbei Wöhler sunt descrise de relații diferite.

a. Pentru majoritatea materialelor se obține o linie înclinată între punctele B și C. Dacă CD este paralelă cu abscisa, atunci punctul C definește limita la oboseală (σ_{-1}) și durata de viață (durabilitatea) la oboseală (N_0). Pentru $\sigma_{-1} = \text{const.}$, durata este nelimitată, $N \geq N_0$.

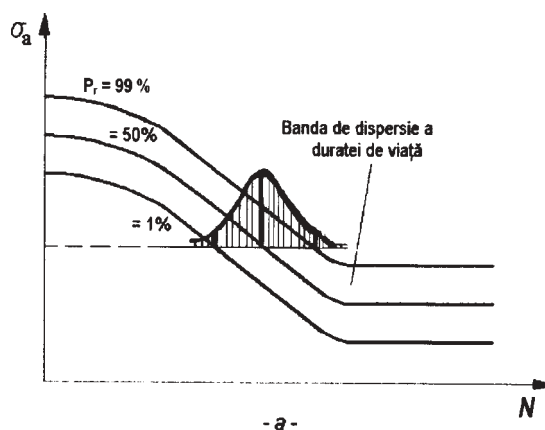


Fig. 5. Curbe Wöhler la diferite probabilități de rupere, P_r , la aceeași amplitudine a tensiunii, σ_a (a) și respectiv după același număr de cicluri de solicitare N (b)

b. Dreapta BC (fig. 4, a), corespunzătoare duratei de viață limitate poate fi descrisă cu relația Basquin,

$$\sigma_a^m \cdot N = \text{const.}, \quad (19)$$

în care:

N este numărul ciclurilor de solicitare cu amplitudinea tensiunii σ_a până la rupere;

m - exponent. În ultimele decenii relația (19) a fost scrisă și sub forma:

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (N)^b, \quad (20)$$

unde:

σ'_f este coeficientul de rezistență la oboseală;

$b = 1/m$ exponentul rezistenței la oboseală.

În general $\sigma'_f \approx \sigma_{n,r} > \sigma_r$, unde $\sigma_{n,r}$ este rezistența de rupere naturală (sau reală). În relația (20) uneori se înlocuiește N cu numărul de inversiuni $2N'$ (numărul de schimbări de semn).

Prin aplicarea relației (19) în punctul C și într-un punct oarecare din domeniul II rezultă (fig. 4, a):

$$\sigma_{-1}(N) = \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_0}{N} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (21)$$

care este rezistența la oboseală la $N_0 \leq N \leq N_c$ cicluri de solicitare pentru materiale cu limită la oboseală.

Pentru materialele care nu au limită la oboseală, σ_{-1} din relația (21) se înlocuiește cu $\sigma_{-1}(N_0)$ unde (N_0) este abscisa punctului C, de schimbare a pantei dreptei σ_{-1} - N .

c. Procesul de oboseală corespunzător curbei AB (fig. 4, a) ca și curba din diagrama $\varepsilon(N)$ din figura 4, b sunt descrise de relația Basquin - Coffin - Manson [9]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (N)^b + \varepsilon'_f \cdot (N)^c \quad \text{- pentru solicitarea uniaxială cu tensiuni normale, } \sigma;$$

$$\frac{\Delta \gamma}{2} = \frac{\tau'_f}{G} \cdot (N)^{b_0} + \gamma'_f \cdot (N)^{c_0} \quad \text{- pentru solicitarea cu tensiuni normale, } \tau;$$

în care

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta \varepsilon}{2} \text{ este amplitudinea deformației specifice; } (22)$$

$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ - variația deformației specifice;

σ'_f - coeficientul rezistenței la oboseală (aproximativ egal cu rezistența naturală la rupere, σ_{br});

ε'_f - coeficientul ductilității la oboseală (aproximativ egal cu deformația specifică naturală la rupere, ε_r);

b - exponentul rezistenței la oboseală ($b = -0,05 \dots -0,12$);

c - coeficientul ductilității la oboseală ($c = -0,5 \dots -0,7$).

Exponenții b și c reprezintă pantele curbelor $\Delta \varepsilon_{a,e}$ și $\Delta \varepsilon_{a,p}$ (fig. 4, b);

E - modulul de elasticitate longitudinală;

$$\gamma_a = \frac{\Delta \gamma}{2} - \text{amplitudinea lunecării specifice;}$$

$\Delta \gamma = \gamma_{\max} - \gamma_{\min}$ - variația lunecării specifice;

τ'_f și γ'_f - coeficientul rezistenței la oboseală și coeficientul ductilității la oboseală de forfecare;

b_o și c_o - exponentul rezistenței la oboseală de forfecare și al ductilității la oboseală de forfecare;

G - modulul de elasticitate transversală.

În relația (22) primul termen reprezintă amplitudinea deformației elastice ($\varepsilon_{e,a}$) iar al doilea - amplitudinea deformației plastice ($\varepsilon_{p,a}$). Cu mărirea lui n , amplitudinea $\varepsilon_{p,a}$ scade mai repede decât $\varepsilon_{e,a}$ astfel încât de la $n = N_p$ amplitudinea totală este numai elastică. La valori $n < N_p$ amplitudinea totală este elastoplastică. La număr mic de cicluri cedarea este preponderent plastică, pe când la număr mare de cicluri, cedarea este preponderent elastică, iar la $n \geq N_p$ - numai elastică.

Reprezentările grafice dublu logaritmice atât a lui $\varepsilon_{e,a}$ cât și a lui $\varepsilon_{p,a}$ sunt drepte (fig. 4, b).

În relațiile anterioare, adeseori, în locul numărului N de cicluri se trece numărul de inversiuni (numărul de schimbări de semn ale deformației specifice) $2N$ (o inversiune este egală cu o jumătate de ciclu, $N = 0,5N$).

Morrow a introdus în prima relație (22) influența tensiunii medii σ_m , scriind că

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right) \cdot (N)^b + \varepsilon'_f (N)^{b+c}. \quad (22.1)$$

Pe de altă parte Smith-Watson-Topper, au inclus pe σ_m , prin utilizarea tensiunii maxime ($\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m$). Relația propusă de ei, cunoscută ca relația Smith-Watson-Topper sau SWT, este

$$\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (N)^{2b} + \sigma'_f \cdot \varepsilon'_f (N)^{b+c}, \quad (22.2)$$

în care $\varepsilon_a = \Delta \varepsilon / 2$.

Pentru oțeluri unde exponenții b și c variază relativ puțin; Manson a propus o relație pentru variația deformației specifice totale, în care Morrow a introdus influența tensiunii medii. S-a obținut,

$$\Delta \varepsilon = \frac{3,5 \cdot (\sigma_r - \sigma_m)}{E \cdot N^{0,12}} + \frac{\varepsilon_r^{0,6}}{N^{0,5}}. \quad (22.3)$$

Se observă că $\Delta \varepsilon$ depinde de caracteristici corespunzătoare solicitării statice uniaxiale: E ; σ_r și ε_r .

Comportarea la solicitarea ciclică uniaxială, uniformă, în domeniul elastoplastic este descrisă uneori cu relația Ramberg-Osgood scrisă sub forma:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{a}} \quad \text{- la solicitarea uniaxială cu tensiuni normale, } \sigma; \\ \frac{\Delta \gamma}{2} = \frac{\Delta \tau}{2G} + \left(\frac{\Delta \tau}{2K'_0} \right)^{\frac{1}{a_0}} \quad \text{- la solicitarea cu tensiuni de forfecare normale, } \tau; \quad (23)$$

în care:

$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ este variația tensiunilor normale;

$\Delta \tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ este variația tensiunilor de forfecare;

K' și K'_0 - coeficienții ecruisării ciclice;

a și a_0 - exponenții ecruisării ciclice.

În cazul solicitării spațiale relația Ramberg -Osgood se poate scrie sub următoarea formă:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ech}}{2} = \frac{\Delta \sigma_{ech}}{2E^*} + \left(\frac{\Delta \sigma_{ech}}{2H} \right)^{1/e} \quad (23.1)$$

în care:

$\Delta \sigma_{ech}$ este variația tensiunii echivalente;

$\Delta \varepsilon_{ech}$ - variația deformației specifice echivalente;

$E^* = \frac{3E}{2(1+\nu)}$; iar H și e sunt constante;

ν - coeficientul contracției transversale (Poisson).

În mod analog relația Basquin-Coffin -Manson, pentru solicitarea spațială are următoarea expresie:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ech}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E^*} (N)^b + \varepsilon'_f (N)^c. \quad (22.4)$$

Variațiile $\Delta \sigma_{ech}$ și $\Delta \varepsilon_{ech}$ pot fi calculate pe baza teoriei a cincea de rezistență (Huber-Hencky - Mises). În cazul solicitării compuse, de exemplu,

$$\varepsilon_{ech} = \sqrt{\bar{\varepsilon}^2 + \frac{\gamma^2}{3}} \text{ și } \sigma_{ech} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2},$$

$$\text{unde } \bar{\varepsilon} = \frac{2(1+\nu)}{3} \cdot \varepsilon_e + \varepsilon_p,$$

în care:

$\varepsilon_e, \varepsilon_p$ - deformație specifică elastică, respectiv plastică;

γ - lunecare specifică.

În domeniul $N \in [1; 10^4]$, pentru unele oțeluri înalt aliate solicitate termociclic în domeniul criogenic, dependența $\sigma_{\max}(\log N)$ este liniară, de forma [11],

$$\sigma_{\max} = A - b_1 \cdot \log N,$$

în care pentru un oțel Cr/Ni/Ti sovietic (12H18N10T), $A = 869$; $b = 34$ iar $\sigma_{\max}$ rezultă în MPa.

În cazul solicitării termociclice cu temperaturi superioare temperaturii mediului ambiant însă inferioare temperaturii de fluaj, s-a constatat că, cu creșterea temperaturii maxime, sau a tensiunii maxime pe ciclu, scade numărul ciclurilor până la inițierea rupei [11].

Pentru descrierea comportării materialului în domeniul oligociclic s-a propus o relație bazată pe conceptul de energie [12], similară relațiilor (22):

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta E_A &= E'_e \cdot (N_A)^B + E'_f \cdot (N_A)^C, \\ \Delta E_T &= W'_e \cdot (N_T)^{B_s} + W'_f \cdot (N_T)^{C_s}, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

în care:

ΔE_A și ΔE_T sunt variația densității energiei de deformare la solicitare ciclică axială respectiv solicitare ciclică la torsiune;

E'_e și W'_e - coeficientul rezistenței la oboseală la solicitarea axială, respectiv la torsiune;

E'_f și W'_f - tenacitatea la oboseală la solicitarea axială, respectiv la torsiune;

N_A și N_T - numărul ciclurilor de solicitare până la rupere la solicitare pur axială, respectiv torsională. B; C; B_s și C_s - exponenți.

În figura 4, c este redată dependența dintre densitatea de energie ΔE_A la solicitare uniaxială și numărul ciclurilor de solicitare până la rupere, N_A .

Comportarea materialelor cu fisuri la solicitări la oboseală

Pe parcursul operațiilor tehnologice care conduc la obținerea unui semifabricat, precum și în cursul fabricării unei anumite structuri (prin prelucrarea semifabricatelor, sudare, nituire...) în materialul din care acestea sunt constituite se nasc microfisuri, defecte sau macrofisuri.

În punctele de concentrare a tensiunilor, în care există defecte sau creștături ascuțite etc., se produce nuclearea fisurii inițiale a_i . În continuare, la fiecare ciclu de solicitare fisura crește până la atingerea lungimii critice.

În cordoanele de sudură, precum și în zonele de influență termică, la intersecții, la baza filetelor etc. pot apărea fisuri (fig. 6).

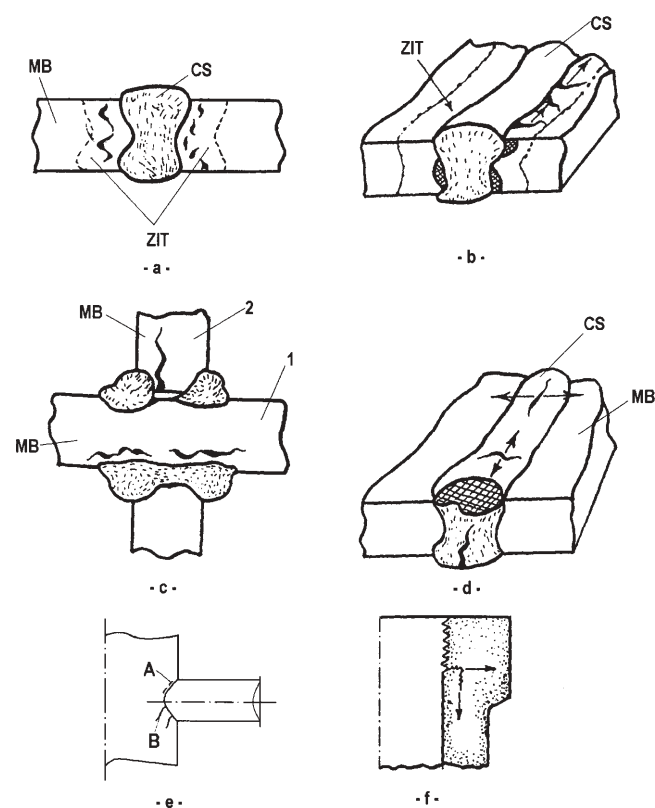


Fig. 6. Exemple de structuri cu fisuri în piese sudate (prelucrat după [10])

(a, b - în ZIT; c - rupere lamelară în MB; d - fisurare termică a CS);
- la îmbinarea sudată dintre două țevi (e-fisuri circumferențiale, A și radiale, B); f - într-o piesă filetată

Notații: CS - cordon de sudură; MB - material de bază;
ZIT - zonă de influență termică.

În prezent se consideră că, dacă lungimea microfisurii a este mai mică decât o valoare a_i , atunci fisura nu afectează rezistența la oboseală [13]. Dacă $a \geq a_i$, rezistența la oboseală scade odată cu creșterea numărului de cicluri de solicitare, n .

Lungimea inițială a fisurii de la care începe propagarea fisurii este considerată în jur de 0,25 mm pentru epruveta netede și de 0,25...0,5 mm pentru epruvete cu concentratori de tensiune [14]. La analiza din punct de vedere ingineresc a propagării fisurii se consideră ca lungime inițială a fisurii, lungimea acesteia detectabilă

prin mijloace nedistructive, $a_d > a_i$ (fig. 7). Structurile sudate conțin defecte cu dimensiuni mai mari decât 0,5mm; acestea se pot propaga la tensiuni relativ mici.

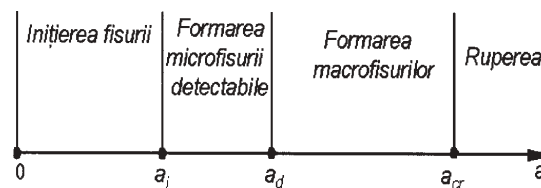


Fig. 7. Evoluția fisurii

Coeficientul de concentrare al tensiunilor K_σ influențează durata de inițiere a fisurii, sau numărul de cicluri pentru inițierea fisurii, N_i . Pentru epruvete lise ($K_\sigma = 1$), $N_i \approx 0,9N$, pe când pentru epruvete cu creștături ascuțite ($K_\sigma > 5$), $N_i \leq 0,1N$, unde N este numărul total al ciclurilor până la rupere (fig. 8). Cu alte cuvinte la epruvetele lise durata pentru inițierea fisurii reprezintă 90% din durata de viață, pe când la epruvetele cu coeficienți mari de concentrare a tensiunilor (cu creștături ascuțite), durata de inițiere a fisurii reprezintă doar 10% din durata de viață.

Valoarea lui N_i depinde și de nivelul amplitudinii tensiunii. La amplitudini ale tensiunii inferioare limitei la oboseală, numărul ciclurilor pentru inițierea fisurii este relativ mare, pe când la valori mari ale tensiunii (mai mari decât σ_{-1}) N_i este relativ mic (fig. 8, b).

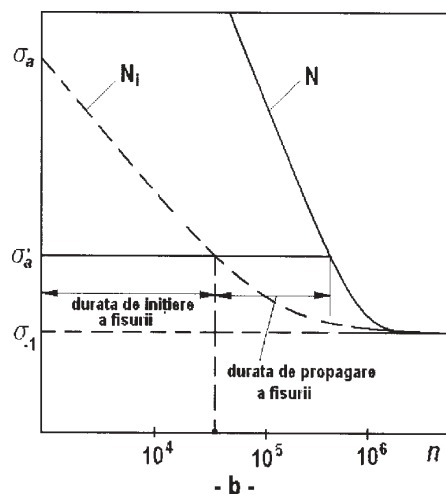
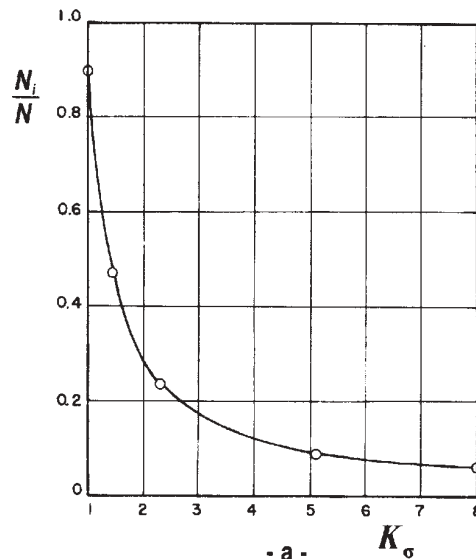


Fig. 8 Dependența raportului N_i / N de factorul de concentrare al tensiunilor K_σ (a); curbele de inițiere a fisurii, N_i și de fisurare, N (b) [15; 16].

La o anumită valoare σ'_a (fig. 8, b) se pot distinge clar numărul ciclurilor de inițiere și respectiv de propagare a fisurii.

Comportarea materialelor cu fisuri la solicitări ciclice este descrisă cu ajutorul factorului de intensitate a tensiunii, K .

Propagarea unei fisuri într-un material solicitat ciclic în domeniul liniar-elastic (atunci când sunt îndeplinite condițiile de propagare a fisurii), se poate calcula pe baza vitezei de propagare a fisurii, cu o relație de forma celei propuse de Paris și Erdogan [17; 18], valabilă pentru domeniul propagării stabile a fisurii (II în fig. 9):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (25)$$

în care C și m sunt constante de material, iar

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (26)$$

unde $\Delta \sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$.

Pentru materiale feroase și neferoase utilizate la construcția recipientelor sub presiune, $m=4$. În general, pentru majoritatea metalelor $m=2...4$. În domeniul II, da/dN variază între 10^{-6} și 10^{-3} mm/ciclu.

În mecanica elastoplastică a rupei se recurge uneori la relația [19]

$$\frac{da}{dN} = C' \cdot \Delta J^{m'}, \quad (27)$$

unde $\Delta J = J_{\max} - J_{\min}$ este variația integralei de contur J , iar C' și m' - constante de material.

Prin utilizarea variației ΔK în relația (25) face ca aceasta să fie aplicabilă, strict vorbind, numai în domeniul liniar-elastic, deoarece ΔK se referă la materiale cu comportare elastică pe parcursul dezvoltării fisurii, considerându-se că zona plastică de la vârful fisurii este relativ mică. Această ipoteză nu este valabilă pentru valori mari ale variației ΔK , deoarece în acest caz creșterea instabilă a fisurii se produce repede, cu crearea de zone plastice mari, caz în care factorul de intensitate a tensiunii nu poate caracteriza condițiile specifice de la vârful fisurii.

Pe de altă parte utilizarea integralei J (27) este inaplicabilă la caracterizarea creșterii fisurii prin oboseală dincolo de un anumit nivel al deformăției plastice [20].

Corelația dintre da/dN și ΔK se face experimental. Reprezentarea grafică a acesteia este o sigmoidă de forma celei din figura 9, în reprezentare dublulogarithmică, pe care se disting următoarele trei domenii: I - de nepropagare a fisurii, dacă $\Delta K \leq \Delta K_{th}$, unde ΔK_{th} este valoarea de prag a lui ΔK , sub care nu se propagă fisura; II - de dependență liniară, în care viteza de propagare a fisurii este constantă; III - de propagare instabilă a fisurii până la rupere când variația factorului de intensitate a tensiunii ia valoare sa critică, ΔK_c .

Pentru dependența dintre da/dN și ΔK au fost propuse peste o sută de relații [21]. Cele mai recomandate relații sunt următoarele:

-relația Donhaue,

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^m - \text{pentru domeniul II;} \quad (28)$$

-relația Forman,

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K)^m}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} - \text{inițial propusă pentru domeniul III, extinsă și pentru domeniul II,} \quad (29)$$

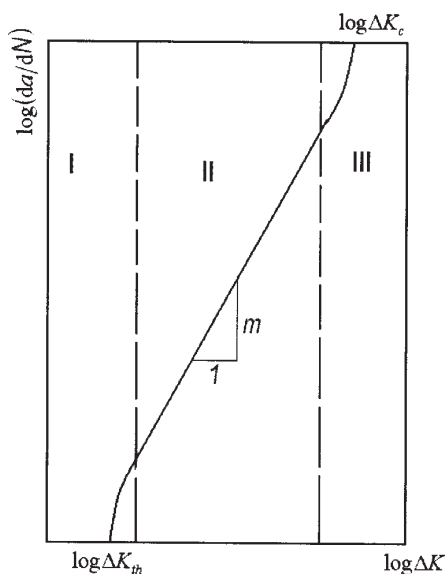


Fig. 9 Dependința vitezei de variație a fisurii de variația factorului de intensitate a tensiunii

în care $R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ - coeficientul de asimetrie al ciclului;

- relația Walker,

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K)^m}{(1-R)^r} - \text{pentru domeniul II, însă pe zone limitate este aplicabilă și în domeniile I și III,} \quad (30)$$

unde r - exponent care se determină experimental.

Concluzii

Menținerea sau scoaterea din funcțiune a unor mașini, aparate, structuri etc., după o anumită perioadă de funcționare, depinde de gradul de deteriorare al acestora. Deteriorarea depinde atât de starea de solicitare cât și de comportarea materialelor în condițiile solicitării.

Din acest motiv întâi s-a analizat comportarea materialelor și au fost expuse principalele legi de comportarea la solicitări statice (în domeniul elastic și plastic), la solicitări dinamice (rapide sau prin șoc) sub temperatura de fluaj, precum și la solicitări statice deasupra temperaturii de fluaj. S-a analizat, de asemenea, comportarea materialelor și legile de comportare la solicitarea la oboseală fără considerarea fisurilor și respectiv cu considerarea unor fisuri care se pot propaga.

În lucrarea [22] au fost expuse stările de tensiuni în corpuri cilindrice pentru toate aceste cazuri de solicitare.

În continuare vor fi analizați și sistematizați factorii care influențează rezistența și limita la oboseală (frecvența solicitării, tensiunea medie, tensiunile remanente, defectele etc.), influența suprasolicitării asupra duratei până la rupere, precum și influența solicitării ciclice asupra caracteristicilor mecanice statice. În final vor fi expuse relațiile propuse în prezent pentru calculul deteriorării materialelor și vor fi deduse expresii noi pentru deteriorare cu indicarea modului de utilizare a acestora la calculul duratei de viață.

Bibliografie

1. WANG Y., PAN J., A plastic fracture mechanics model for characterization of multiaxial low-cycle fatigue, *Int. J. Fracture*, **20**, 1998, p. 775
2. PANĂ T., PASTRAMĂ T. D., „Integritatea structurilor mecanice”, Editura Fair Partners, Bucureşti, 2000
3. JINESCU V.V., Utlaj tehnologic pentru industrii de proces, **II**, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1984
4. FAUPEL J.H., Engineering Design, John Wiley, New York, 1964
5. MARINES I., BIN X., BATHIAS C., An understanding of very high cycle fatigue of metals, *Int. J. Fatigue*, **25**, 2003, p. 1101
6. WÖHLER A., Zeitschrift für Bauwesen, **8**, 1858, p. 642
7. BATHIAS C., There is no infinite fatigue life in metallic materials, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22**, 1999, p. 559
8. RADEA M., Rezistenţa materialelor, vol. 2, Editura Printech, Bucureşti, 2004
9. HAN C., CHEN X., KIM K.S., Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading, *Int. J. Fatigue*, **24**, 2002, p. 913
10. BLAKE AL., Practical Fracture Mechanics in Design, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong
11. PAVEL A., Oboseala oligociclică, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1996
12. JAHED H., VARVANI – FARAHANI A., Upper and lower fatigue life limits model using energy – based fatigue properties, *Int. J. Fracture*, **28**, 2006, p. 467
13. SHANG DE-G., YAO W-X, WANG D-J., A new approach to the determination of fatigue crack initiation size, *Int. J. Fatigue*, **20**, 1998, p. 683
14. ZHANG X., WANG Z., Fatigue life improvement in fatigue – aged fastener holes using the cold expansion techniques, *Int. J. Fracture*, **25**, 2003, p. 1249
15. WELLINGER K. DIETMANN H., Festigkeitsberechnung, Kröner Verlag, Stuttgart, 1969
16. BUCH A., Fatigue Strength Calculation, Trans. Tech. Publications, Switzerland, 1988
17. PARIS P.C., ERDOGAN F., A critical analyses of crack propagation law, ASME, 62 WA, 1962, p. 234
18. PARIS P.C., The Fracture Mechanics Approach to Fatigue, Syracuse University Press, 1964
19. SKELTON R.P., VIEHLMSEN T., WEBSTER G.A., Energy criteria and cumulative damage during fatigue crack growth, *Int. J. Fatigue*, **20**, 1998, p. 641
20. PANĂ T., PASTRAMĂ T. D., Mécanique de la Rupture, Editura Printech, Bucureşti, 2000
21. BIŢ C., Legi de propagare pentru fisurile de oboseală utilizate în proiectarea structurilor mecanice solicitate ciclic, *Buletinul ARMIR*, nr. 3, 1996, p. 13
22. JINESCU, V., POPESCU, I.C., *Rev. Chim. (Bucureşti)*, **58**, nr. 12, p. 1278

Intrat în redacţie: 5.07.2007