

AEF-T.2.4

MODELAREA COMPORTĂRILOR ȘI CARACTERISTICILE MATERIALELOR SOLICITATE VARIABIL

CUPRINS

AFT-T.2.4.1	GENERALITĂȚI
AFT-T.2.4.2	SOLICITĂRI VARIABLE
AFT-T.2.4.3	CURBE DE DURABILITATE (OBOSEALĂ), σ-N
AFT-T.2.4.4	FACTORII CARE INFLUENȚĂ REZISTENȚA LA OBOSEALĂ
AFT-T.2.4.5	DURABILITATEA DE TRANZIȚIE (OLIGOCICLICĂ)
AFT-T.2.4.6	CALCULUL LA OBOSEALĂ (DURABILITATE) A STRUCTURILOR MECANICE
AFT-T.2.4.7	AEF LA OBOSEALĂ

AFT-T.2.4.1 GENERALITĂȚI

Ruperea la oboseală a unei structuri este cedarea care se produce, puternic localizat, în zonele cu tensiuni și deformații mari, consecință a unui ansamblu particular de condiții geometrice, de material și de sarcini variabile perioade de timp mari (mai mult de $10^2 \dots 10^3$ cicluri); tensiunile maxime care apar sunt inferioare rezistenței la rupere sau chiar limitei de elasticitate a materialului; deformațiile elastice mari sau chiar plastice se localizează în jurul unor fisuri de suprafață sau defecte.

Procesul de rupere la oboseală a unei structuri metalice are un *caracter progresiv* și este influențat de *caracteristicile materialului* (granulația, anizotropia, omogenitatea, fisuri, incluziuni, goluri), *formele și dimensiunile geometrice* (concentratori), *tehnologiile de fabricație* (sudare, forjare, turnare, aşchiere, tratamente termice, deformări plastice la rece etc), *solicitățile și condițiile de lucru, temperatura de funcționare*; durata de viață (durabilitatea) a unei structuri, de obicei, prin numărul de cicluri până la oboseală.

În practică fenomenele de oboseala apar consecință a unor *solicitări dinamice complexe* precum: vibrații, șocuri repetate, variații de temperatură, sarcini variabile periodice și/sau aleatorii.

AFT-T.2.4.2 SOLICITĂRI VARIABLE

Totalitatea valorilor atinse de tensiunile dintr-un punct al unei structuri în decursul unei perioade de timp determină un **ciclu de solicitare** care poate fi *determinist* (valorile sunt funcții explicite de timp, de obicei, sinus, fig. 1) sau *aleator* (întâmplător, nestăționar).

Ciclurile de solicitare deterministe (staționare) descrise de funcții periodice (frecvent, sinus) sunt caracterizate de următorii parametri caracteristici: tensiunea maximă, $\sigma_{\max}$; tensiunea minimă, $\sigma_{\min}$; tensiunea medie, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$; amplitudinea ciclului, $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$; coeficientul de asimetrie, $R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$. În tab. se prezintă cele mai întâlnite cicluri de solicitare deterministe folosite frecvent în proiectare pentru studiul structurilor la solicitări variabile. În cazul structurilor din materiale plastice pentru ciclurile de solicitare tracțiune-compresiune caracteristica de descărcare este diferită de caracteristica de încărcare și apare bucla de histeresis (fig. și tab. , caracteristica σ - ϵ).

Ciclurile de solicitare aleatorii (nestăționare), practic, se determină

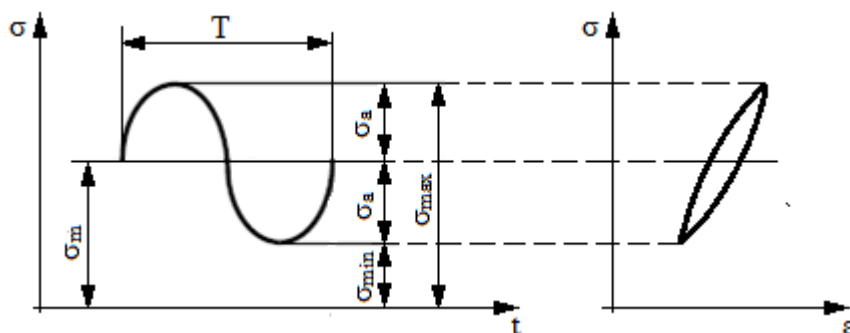


Fig. 1

din spectre de variație a tensiunilor într-un punct care se înregistrează experimental (de ex. variația tensiunilor dintr-un punct al punții spate a unui automobil care se deplasează pe un drum pietruit, fig. 2). Pe baza acestor înregistrări se pot elabora *programe de încercări* pe stand în vederea determinării experimentale a rezistenței în exploatare sau, pe de altă parte, se pot elabora *spectre de solicitare*

Tab. 1

Denumirea ciclului/reprezentare	Caracteristici	Denumirea ciclului/reprezentare	Caracteristici
Oscilant	$\sigma_m < \sigma_a$ $0 < R < 1$	Pulsator	$\sigma_m = \sigma_a$ $R = 0$
Alternant		Alternant simetric	
	$0 < \sigma_m < \sigma_a$ $-1 < R < 0$		$\sigma_m = \sigma_a$ $R = 0$

pentru proiectarea bazat pe calculul de durabilitate. Astfel, pentru cazurile reale de solicitare a mașinilor se fac înregistrări experimentale (fig. 2,a) urmate de procesarea în vederea identificării și separării (filtrării) solicitării de bază (de exploatare) față de perturbații (vibrații aleatoare cu amplitudini mult reduse) și determinarea unor *secvențe de solicitare* care se repetă sub formă de grupuri (blocuri) de cicluri cu amplitudine constantă.

În practica analizelor de oboseală deoarece frecvența ciclurilor de solicitare nu influențează semnificativ comportarea la oboseală aceasta nu se ia în considerare ci se fac studii numărul ciclurilor de solicitare.

Elaborarea *istoriei solicitării (loading history)* unei structuri constă în determinarea secvențelor sau blocurilor de solicitare, succesiunea și numărul acestora. Astfel, pentru spectrul de solicitare din fig. 2,a se evidențiază trei blocuri care au N_1 , N_2 și N_3 cicluri de solicitare alternante cu amplitudinile σ_{a1} , σ_{a2} și respectiv, σ_{a3} . Pentru calcul de oboseală, aceste blocuri se repetă, și se pot lua în considera ca un ciclu (program) de bază repetitiv. Astfel, configurațiile complexe cu spectru aleator ce apar în practică se pot, conform Gassner,

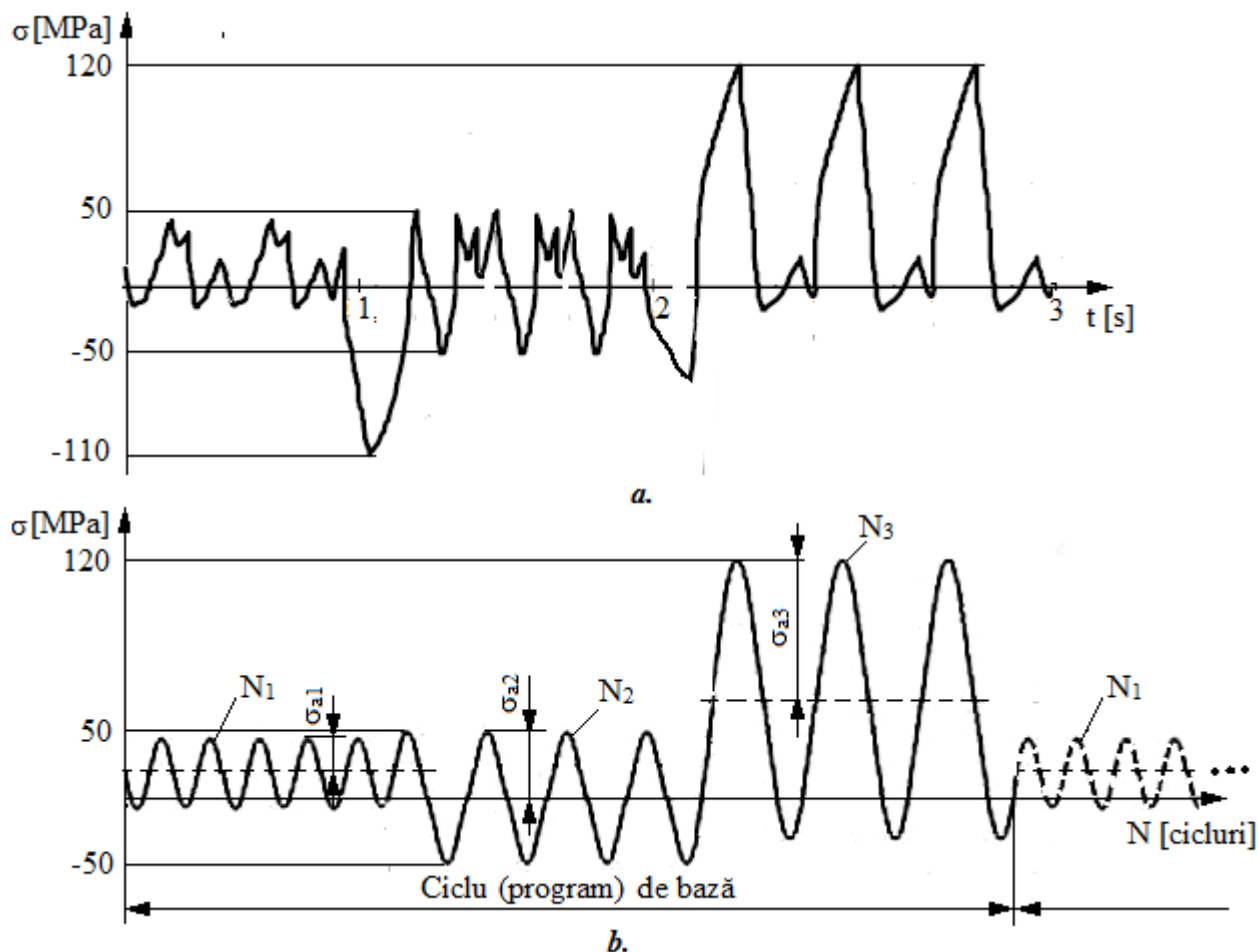


Fig. 2

echivala cu un program (bloc) de solicitare compus din cicluri cu amplitudini constante (grupe) ce variază în trepte (fig.). Fiecare grupă este caracterizată de tensiunea maximă (σ_{ai}) și numărul de cicluri (N_i).

Deoarece din curba de oboseală (Wohler, v. subcap.) se evidențiază ruperea după un singur grup cu un număr cicluri de solicitare alternant simetric (σ_{-1}) și în realitate ruperea la oboseală a piesei (structurii), având în vedere istoria încărcării în grupe succesive cu amplitudini diferite, se impune, pentru a se putea raporta la rezistența la oboseală a materialului, echivalarea programului de solicitare cu un număr de cicluri alternant simetric, independent de numerele de cicluri corespunzătoare tensiunilor maxime ale programului de încercare.

Pentru găsirea numărului de cicluri echivalent de solicitare până la cedare, s-au dezvoltat mai multe *teorii de echivalare bazate*, cu precădere, pe principiul cumulării deteriorărilor, implementate în diverse metode practice (Palmgren-Miner, Grower, Corten-Dolan, Freudenthal-Heller, Marco-Starkey), dintre care cel mai des utilizată, datorită simplității, este Palmgren-Miner. Această metodă, presupune calculul deteriorării structurii (lungimea fisurii de oboseală) la solicitări variabile (conform istoriei solicitării) pe baza aportului liniar al fiecărui grup (ciclu cu amplitudine constantă), are la bază următoarele ipoteze:

- fiecare grup de cicluri de solicitare participă la deteriorare (cedare) proporțional cu raportul dintre numărul de cicluri ale grupei (N_i) și numărul de cicluri solicitare (n_i) la care s-ar produce ruperea la oboseală conform condițiilor de determinare a rezistenței la oboseală (curba Wohler), desigur, la aceeași amplitudine σ_i ;
- poziția grupei în cadrul programului de solicitare nu influențează cedarea prin rupere la oboseală.

Astfel, pentru o structură solicitată de blocul de cicluri format din trei grupe cu amplitudine constantă (fig. 2, b) participarea cumulată la deteriorarea D va fi proporțională cu, $n_1/N_1 + n_2/N_2 + n_3/N_3 = \Sigma(n_i/N_i)$. Conform principiului cumulării deteriorărilor, structura cedează, când se atinge egalitatea,

$$\Sigma(n_i/N_i) = 1. \quad (1)$$

Pentru, cazul virtual, al ciclului de solicitare alternant simetric echivalent (similar cu cel corespunzător curbei de oboseală) cu numărul de cicluri, N, conform aceluiași principiu, structura ar ceda la aceeași deteriorare D ce este proporțională cu $1/N$. Astfel, ținând cont de relația (1), se obține relația

$$\Sigma(n_i/N_i) = 1/N, \quad (2)$$

din care se poate determina valoarea numărului de solicitare echivalent, N.

Pentru determinarea duratei de viață (numărului de cicluri de solicitare până la cedare) conform teoriilor de echivalare (inclusiv, cu metoda Palmgren-Miner cu relația (2)) se impune determinarea cu acuratețe a numerelor de cicluri n_i pentru încercarea la oboseală după un ciclu alternat simetric cu amplitudine constantă (curba σ -N) egală cu a ciclului grupului, σ_i . Spre deosebire de cazul grupurilor cu amplitudine constantă când duratele de viață se determină conform curbelor de durabilitate (σ -N), în cazul blocurilor cu cicluri de solicitare cu amplitudini variabile se impune folosirea unei tehnici de determinare dedicate.

Una din cele mai utilizate (inclusiv, de mediul ANSYS) este *tehnica picăturii de ploaie (rain flow)* propusă de Matsuihi și Endo. În cazul acestei tehnici pentru determinarea numărului de cicluri de solicitare pentru o secvență dată, se presupune că ciclul este format din mulțimea valorilor prin care trece tensiunea între două valori extreme, o în sens crescător și descrescător. Ecartul dintre valorile extreme constituie treapta de solicitare care se repetă de n_i ori se împarte în clase pentru care se vor determina ciclurile de solicitare care contribuie la cedare (deteriorare).

AFT-T.2.4.3 CURBE DE DURABILITATE (OBOSEALĂ), σ -N

Curba de durabilitate, σ -N (Wohler sau S-N) (în literatura în limba engleză) se obține ca urmare a unor încercări experimentale, pe loturi de epruvete identice (minim 10), încărcate cu *sarcini variabile staționare ciclice* cu coeficientul de asimetrie R (frecvent, se folosește ciclul alternat simetric cu $R = -1$, tab. 1) și cu amplitudinea σ_a (diferită pentru fiecare epruvetă), pentru care se obțin *durabilitățile* N_i (numerele de cicluri) la care epruvetele au cedat (se rup). Curba σ -N se obține prin reprezentarea grafică a perechilor de puncte (σ_a , N_i) într-un sistem de coordonate cu σ_a pe ordonată și N_i (la scări naturale sau logaritmice, fig. 3). Tensiunea maximă la care epruveta nu se rupe oricât de mult ar fi solicitată se numește *limita (rezistența) la oboseală* (σ_R , σ_{-1}) corespunzătoare coeficientului de asimetrie al ciclului de solicitare R (-1).

Curbele de durabilitate, în funcție de tipul materialului, pot fi:

- *continuu descrescătoare* (fără palier, fig. 3,a) pentru care se definește o limită (rezistență) la oboseală convențională corespunzătoare unei durabilități de bază, $N_B = 10^7 \dots 10^8$ cicluri, pentru oțeluri călite în medii necorosive aliaje din aluminiu;
- *cu limită inferioară* (palier, fig. 3,a) a tensiunii, σ_R (σ_{-1}), ce reprezintă limita (rezistență) la oboseală (rezistența la durabilitate) care apare la durabilități de bază, $N_B = 10^6$ cicluri (aprox), pentru oțeluri cu rezistență redusă.

Curba de durabilitate la oboseală reprezintă în *coordonate dublu logaritmice* (în special, pentru numere de cicluri mai mari ca $10^3 \dots 10^3$, fig. 3,c) devine o dreaptă descrisă de relația,

$$\log \sigma_i = b \log N_i + C, \quad (3)$$

în care, b și C sunt constante de material (unele modele consideră, $C = 0$).

Având în vedere că mecanismele de producere a rupei sunt diferite pentru diferite durabilități, convențional, pe curbele de durabilitate se evidențiază următoarele *stări funcționale* (fig.): cu durabilitate mică (durata de viață redusă, $N < 10^2 \dots 10^3$); cu durabilitate (mare) limitată ($10^2 \dots 10^3 < N < 10^6 \dots 10^7$); cu durabilitate (mare) nelimitată ($N > 10^6 \dots 10^7$). Calculul de durabilitate în zona durabilității reduse ($N < 10^2 \dots 10^3$) are la bază curbele de durabilitate ϵ - N ce modelează oboseala oligociclică (v. AEF-). Pentru calculul de *durabilitate nelimitată* conform relației (3) se determină rezistența la durabilitate nelimitată, ca valoare a tensiunii maxime ce poate fi suportată pentru o durabilitate de N_i cicluri,

$$\sigma_i = N_i^b 10^C, \quad (4)$$

pentru, $10^2 \dots 10^3 < N < 10^6 \dots 10^7$. Similar, cunoscând rezistența la durabilitate nelimitată, σ_{-1} , se poate determina durabilitatea,

$$N_i = \sigma_{-1}^{1/b} 10^{-C/b}. \quad (5)$$

Practic, $\sigma_{-1} = (0,36 \dots 0,65) \sigma_r \approx 0,5 \sigma_r$ pentru oțelurile cu $\sigma_r < 1400$ MPa; $\sigma_{-1} = 700$ MPa, pentru oțelurile cu $\sigma_r > 1400$ MPa ($\sigma_r = \sigma_{+1}$).

AFT-T.2.4.4 FACTORII CARE INFLUENȚĂ REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

De obicei, rezistența la oboseală a unei structuri (piese) nu este aceeași cu rezistența la oboseală obținută experimental pe epruvete standard și pentru calculul la oboseală se impun corecții cu factori: *de exploatare* (influența tensiunii medii, modul de solicitare, variația amplitudinii, frecvența ciclurilor de solicitare, temperatura, acțiunea chimică a mediului); *constructivi* (formele concentratorilor de tensiune, dimensiuni); *tehnologici* (tipul materialului, tehnologia de fabricație, gradul de finisare a suprafețelor al suprafețelor, tensiuni

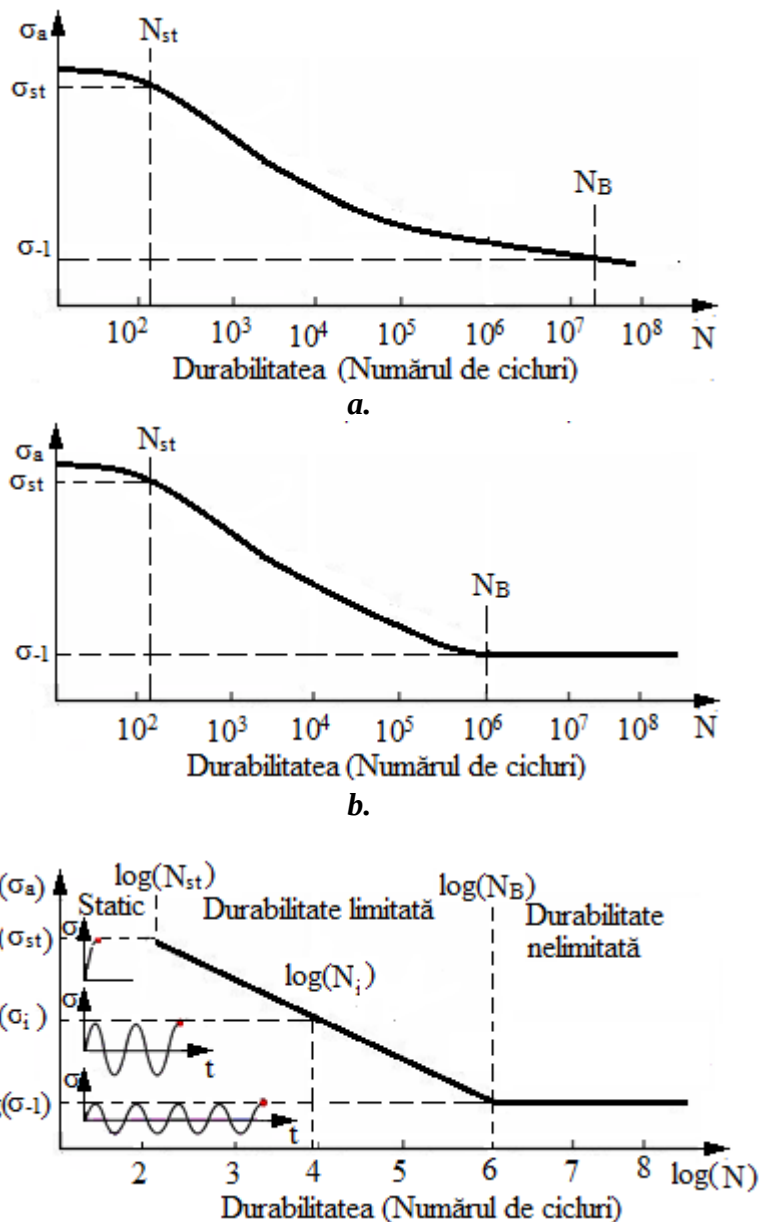


Fig. 3

reziduale, acoperiri de suprafață).

Influența tensiunii medii. Diagramele rezistențelor la oboseală

În general, valorile caracteristice de material obținute experimental se obțin prin încercări la cicluri simetrice) pentru care tensiunea medie $\sigma_m = 0$. Un ciclu de solicitare real (aproximabil cu un ciclu cu $R = [-1, 1]$) se poate considera ca ciclu alternat simetric de amplitudine σ_a suprapus peste o solicitare constantă egală cu tensiunea medie σ_m (fig. 1). Experimental s-a evidențiat că în cazul durabilităților mari creșterea tensiunilor medii scurtează viața structurii (piesei) (fig. 4).

Ciclul de solicitare cu coeficientul de asimetrie R și cu tensiunea maximă σ_{max} egală cu rezistența la oboseală a materialului (σ_{-1}) se numește ciclu limită. Efectul tensiunii medii se cuantifică cu *diagrama rezistențelor la oboseală sau curba ciclurilor limită* (locul geometric al punctelor corespunzătoare ciclurilor limită) care evidențiază variația rezistenței la oboseală cu coeficientul de asimetrie, $-1 < R < 1$ (Haigh, fig. 5). În practică aceste diagrame permit determinarea rezistențelor la oboseală în funcție de coeficientii de asimetrie R (sau de σ_m și σ_a).

În fig. 5 se prezintă diagrama High pentru solicitarea de tracțiune în care se evidențiază puncte corespunzătoare ciclurilor de solicitare: A – alternat simetric, B – pulsator, C – static, E – alternant/oscilant ($-1 < R < 1$). În cazul în care ciclul de solicitare real corespunde punctului D din interiorul curbei AC, structura rezistă la oboseală, iar dacă corespunde punctului F din exteriorul acesteia, structura cedează prin rupere la oboseală.

Obținerea unei diagrame High (Smith) în formă completă este aproape imposibilă, deoarece necesită încercări la oboseală pentru foarte multe cicluri (teoretic infinit) cu coeficienți de asimetrie în domeniul $[-1, 1]$ și, ca urmare, pentru scopuri practice s-au propus schematizări (simplificări) ale acelor diagrame. În practica de proiectare a structurilor mecanice se folosesc frecvent simplificările liniare Goodman (pentru materiale fragile) și Soderberg (pentru materialele tenace) care înlocuiesc curba AC cu dreapta AC (punctul C corespunzând tensiunii de rupere statică σ_r) și, respectiv, dreapta AS (punctul S corespunde tensiunii limită de curgere σ_c).

Influența modului de solicitare

Tensiunea limită (rezistența) la oboseală a materialului, de obicei, se obține experimental pentru solicitarea de încovoiere rotativă, tracțiune-compresiune sau torsiune ciclică. Rezistența la oboseală la încovoiere rotativă (alternant simetrică) poate depăși cu până la 20% pe cea la tracțiune-compresiune ciclică. Limita la oboseală la torsiune ciclică este în medie 0,55 din limita la oboseală la tracțiune-compresiune ciclică.

Influența variației amplitudinilor tensiunilor

În general, piesele și structurile de rezistență sunt supuse unor solicitări care au amplitudinea variabilă; ordinea de aplicare a ciclurilor are o influență semnificativă asupra comportării la oboseală.

Influența frecvenței ciclurilor de solicitare

Frecvența ciclurilor de solicitare are influență nesemnificativă asupra limitei de oboseală, dar în cazul funcționării în medii corozive frecvența are influență semnificativă.

Influența temperaturii de lucru

Variația durabilității cu temperatura în domeniul numerelor mari de cicluri de solicitare este analogă cu variația caracteristicilor mecanice uzuale obținute la încercările de tracțiune statică; influența temperaturii asupra rezistenței la oboseală se poate lua în considerare printr-un coeficient (K_d) definit ca raportul dintre rezistența la oboseală la temperatura T și rezistența la oboseală în aceleași condiții la temperatura mediului ambiant T_0 .

Influența mediului de lucru

Rezistența la oboseală scade considerabil dacă piesa lucrează în medii corozive (aer umed, vapori de apă, acizi, apă sărată etc.) care în cazul solicitărilor ciclice conduc la rupere prematură (oboseala prin coroziune); în acest caz se introduce noțiunea de *rezistență la oboseală prin coroziune*.

Influența concentratorilor de tensiune

Concentratorii de tensiune (crestături, racordări, găuri etc.) reduc rezistența la oboseală. Aceasta se cuantifică prin intermediul unor coeficienți de corecție.

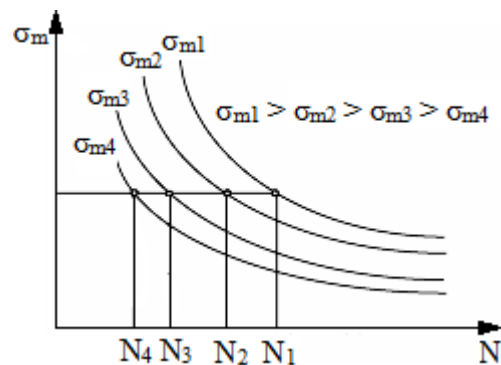


Fig. 4

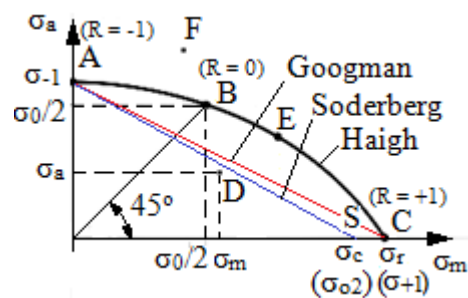


Fig. 5

Influența dimensiunilor piesei

Tensiunea limită la oboseală a materialului se determină pe epruvete circulare cu diametrul standard. În practică dimensiunile pieselor sunt diferite de cele ale epruvetelor și se impune introducerea unui factor de corecție deoarece cu cât volumul de material supus tensiunii maxime este mai mare cu atât și probabilitatea de rupere este mai ridicată.

Influența tipului materialului

Cu cât materialele au rezistență la rupere mai mare cu atât rezistența la oboseală va fi mai ridicată.

Influența calității (rugozității) suprafețelor

Epruvetele de încercare în vedere obținerii limitei la oboseală, de obicei, sunt netede cu suprafața lustruită în direcție axială. În cazul real piesele au suprafețe cu rugozități diferite și pentru calculul la oboseală se introduce un coeficient al calității suprafeței care se definește ca raportul dintre rezistența la oboseală a unei epruvete cu o anumită rugozitate și rezistența la oboseală a epruvetei cu suprafața șlefuită.

Influența tensiunilor reziduale

Tensiunile generate prin mijloace tehnologice mecanice (presare prin role, ecrusarea cu jet de alicie) sau tratamente termice sau termochimice (cementare, cianurare, nitrurare, călire superficială) anterior solicitării de serviciu se numesc tensiuni inițiale (reziduale) conduc la reducerea rezistenței la oboseală.

AFT-T.2.4.5 DURABILITATEA DE TRANZIȚIE (OLIGOCICLICĂ)

Solicitările variabile cu numere de cicluri reduse (mai mici de 10^3), sunt caracterizate de tensiuni maxime ridicate (fig. 3) și deci, la fiecare ciclu de solicitare, de apariția *deformațiilor plastice ciclice*. Pentru aceste cazuri, se determină *diagrame caracteristice* ($\sigma - \epsilon$) *la solicitări ciclice* prin încercări la oboseală ce presupun măsurarea deformațiilor ϵ pe epruvete solicitate axial (tracțiune-compresiune), prin tensometrie electrică rezistivă. În cazul solicitării axiale ciclice a unui material cu aceleași proprietăți la tracțiune și compresiune limita de curgere la solicitarea de semn contrar se reduce (efectul Bauschinger, fig. 6) și pentru un ciclu complet apare o bucă histeresis. În cazul repetării aceluiași ciclu de întindere-compresiune buclele histeresis, în continuare, nu se mai suprapun (în fig. 6 punctele C și C' nu se suprapun peste punctul A).

În cazul în care solicitarea ciclică se face în condițiile impunerii unei deformații alternat simetrice ϵ (fig. 6) punctele de întoarcere (C și C') corespunzătoare schimbării de semn a solicitării se deplasează de la un ciclu la altul mărindu-și sau micșorându-și ordonata (tensiunea). Materialele la care pe măsura aplicării ciclurilor de solicitare ciclică, tensiunea crește se numesc *materiale cu ecrusare ciclică* iar cele la care aceasta scade *materiale cu înmuiere ciclică*. După aplicarea unui număr de cicluri în cazul ambelor tipuri de materiale apare un fenomen de saturare când variațiile de tensiune de la un ciclu la altul sunt nesemnificative, bucla histeresis stabilizându-se (fig. 8; în această fig. se prezintă și curba caracteristica statică $\sigma - \epsilon$ la tracțiune).

Diagrama caracteristică $\sigma - \epsilon$ la solicitări ciclice (fig. 7) se determină prin testarea mai multor epruvete identice solicitate cu cicluri simetrice cu amplitudinea deformației constantă și obținerea punctelor de întoarcere ale buclelor de histeresis stabilizate (amplitudinea deformațiilor se păstrează constantă pentru o epruvetă și de la o epruvetă la alta aceasta este crescătoare până la rupere).

Pentru a se evidenția comportarea la oboseală (când apar și deformații plastice) în practică sunt utile și studiile privind dependențele tensiune deformație ($\sigma - \epsilon$) pentru un ciclu de solicitare (fig. 3) și deformație-durabilitate ($\epsilon - N$, fig. 8).

În fig. 6 se observă fenomenul de histerezis cu evidențierea componentelor deformației totale ($\Delta\epsilon$), deformațiile elastică ($\Delta\epsilon_e$) și plastică ($\Delta\epsilon_p$). **Curba de durabilitate, $\epsilon - N$** (fig. 8) sintetizează variațiile amplitudinilor *deformații totale* ($\Delta\epsilon$) cu *numărul $2N_f$ de "inversiuni"* (schimbări ale sensului tensiunii) până la rupere. Aceste curbă se pot considera ca însumare a *curbelor de durabilitate elastică și plastică* (fig. 8) care se intersectează în punctul în care $\Delta\epsilon_e = \Delta\epsilon_p$ ce corespunde numărului de cicluri N_f (durabilitatea sau durata de viață de tranziție). Valoarea acestuia depinde de material, uzual este $10^3 \dots 10^5$ cicluri pentru materiale cu rezistență mărită sau 10^6 cicluri pentru materiale cu rezistență redusă.

Din punct de vedere al durabilității de tranziție se pot evidenția două situații: *solicitări cu durabilitate mărită* ($N > N_f$) care se evidențiază prin curgeri plastice neînsemnate și calculul la oboseală se face numai pe baza tensiunilor (caracteristica $\sigma - N$); *solicitări cu durabilitate redusă* ($N < N_f$) care au curgeri plastice însemnate și calculul la oboseală se face numai pe baza deformațiilor (caracteristica $\epsilon - N$).

Durabilitatea la oboseală ciclică în domeniul numărului mic de cicluri de solicitare a fost determinată pentru prima dată în 1973 în raportul SAE Fatigue Design and Evaluation Steering Committee ca o corelație între amplitudinea deformației $\Delta\epsilon$ și numărul de inversiuni $2N_f$ (fiecare ciclu conține două inversiuni sau schimbări de sens) până la rupere pentru oțelul SAE 1020 (fig. 8).

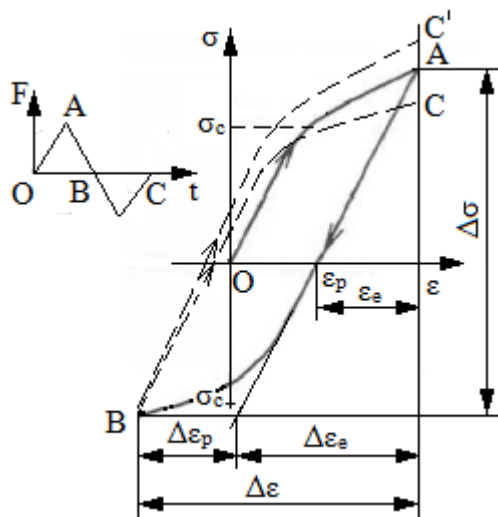


Fig. 6

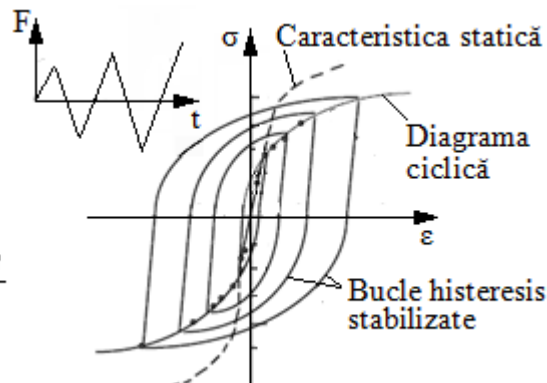


Fig. 7

Amplitudinea deformației totale ($\Delta\epsilon$), compusă prin însumarea relațiilor asociate dreptelor deformațiilor (fig. 8), elastice ($\Delta\epsilon_e$) și plastice ($\Delta\epsilon_p$), cu relația,

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p, \quad (6)$$

ținând cont de relațiile (fig. 8),

$$\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^C, \quad (8)$$

se poate obține cu relația (Manson-Coffin),

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^C, \quad (9)$$

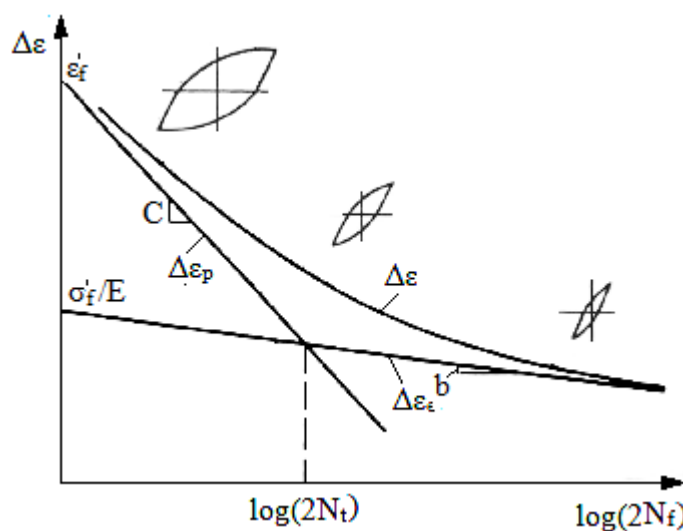


Fig. 8

în care σ'_f este factorul rezistenței la oboseală (rezistența reală la rupere la o singură inversiune), ϵ'_f - factorul de ductibilitate la oboseală (deformația reală la rupere la o singură inversiune), b - exponentul rezistenței la oboseală elastică (panta dreptei deformațiilor elastice), C - exponentul ductilității la oboseală plastică (panta dreptei deformațiilor plastice).

Se observă că curba de durabilitate în domeniul numărului mic al ciclurilor de solicitare este asemănătoare cu curba Wohler (se poate trece de la curba ϵ - N la curba σ - N folosind ecuația curbei caracteristice ciclică).

AFT-T.2.4.6 CALCULUL LA OBOSEALĂ (DURABILITATE) A STRUCTURILOR MECANICE

Pentru calcule la oboseală în vederea proiectării a structurilor luând în considerare solicitările variabile reale, determinate de amplitudinea și numărul ciclurilor acestora și particularitățile constructive și de execuție structurii, se impune identificarea valorilor locale ale amplitudinii tensiunii.

Proiectarea luând în considerare rezistența la oboseală a structurii presupune următoarele situații practice:

- Proiectarea pentru durata de viață nelimitată (peste 10^6 cicluri) presupune determinarea valorii coeficientului de siguranță la durabilitate nelimitată (funcționare sigură un timp nedefinit) astfel ca valorile maxime locale ale tensiunilor să nu depășească rezistența admisibilă la oboseală; în acest caz se are în vedere optimizarea formei, alegerea tehnologiei adecvate, restricții de exploatare etc.
- Proiectarea pentru durata de viață limitată (sub 10^6 cicluri) când, de obicei, solicitările sunt cu amplitudine mărită, presupune analiza (verificarea) la oboseală în zonele critice (cel mai solicitate) ce implică determinarea amplitudinilor maxime ale tensiunilor și/sau deformațiilor echivalente care sunt comparate cu cele determinate din curbele de durabilitate ale materialului (σ - N și/sau respectiv ϵ - N); în acest caz se determină valoarea coeficientului de siguranță la durabilitate limitată (funcționare sigură

un timp definit, conform duratei de viață rezultată) corespunzătoare rezistenței la durabilitate limitată din curba de oboseală.

- *Proiectarea pentru deteriorare controlată* presupune determinarea prin calcul a rezistenței la deteriorare controlată (fail-safe) care, în practică, de obicei, stă la baza monitorizării siguranței de funcționare a unei structuri care are un defect (fisură) inițială; în acest caz se ia în considerare toleranța la deteriorare ca fiind capacitatea unei structuri cu defecte (fisuri) de a-și păstra rolul funcțional un timp prestabilit.
- *Proiectarea pentru fiabilitate impusă* presupune estimarea *probabilității de cedare* într-o perioadă de timp dată (funcționarea sigură cu probabilitate determinată).

Pentru rezolvarea acestor probleme se impune, după caz, cunoașterea curbei la oboseală a materialului, adoptarea unor schematizări a digramelor ciclurilor limită, acceptarea unui mod de alegere a ciclurilor limită, definirea coeficientului de siguranță la oboseală.

Factorii care determină procesul de oboseală sunt cu incertitudini legate de material, de încărcare, de calitatea suprafețelor, de modelul de analiză (inclusiv FEA) și deci, pentru analiză se folosesc metode statistice și calcul probabilistic

AFT-T.2.4.7 AEF LA OBOSEALĂ

Scop: caracterizarea capacității materialului de a nu ceda cât mai multe cicluri de solicitare în durata de viață impusă unei structuri.

Tipurile Analizelor la Oboseală:

1. Durata de viață din deformării (strain life)

- se folosește pentru numere de cicluri reduse (Low Cycle Fatigue-LCF) mai mici de 10^5 .
- deformările sunt măsurabile direct și pot evidenția procesul de inițiere a fisurilor
- se ia în considerare deformarea totală (elastică și plastică)
- soluționarea unei AEF la oboseală după legile $\sigma - \epsilon$ și $\epsilon - N$ este anevoioasă, în special pentru răspunsul structurii în domeniul elastic, și s-a adoptat relația lui Neuber care indică dependența simplificată dintre deformările/tensiunile locale și cele nominale din zona concentratorului; prin rezolvarea simultan cu ecuațiile $\epsilon - N$ și a ecuației Neuber se determină tensiunile/deformările locale ce includ și deformările plastice considerând ca intrări doar cele elastice; factorul K_t poate lua valoarea 1 pentru cazul fineței de discretizare mărită a concentratorilor (permite luarea în considerare a tuturor efectelor concentratorului)

2. Durata de viață din tensiuni (stress life)

- se folosește pentru numere de cicluri mărite (Low Cycle Fatigue-HCF) mai mici de 10^5 (inclusiv, pentru durată de viață infinită).
- are la bază curbele S-N (Stress - cycles curves)
- se determină durata de viață totală, nu ia în considerare inițierea și propagarea fisurii

3. Ruperi mecanice

- Se utilizează frecvent pentru determinarea intervalelor de inspecție a structurilor vitale care însumate trebuie să fie mai mici decât timpul de dezvoltare a fisurii până la rupere.
- Calculul pornește cu asumarea unei dimensiuni inițiale a unei fisuri și determinarea unui flux ce evidențiază evoluția fisurii prin determinarea "duratei vieții fisurii".
- Uneori, durata de viață din deformării permite determinarea inițierii fisurii și apoi determinarea fluxului evoluției (duratei) fisurii.