

### Capitolul 3. Caracteristicile materialelor în termenii limitei la oboseală

În prezentul capitol, sunt prezentate caracteristicile materialelor în cazul solicitării la oboseală după un ciclu cu amplitudine constantă. Se va dezvolta conceptul de limită la oboseală și modalități practice de determinare a acesteia. Se vor trece în revistă diagramele utilizate în cadrul conceptului de limită la oboseală.

#### 3.1. Caracteristicile ciclului periodic cu variație continuă

În proiectarea a numeroase piese și structuri, estimarea comportării la solicitări variabile ține seama de datele obținute prin încercarea la oboseală a unor epruvete netede. În acest caz, nu se urmărește prevenirea inițierii sau a propagării necontrolate a fisurilor ci asigurarea față de o stare limită definită prin amplitudinea deformației specifice sau a tensiunii. Solicitățile variabile periodice se pot defini ca o funcție cu variație ciclică în timp. O astfel de variație este definită prin valorile maximă ( $\sigma_{\max}$ ) și minimă ( $\sigma_{\min}$ ) pe care tensiunea o atinge în același punct al unei piese solicitate în intervalul de timp de referință. Această variație se poate vedea în figura 3.1 și poate fi descrisă de funcția (Ion Dumitru):

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3.1)$$

în care:

- $\sigma_m$  este valoarea tensiunii medii a ciclului;
- $\sigma_a$  este amplitudinea constantă a ciclului;
- $f$  reprezintă frecvența circulară în cicluri pe unitatea de timp;
- $\varphi$  este unghiul de fază inițial exprimat în radiani.

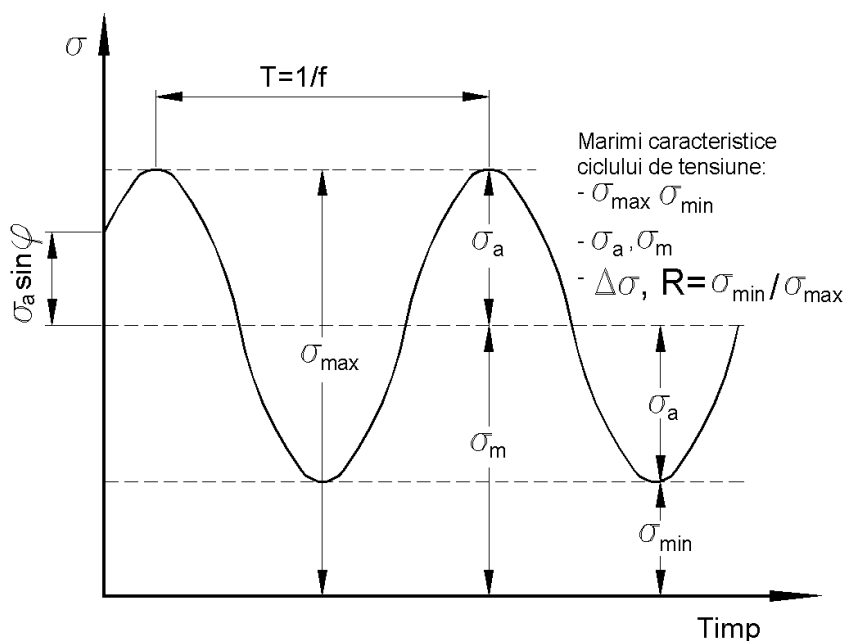


Fig. 3.1 Schematizarea ciclului periodic cu variație continuă

Există o interdependență între tensiunile minimă și maximă și tensiunile medii și amplitudinea ciclului descrisă de următoarele relații:

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \sigma_m + \sigma_a \\ \sigma_{min} &= \sigma_m - \sigma_a \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \square\end{aligned}\tag{3.2}$$

Alte elemente caracteristice ale ciclului de solicitare sunt:

- caracteristica ciclului calculată ca raport între valorile absolute ale amplitudinii și tensiunii medii:  $k = \sigma_a / \sigma_m$ ;
- coeficientul de asimetrie a ciclului calculat ca raport între tensiunea minimă și cea maximă:  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  □;
- variația tensiunii:  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a = \sigma_{max}(1-R)$ ;
- perioada T, respectiv frecvența care sunt corelate conform relației:  $T = 1/f$ .

În continuare se prezintă câteva relații evidente și care sunt rezultate din cele de mai sus:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 + R); \quad R = \frac{1 - k}{1 + k}; \quad k = \frac{1 - R}{1 + R}$$

### 3.2. Clasificarea ciclurilor de solicitare la oboseală

În tabelul 1 se prezintă o clasificare a ciclurilor periodice în funcție de gradul de asimetrie. În raport cu valoarea coeficientului de asimetrie se disting următoarele tipuri de solicitări:

- 1+9 - Solicitare statică, atunci când tensiunea își menține valoarea constantă:

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} = \sigma_m; \quad \sigma_a = 0;$$

- 2+8 - Solicitare oscilantă, când tensiunea își păstrează semnul:

$$\sigma_{min} / \sigma_{max} > 0;$$

- 3+7 - Solicitare pulsantă atunci când una dintre tensiunile limită este egală cu zero:

$$\sigma_{min} = 0; \quad \sigma_m = \sigma_a = \sigma_{max}/2; \quad R = 0;$$

- 4+6 - Solicitare alternantă atunci când tensiunea își schimbă semnul în timpul solicitării:

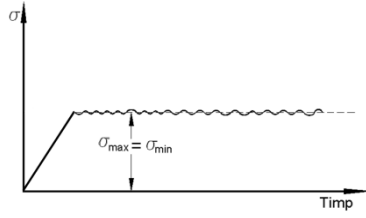
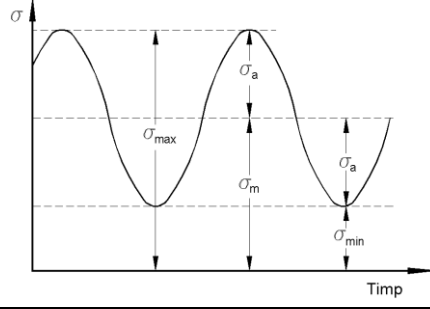
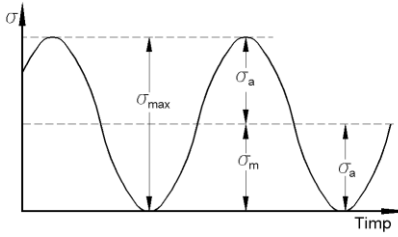
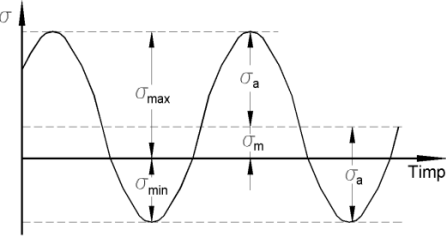
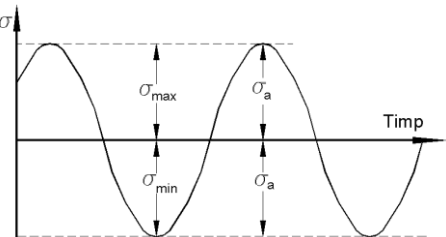
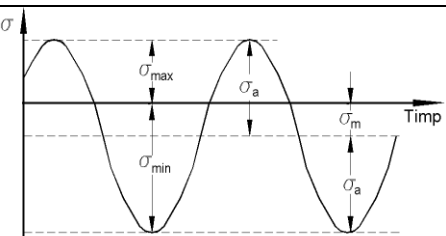
$$\sigma_{min} / \sigma_{max} < 0;$$

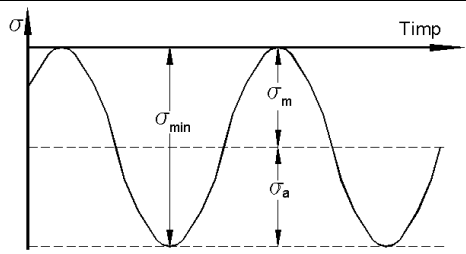
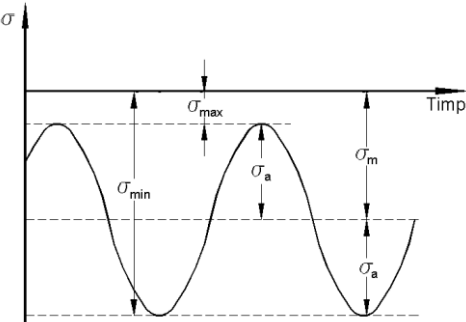
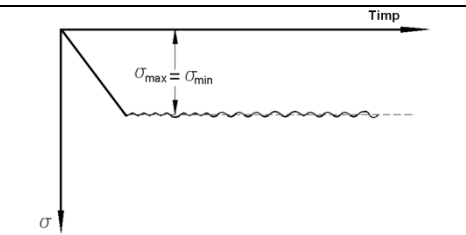
- 5 - Solicitare alternant-simetrică atunci când tensiunile minimă și maximă au aceeași valoare dar sunt de semn contrar:

$$\sigma_{min} = -\sigma_{max}; \quad \sigma_m = 0; \quad \sigma_a = \sigma_{max}.$$

Solicitările statică, oscilantă și pulsantă pot fi pozitive sau negative în raport cu  $\sigma_m$  care poate fi pozitivă sau negativă.

Tab. 3.1. Tipuri de cicluri la oboseală

Nr. crt.	Forma ciclului	$\sigma_{\min}; \sigma_{\max}$	$\sigma_m; \sigma_a$	R
1		$\sigma_{\min} = \sigma_{\max} > 0$	$\sigma_m = \sigma_{\min} = \sigma_{\max};$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$
2		$\sigma_{\min} > 0; \sigma_{\max} > 0$	$\sigma_m > 0; \sigma_a \neq 0$	$0 < R < +1$
3		$\sigma_{\min} = 0; \sigma_{\max} > 0$	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max}/2$	$R = 0$
4		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\max} >  \sigma_{\min} $	$\sigma_m > 0; \sigma_a \neq 0$	$-1 < R < 0$
5		$0 > \sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$	$\sigma_m = 0;$ $\sigma_a = \sigma_{\max}$	$R = -1$
6		$\sigma_{\min} > 0; \sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\max} <  \sigma_{\min} $	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq 0$	$-\infty < R < -1$

7		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} = 0$	$\sigma_m = \sigma_{\min}/2;$ $\sigma_a <  \sigma_{\min}/2 $	$R = \pm\infty$
8		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} < 0$ $ \sigma_{\max}  <  \sigma_{\min} $	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq 0$	$+1 < R = \infty$
9		$\sigma_{\min} = \sigma_{\max} < 0$	$\sigma_m =$ $\sigma_{\min} = \sigma_{\max};$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$

Stările de solicitare cu tensiuni tangențiale variabile sunt caracterizate prin aceleași elemente ca și stările cu tensiuni normale variabile.

### 3.3. Limita la oboseală

Așa cum s-a constatat din capitolele anterioare, fenomenul de oboseală trebuie analizat și pe baza unor determinări experimentale. În special pentru oțeluri, rezultatele obținute prin încercările la oboseală efectuate pe epruvete pot fi extrapolate la piese, în condițiile în care se ține seama de concentratorii de tensiune, calitatea suprafeței, dimensiune, mediul de lucru, etc. Pentru a putea face aceste extrapolări trebuie să se țină seama de următoarele ipoteze care se referă la materialul din care sunt confecționate epruvetele și piesele:

- Atunci când tensiunea fluctuează de mai multe ori, materialele se pot rupe la tensiuni mai mici decât tensiunea ce se înregistrează la rupere sau chiar mai mici decât tensiunea de curgere;
- Se poate spune că, dacă la o anumită tensiune, un material nu se rupe după un număr suficient de ridicat de cicluri de solicitare, se consideră valoarea acelei tensiuni ca fiind limită. În aceleași condiții de solicitare, sub această valoare a tensiunii materialul va rezista pe întreaga lui durată de funcționare. Cea mai mare tensiune, pentru care materialul nu se rupe după un număr practic nelimitat de cicluri de solicitare poartă numele de **limită la oboseală**.
- Dacă valoarea amplitudinii ciclului de solicitare  $\sigma_a$  se mărește atunci valoarea tensiunii limită descrisă la paragraful anterior va scădea.

Limita la oboseală reprezintă o caracteristică intrinsecă a materialelor, depinzând totuși de felul ciclului de solicitare, iar pentru unele materiale și de frecvența acestuia. Limita la oboseală se notează cu  $\sigma_R$ , în care R reprezintă coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare.

### 3.4. Determinarea limitei la oboseală prin trasarea curbei Wöhler

Determinarea limitei la oboseală se face pe baza încercărilor de epruvete netede la cicluri de solicitare pe mașini de încercare specializate în acest scop. Schematizarea unei încercări la oboseală care realizează un ciclu de încovoiere alternant simetric este prezentat în figura 3.2.

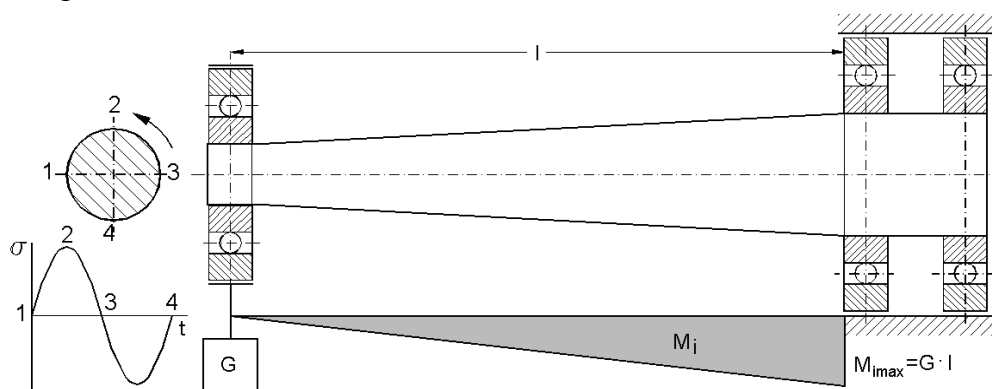


Fig. 3.2. Schema încercării la încovoiere rotativă

Epruvetele pentru încercarea la oboseală trebuie confecționate cu mare grijă. O atenție deosebită trebuie acordată asigurării calității suprafeței. De asemenea, epruveta trebuie confecționată astfel încât să nu existe variații bruște ale secțiunii. Toate epruvetele solicitate, care pot ajunge și la un număr de 50, trebuie executate în aceleași condiții, având strict aceeași formă și dimensiuni și aceeași calitate a suprafeței.

Mașinile de încercat la oboseală trebuie să asigure ciclul de solicitare dorit, fără ca elemente din construcția acestor mașini să se deterioreze ele însele la oboseala indusă. O atenție deosebită trebuie acordată prinderii epruvetelor în dispozitivele mașinii, astfel încât pentru toate probele fixarea în bacuri să permită diferențieri de la probă la probă. Încercările se vor efectua pe aceeași mașină și cu același coeficient de asimetrie R.

Pentru determinarea limitei la oboseală trebuie trasată curba de durabilitate  $\sigma$ -N, în care  $\sigma$  reprezintă tensiunea maximă la care se rupe epruveta iar N reprezintă numărul de cicluri de solicitare - până la rupere în cazul solicitărilor la tensiuni mai mari decât limita la oboseală. Se cunoaște faptul că, prin solicitarea de oboseală în aceleași condiții, apare o anumită împrăștiere a rezultatelor. Ca urmare, pentru fiecare nivel al tensiunii de solicitare, în funcție și de comportarea materialului, sunt necesare un număr de 6-7 epruvete. În cadrul încercărilor de oboseală efectuate pe epruvete netede se notează valoarea tensiunii maxime și a numărului de cicluri la care a avut loc ruperea epruvetei. Ordinea de încercare este de la tensiuni mari către tensiuni mici, prima treaptă de încercare efectuându-se la  $\sigma_{\max}=0,6\sigma_r$ . Se continuă încercările până când se ajunge astfel încât cel

puțin o epruvetă să nu se mai rupă. Cu perechile de valori  $\sigma_{\max,i}-N_i$  se poate trasa o curbă ca cea din *figura 3.3* denumită și curba Wöhler.

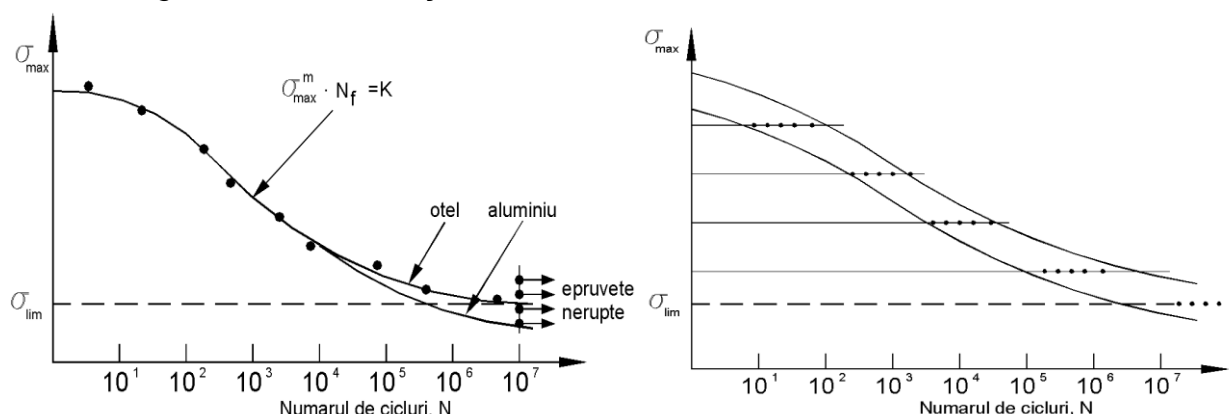


Fig. 3.3. Curba de oboseală sau curba Wöhler

Curba din *figura 3.3.a* este trasată pentru cazul în care dispersia rezultatelor obținute în urma încercărilor experimentale este mică. Din determinările experimentale s-a constatat faptul că, cel puțin în zona tensiunilor mari, dispersia rezultatelor obținute este mai mare, acestea având valori mult diferite chiar în cazul repetării experimentului strict în aceleași condiții. În cazurile în care dispersia rezultatelor încercărilor la oboseală este mare, trebuie ca la aceeași tensiune de solicitare să se încerce mai multe epruvete. În acest caz rezultatele încercării la oboseală au reprezentarea sub formă de bandă, ca în *figura 3.3b*. Pentru un număr suficient de mare de încercări, curba din *figura 3.3a* tinde asimptotic spre o anumită valoare a tensiunilor maxime, presupunându-se că mai jos de această valoare epruveta netedă nu se va mai rupe oricât de mult ar fi solicitată.

Valoarea tensiunii maxime,  $\sigma_{\max}$ , pentru care presupunem că nu se mai produce ruperea epruvetei, supusă la un număr oricât de mare de cicluri de solicitare, poartă numele de **limită teoretică la oboseală**.

Se presupune că, dacă până la  $N_0$  cicluri de solicitare epruvetele nu se rup, atunci ele nu se vor rupe oricâte cicluri de solicitare i-am aplica. În practică, pentru un anumit grad de asimetrie a ciclului R, **limita la oboseală** se definește ca fiind valoarea tensiunii maxime la care se ajunge după un număr  $N_0$  de cicluri de solicitare, în condițiile în care epruveta nu s-a rupt. În mod obișnuit în funcție de material, epruvetele se supun la un anumit număr limită de cicluri de solicitare. Numărul de cicluri de solicitare pentru care epruvetele nu se mai rup, pentru diferite materiale sunt:

- $N_0=2 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^7$  pentru oțeluri;
- $N_0=2 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$  pentru aliaje ușoare;
- $N_0=2 \cdot 10^6$  pentru lemn;
- $N_0=2 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$  pentru beton.

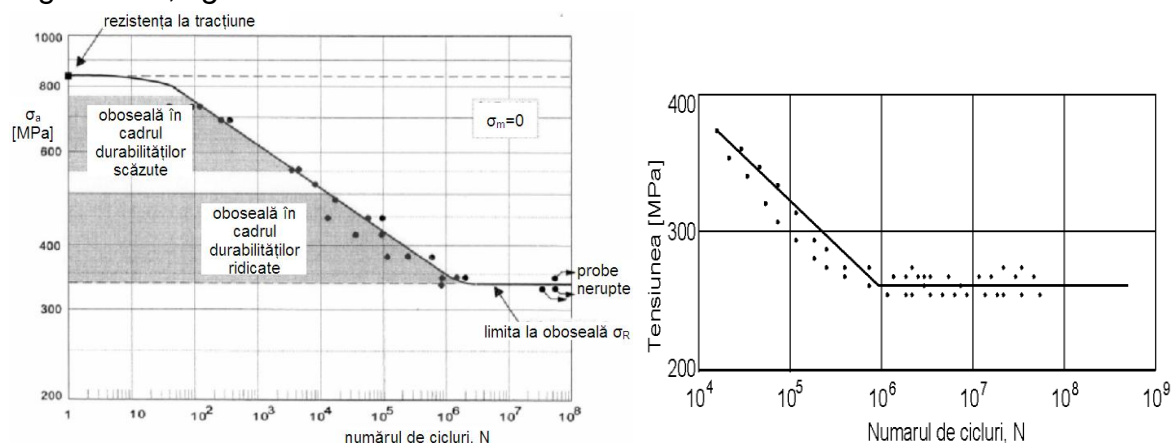
Limita la oboseală se notează cu  $\sigma_R$ , în care R reprezintă valoarea coeficientului de asimetrie, care trebuie să fie constantă pe parcursul tuturor determinărilor. Pentru solicitarea axială se adaugă la indice și litera „t” pentru tracțiune, respectiv „c” pentru compresiune. Exemple de notații:

- $\sigma_{0,t}$  – limita la oboseală după un ciclu oscilant, cu proba supusă la tracțiune;
- $\tau_0$  - limita la oboseală după un ciclu pulsant, cu proba supusă la răsucire;

- $\sigma_{-1}$  – limita la oboseală după un ciclu alternant simetric, cu proba supusă la încovoiere.

Curbele de oboseală se pot trasa și în coordonate  $\sigma_a$ -N, respectiv amplitudinea ciclului de solicitare în raport cu numărul de cicluri până la rupere.

Alte reprezentări ale curbei Wöhler se regăsesc în coordonate semilogaritmice, *figura 3.4a* sau logaritmice, *figura 3.4b*.



a) coordonate semilogaritmice; b) coordonate logaritmice

Fig. 3.4. Rezultatele încercării la oboseală pe epruvete netede

Curba în coordonate semilogaritmice ( $\log N$ ) din *figura 3.4a* prezintă particularitatea definirii a trei domenii:

- domeniul I al solicitărilor la tensiuni mari și cu un număr mic de cicluri;
- domeniul II al solicitărilor în cadrul durabilităților limitate pentru care  $10^4 < N < 10^7$  (pentru oțel);
- domeniul III al solicitărilor în cadrul durabilităților nelimitate pentru care  $N > 10^7$  (pentru oțel);

Reprezentarea curbei Wöhler în coordonate logaritmice ( $\log \sigma_{\max}$ - $\log N$ ) se prezintă sub forma a două drepte a căror intersecție se produce la valoarea limitei de oboseală pentru tensiunea maximă.

Oricare ar fi modul de reprezentare a curbelor de durabilitate la oboseală, diferitele domenii ale acestora pot fi descrise de anumite ecuații. Câteva dintre acestea sunt prezentate în cele ce urmează.

O ecuație care cuprinde atât domeniul II cât și domeniul III este cea dată de Weibull, respectiv:

$$N = \frac{m}{[\sigma_{\max} - \sigma_{-1}]^q} \quad (3.3)$$

în care  $m$  și  $q$  reprezintă constante de material.

Din relația 3.3 se constată faptul că atunci când  $\sigma_{\max} = \sigma_{-1}$  va rezulta  $N \rightarrow \infty$  ceea ce reprezintă și definiția limitei teoretice la oboseală.

În ultima vreme se proiectează multe dintre organele de mașini să funcționeze în cadrul domeniului II, al durabilității limitate. O relație care descrie foarte bine această zonă are forma:

$$\sigma_{\max} = a \cdot N^b \quad (3.4)$$

în care  $a$  și  $b$  reprezintă constante de material.

În cazul în care reprezentarea curbei de durabilitate se face în coordonate  $\log \sigma_a - \log N$ , avem o relație asemănătoare, respectiv:

$$\sigma_a \cdot N = \text{const.} \quad (3.5)$$

ce reprezintă relația lui Basquin.

Atunci când reprezentarea curbei de durabilitate se face în coordonate semilogartmice ( $\sigma_{\max} - \log N$ ), relația care descrie această curbă este de forma:

$$\sigma_{\max} = c + d \cdot \log N \quad (3.6)$$

în care  $c$  și  $d$  reprezintă constante de material.

Din încercările experimentale a reieșit faptul că limita la oboseală în cazul solicitării axiale este mai mică decât limita la oboseală determinată la solicitarea de încovoiere. Între acestea, pentru majoritatea cazurilor, se poate scrie următoarea relație:

$$\sigma_{-1t} = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{-1} \quad (3.7)$$

Această diferențiere în comportarea la solicitarea axială față de încovoiere se poate explica astfel: la solicitarea axială avem o stare omogenă de tensiuni, în oricare secțiune a probei o aceeași valoare (maximă) a tensiunii, și, ca urmare, un mai mare volum de material este supus la tensiunile maxime, spre deosebire de solicitare de încovoiere la care tensiunea maximă se regăsește doar la nivelul suprafeței. Se poate presupune că, dacă există defecte sau imperfecțiuni ale rețelei cristaline în interiorul piesei, de la care să se dezvolte în continuare o macrofisură prin oboseală, acele defecte sau imperfecțiuni vor fi solicitate la tensiuni mult mai mari în cazul solicitării axiale decât în cazul solicitării de încovoiere, pentru aceeași tensiune maximă de solicitare.

Există și relații empirice care stabilesc o corelație între limita de curgere și rezistența la rupere prin tracțiune ( $\sigma_u$  sau  $R_m$ ). Aceste relații trebuie utilizate cu o anumită precauție, având în vedere faptul că anumite clase de materiale au comportamente diferite la oboseală. De exemplu, pentru oțelurile cu rezistența la rupere prin tracțiune cuprinsă între 1200 MPa și 1800 MPa, se poate utiliza relația:

$$\sigma_{-1} \approx 400 + \frac{1}{6} \sigma_u \text{ [MPa]} \quad (3.8)$$

Pentru metale neferoase se prezintă un interval de variație:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,50) \sigma_u$$

În *figura 3.4a* asimptota orizontală inferioară reprezintă limita la oboseală. Pe lângă aceasta, mai apare și o asimptotă orizontală la partea superioară a curbei de durabilitate. În cazul în care  $\sigma_m = \sigma_u$ , unde  $\sigma_u$  reprezintă rezistența (ultimă) la tracțiune a materialului (fiind notată și cu  $R_m$ ), epruveta va ceda în primul ciclu de încercare. În acest caz vom avea  $\sigma_a = 0$ , respectiv  $\sigma_m = \sigma_u$  sau  $\sigma_m > 0$  dacă  $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_u$ . În orice caz, dacă  $\sigma_a$  are o valoare puțin mai mică decât  $\sigma_u$ , proba nu va ceda în primul ciclu de solicitare. De obicei, proba poate rezista și la un număr de 100 de cicluri de solicitare și chiar mai mult ca rezultat al ecruisării sau întăririi prin deformare plastică, *figura 3.5*. În primul ciclu de la 0 la A, apare o deformare plastică semnificativă datorită faptului că tensiunea maximă din epruvetă depășește limita de curgere a materialului. Următoarele două subsecvențe, respectiv,



descărcarea până în punctul B și încărcarea până în punctul A, conduc la o amplitudine a deformației plastice mult mai mică datorită tenacității la deformare a materialului, ceea ce se poate observa și din bucla de histerezis din figura 3.5. Bucla de histerezis poate susține un număr substanțial de cicluri de solicitare înainte ca epruveta să se rupă. În consecință, în cadrul curbei de durabilitate apare respectiva asimptotă orizontală superioară.

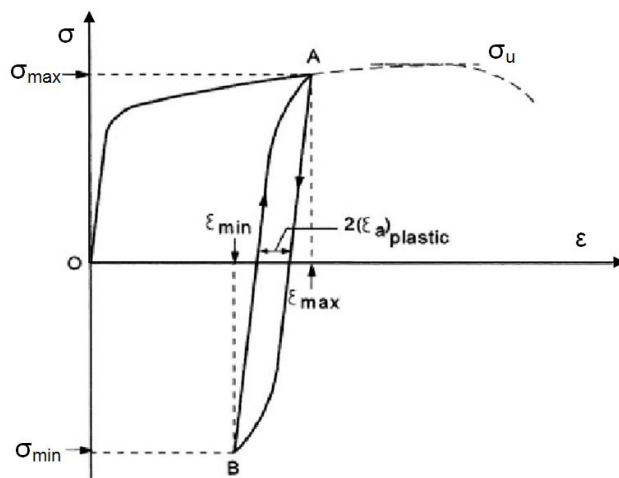


Fig. 3.5. Bucla tensiune-deformație în cadrul ciclului de solicitare cu amplitudine ridicată peste limita de curgere a materialului

Oboseala la amplitudini ridicate presupune solicitarea la un număr relativ redus de cicluri, de obicei până în  $10^4$  cicluri, și face parte din domeniul I, figura 3.4a. Granița dintre domeniul I și domeniul II nu este foarte bine definită. O diferențiere mai bună o constituie faptul că oboseala efectuată la nivele mari ale tensiunii este asociată cu deformații plastice pentru fiecare ciclu de solicitare pe când oboseala condusă la nivele mici ale tensiunii produce deformații elastice în volumul întregii epruvete. Este evident faptul că atenția este îndreptată în special domeniul II al curbei spre de durabilitate, pentru funcționarea la un număr mare de cicluri de solicitare.

Nu toate materialele prezintă o limită de oboseală determinată în mod foarte clar. Multe materiale neferoase cum ar fi aliajele din aluminiu, magneziu, cupru, etc. prezintă o curbă de durabilitate la oboseală cu variație descendentă, figura 3.6.

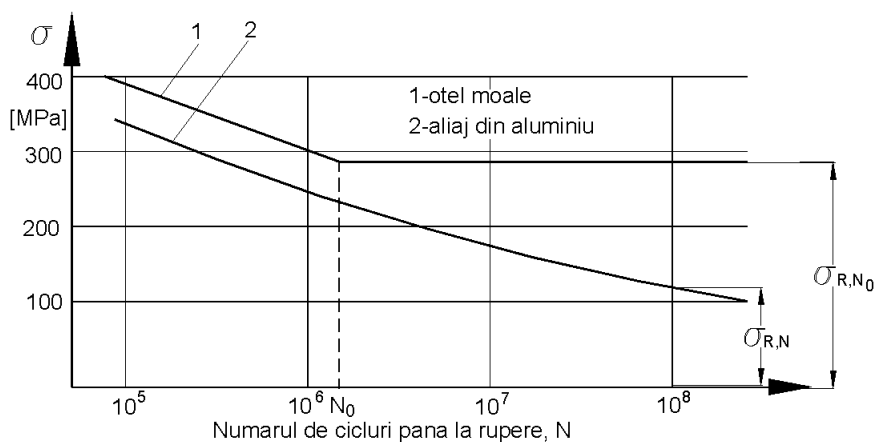


Fig. 3.6. Curbe de oboseală pentru un oțel moale și un aliaj din aluminiu

Pentru astfel de aliaje nu se mai poate defini o limită la oboseală ci o rezistență la oboseala convențională,  $\sigma_{R,N}$ , ca fiind valoarea tensiunii maxime corespunzătoare unei anumite durabilități  $N$ , pentru un ciclu cu gradul de asimetrie  $R$ . Limita la oboseală reprezintă rezistența la oboseală  $\sigma_{R,N_0}$ , pentru materialele ce prezintă asimptotă orizontală inferioară la curba de durabilitate. Din acest motiv se vorbește în general despre rezistența la oboseală ce cuprinde și termenul de limită la oboseală pentru un număr de cicluri dincolo de  $N_0$ .

### 3.5. Diagramele ciclurilor limită la oboseală

Dacă se conduce o solicitare la oboseală pentru un material utilizându-se diferiți coeficienți de asimetrie, pentru limita la oboseală vor rezulta valori diferite, figura 3.7a. Reprezentările grafice ale variației limitei la oboseală în raport cu coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare poartă numele de *diagrame ale ciclurilor limită*. Prin ciclu limită definim un ciclu cu un anumit grad de asimetrie a cărui tensiune maximă este egală cu limita la oboseală corespunzătoare gradului de asimetrie respectiv.

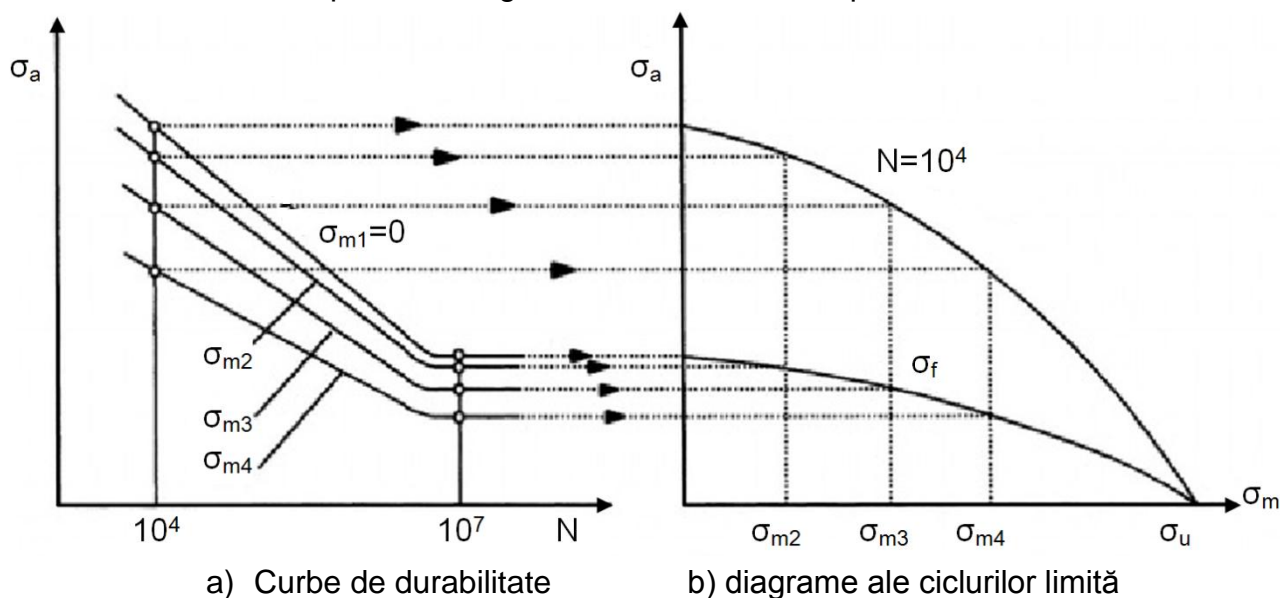


Fig. 3.7. Curbe de durabilitate pentru diferiți coeficienți de asimetrie

Din figura 3.7 se poate constata că limita la oboseală crește pe măsură ce tensiunea medie crește, ca urmare pe măsură ce gradul de asimetrie tinde către valori pozitive. De aici se poate vedea influența coeficientului de asimetrie asupra rezultatelor la încercările de oboseală. Din punct de vedere experimental este destul de dificil de a trasa curbele de durabilitate ale unui material pentru diferiți coeficienți de asimetrie a ciclului de solicitare. În aceste condiții, s-a impus trasarea unor diagrame simplificate cu ajutorul cărora să se poată determina limita la oboseală pentru diferiți coeficienți de asimetrie, chiar dacă nu s-a trasat o curbă de durabilitate pentru acei coeficienți.

Se cunosc mai multe tipuri de diagrame după mărimile trecute în axele de coordonate.

#### 3.5.1. Diagrama ciclurilor limită de tip Haigh

Această diagramă este o reprezentare în coordonate  $\sigma_a$ - $\sigma_m$ , respectiv amplitudinea ciclului de solicitare în raport cu tensiunea medie, iar un ciclu de solicitare se reprezintă printr-un punct.

Figura 3.8 prezintă o diagramă de tip Haigh pentru **solicitări cu  $\sigma_m > 0$** .

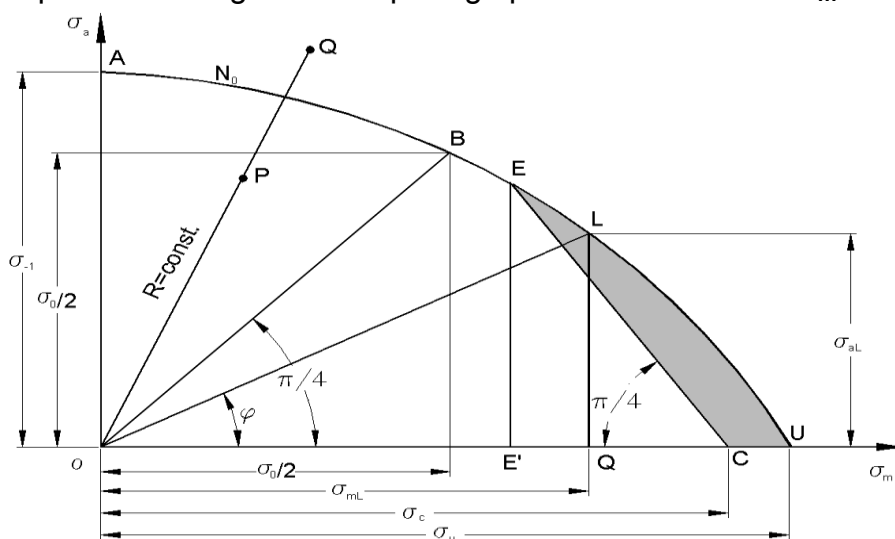


Fig. 3.8. Diagrama Haigh pentru solicitări de tracțiune

Curba ABC reprezintă curba ciclurilor limită, valorile tensiunilor de pe această curbă conținând indicele „L”. Toate punctele care se regăsesc în exteriorul curbei ciclurilor limită reprezintă tot atâtea posibilități ca epruvetele să se rupă, solicitate fiind cu un număr de cicluri mai mare ca  $N_0$ . Suma coordonatelor unui punct L aflat pe curba ciclurilor limită reprezintă chiar limita la oboseală. Ca urmare vom avea:

$$\sigma_{max_L} = \overline{OQ} + \overline{QL} = \sigma_{m_L} + \sigma_{a_L} \quad (3.9)$$

În acest caz, coeficientul de asimetrie va avea valoarea:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{m_L} - \sigma_{a_L}}{\sigma_{m_L} + \sigma_{a_L}} \quad (3.10)$$

Dacă se cunoaște valoarea coeficientului de asimetrie R, punctul L se poate găsi calculând panta dreptei OL cu relația:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_{a_L}}{\sigma_{m_L}} = \frac{\sigma_{max_L} - \sigma_{min_L}}{\sigma_{max_L} + \sigma_{min_L}} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (3.11)$$

Pe curba ciclurilor limită din figura 3.7 se pot determina trei puncte particulare, respectiv:

- Punctul A ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu alternant simetric;
- Punctul B ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant;
- Punctul C determinat pe baza unei încercări statice de tracțiune, în care  $\sigma_u$  reprezintă rezistența la tracțiune (ultimă), a materialului, notată și cu  $R_m$ .

Pentru materialele ductile la care tensiunea de curgere  $\sigma_c$  este tensiune limită, porțiune EUCE din diagramă nu se mai ia în considerare. Dreapta CE reprezintă, în acest caz, curba limită pentru care  $\sigma_{max} = \sigma_c$ . De exemplu pentru punctul E avem:

$$\sigma_{max_L} = \overline{OE'} + \overline{EE'} = \overline{OE'} + \overline{E'C} = \sigma_c \quad (3.12)$$

întrucât  $\overline{EE'} = \overline{E'C'}$ .

În continuare se va examina o diagramă de tip Haigh completă, pentru care se consideră atât solicitările de tracțiune cât și solicitările de compresiune, figura 3.9.

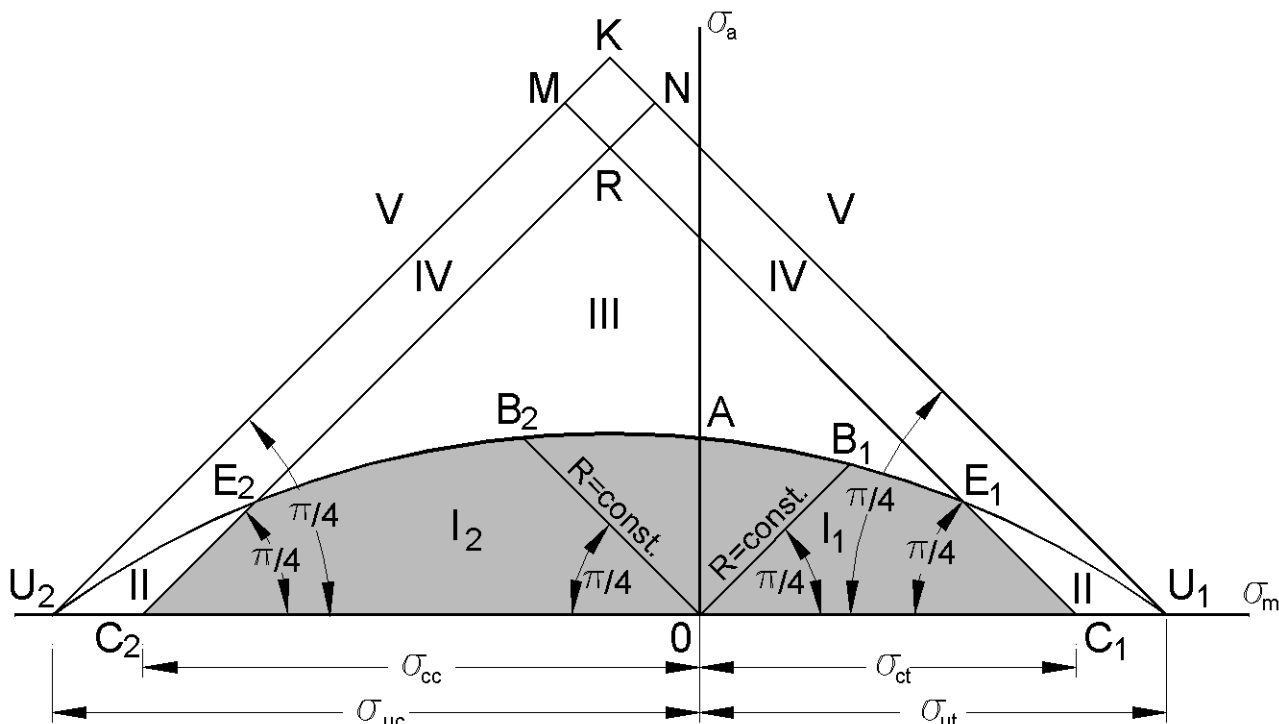


Fig. 3.9. Diagrama Haigh completă

În cadrul acestei diagrame se consideră că pot fi determinate și, ca urmare, cunoscute, următoarele mărimi:

- Limita de curgere la tracțiune,  $\sigma_{ct}$ ;
- Limita de curgere la compresiune,  $\sigma_{cc}$ ;
- Rezistența la rupere prin tracțiune,  $\sigma_{ut}$ ;
- Rezistența la rupere prin compresiune,  $\sigma_{uc}$ ;

cu  $\sigma_{ct} < \sigma_{cc}$  și  $\sigma_{ut} < \sigma_{uc}$ . Construcția diagramei se face pornind de la stabilirea punctelor  $U_1$ ,  $C_1$ ,  $U_2$  și  $C_2$ , corespunzătoare valorilor pentru mărimile  $\sigma_{ut}$ ,  $\sigma_{ct}$ ,  $\sigma_{uc}$  și  $\sigma_{cc}$ . Conform figurii 3.8, din aceste puncte se trasează drepte la  $45^\circ$ , care se vor intersecta în punctele K și R. Se constată faptul că, oricare ar fi un punct de pe dreptele  $U_1K$  și  $U_2K$ , tensiunea maximă corespunzătoare acestor puncte este dată de relația:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a = \sigma_{ut} \text{ (sau } \sigma_{uc}) \quad (3.13)$$

Ca urmare, pentru realizarea acestor puncte este necesar să efectueze un singur ciclu de solicitare după care epruveta se va rupe. Tensiunea care se atinge în punctele de pe dreptele  $C_1R$  și  $C_2R$  este cea corespunzătoare limitei de curgere. Dacă după un anumit număr de cicluri de funcționare se ajunge la dreptele  $C_1R$  și  $C_2R$ , dincolo de acestea solicitarea va avea loc cu deformații plastice semnificative, chiar de la următorul ciclu de solicitare. În zona mărginită de punctele  $U_1C_1RN$  deformațiile plastice se vor realiza sub acțiunea solicitării de tracțiune, în zona mărginită de punctele  $U_2C_2RM$  deformațiile plastice vor apărea sub acțiunea solicitării de compresiune în timp ce în zona  $RNKM$  deformațiile plastice apar și la întindere și la compresiune.

Se trasează apoi diagrama ciclurilor limită care trebuie să treacă printr-o serie de puncte obligatorii:

- Punctul  $U_1$  corespunzător rezistenței de rupere la solicitarea de tracțiune,  $\sigma_{ut}$  sau  $\sigma_{+1t}$ ;
- Punctul  $B_1$  ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant de tracțiune,  $\sigma_{0t}$ ;
- Punctul  $A$  ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu alternant simetric,  $\sigma_{-1}$ ;
- Punctul  $B_2$  ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant de compresiune,  $\sigma_{0c}$ ;
- Punctul  $U_2$  corespunzător rezistenței de rupere la solicitarea de compresiune,  $\sigma_{+1c}$ .

Coeficientul de asimetrie  $R$  este constant pentru oricare dreaptă dusă din punctul  $O$  pe curba ciclurilor limită. Pentru determinarea coeficientului de asimetrie pentru un punct oarecare de pe curba ciclurilor limită se va utiliza relația 3.10, corespunzătoare acelui punct. Cele patru drepte trasate la  $45^\circ$ , precum și curba ciclurilor limită împart diagrama Haigh în cinci zone:

- I- ( $I_1+I_2$ ) Zona tensiunilor în care solicitarea prin oboseală produce doar deformații elastice. Această zonă este cea în care funcționează majoritatea organelor de mașini;
- II- În interiorul acestei zone se produc deformații plastice încă de la următorul ciclu de solicitare de la depășirea zonei I. Dacă nivelul tensiunilor este astfel încât din această zonă ne apropiem de curba ciclurilor limită, ruperea va deveni inevitabilă;
- III- Înainte și după ajungerea în această zonă solicitarea a produs în cea mai mare parte doar deformații elastice. În această zonă se produce ruperea după un număr relativ mare de cicluri de solicitare. Deformații plastice dacă apar, sunt limitate în zona din imediata vecinătate a fisurii care se propagă catastrofal până la rupere;
- IV- În această zonă apar deformații plastice semnificative, ruperea producându-se datorită propagării unei fisuri pornind de la o microfisură dezvoltată ca urmare a blocării pe un obstacol a dislocațiilor provocate de deformația plastică respectivă;
- V- Este zona ciclurilor care nu se pot realiza în mod practic, fiind dincolo de rezistența la rupere a materialului.

Zona care a fost studiată cel mai mult și care prezintă interesul cel mai mare este zona  $I_1$ , respectiv zona în care tensiunile medii sunt pozitive. Acest lucru se datorează și faptului că, majoritatea materialelor se comportă mai slab la tracțiune decât la compresiune. Ca urmare, odată stabilită valoarea limitei la oboseală pentru tracțiune aceasta este acoperitoare din punct de vedere al proiectării la oboseală, și pentru zona de compresiune.

### 3.5.2. Schematizări ale diagramei Haigh

Chiar și pentru zona  $I_1$  diagrama Haigh este destul de dificil de trasat, având în vedere numărul mare de determinări experimentale ce trebuie efectuate asupra aceluiași material. În aceste condiții, s-au propus o serie de schematizări ale diagramei Haigh, astfel încât acestea să fie acoperitoare din punct de vedere al proiectării la oboseală și să

utilizeze cât mai puține și elocvente determinări experimentale. În figura 3.10 sunt prezentate câteva dintre schematizările acestei diagrame, care pot fi trasate fără prea mare dificultate.

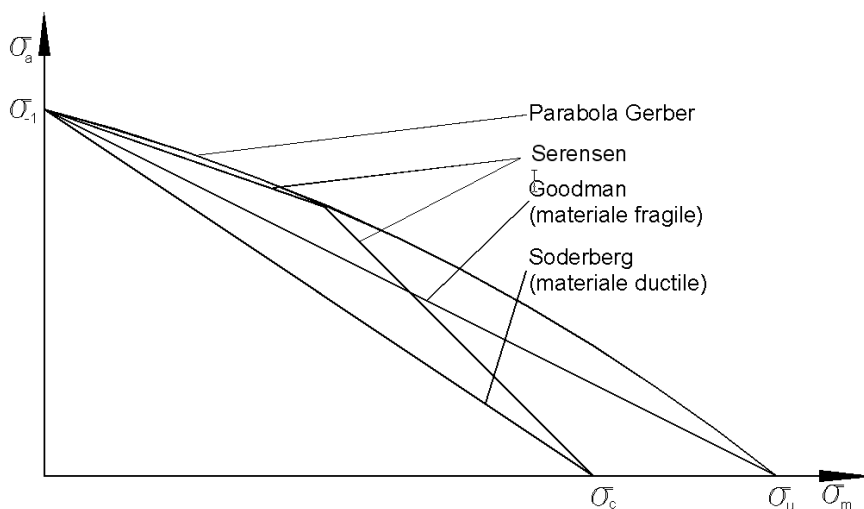


Fig. 3.10. Schematizări ale diagramei Haigh

Așa cum rezultă din *figura 3.10*, schematizările utilizate țin seama de și de comportarea materialului la solicitarea de oboseală. Observația care trebuie făcută aici este aceea că, cele trei valori ale tensiunilor indicate în *figura 3.10*, respectiv,  $\sigma_u$ ,  $\sigma_c$  și  $\sigma_{-1}$ , diferă de la un material la altul și că, pentru diferite materiale (fragile, ductile, etc.) dreptele de schematizare ar avea atât punctele de pe abscisă și ordonată cât și pantele, diferite. Pentru materialele fragile (ceramice, fontă, oțeluri super-aliate) la care ruperea se produce relativ repede după zona de elasticitate, se poate utiliza schematizarea Goodman, pentru care dreapta limită are ecuația:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.14)$$

Pentru materialele care suferă deformații plastice însemnate înainte de rupere, starea limită fiind dată de limita de curgere, se poate utiliza schematizarea Soderberg a cărei dreaptă are ecuația:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c} = 1 \quad (3.15)$$

Schematizarea Serensen este prezentată în detaliu în *figura 3.11*, și se trasează astfel:

- Se consideră punctul A determinat de valoarea  $\sigma_{-1}$  pe ordonată ( $\sigma_a$ ) și punctul C determinat de valoarea  $\sigma_c$  pe abscisă ( $\sigma_m$ );
- Din punctul C se trasează o dreaptă la  $45^\circ$  (ca în *figura 3.11*);
- Se figurează punctul D de coordonate  $(\sigma_0/2, \sigma_0/2)$ ;
- Se duce o dreaptă prin punctele A și D care va intersecta dreapta dusă prin A în punctul G.

În aceste condiții, schematizarea Soderberg este compusă din dreptele AG și GC ale căror ecuații sunt date de:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\frac{\sigma_0 \sigma_{-1}}{2\sigma_{-1} - \sigma_0}} = 1 \quad (3.16)$$

și

$$\sigma_a + \sigma_m = \sigma_c$$

Având în vedere faptul că punctele D și G sunt apropiate, porțiunea DGC poate fi aproximată prin dreapta DG care are ecuația:

$$\frac{\sigma_a}{\frac{\sigma_0 \sigma_c}{2\sigma_c - \sigma_0}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}} = 1 \quad \text{?????} \quad (3.18)$$

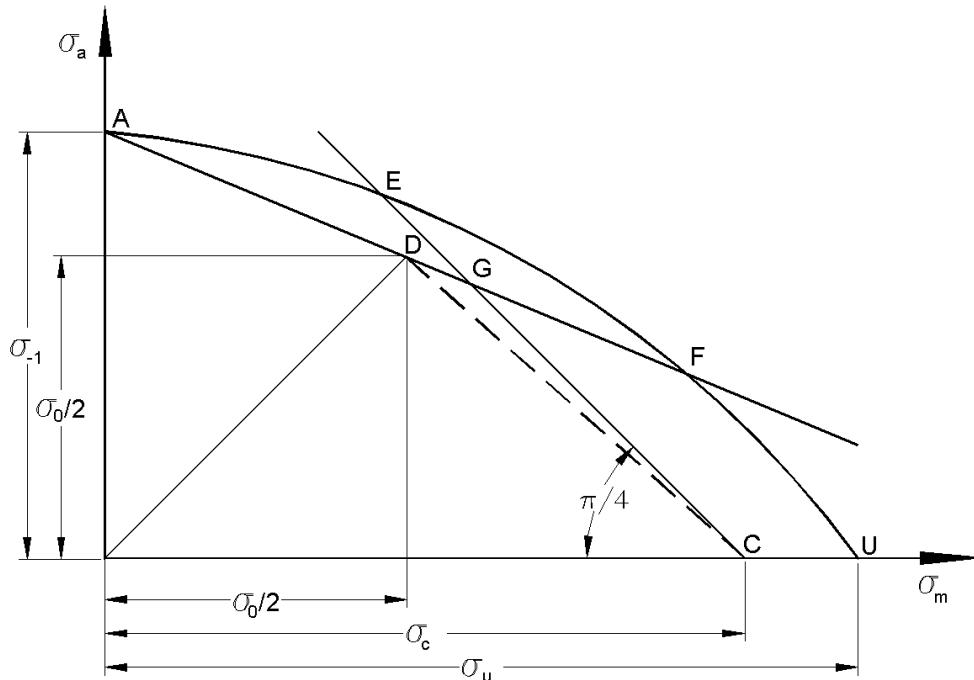


Fig. 3.11. Schematizarea Serensen

Diagrama Haigh poate fi schematizată și sub formă neliniară de tipul:

- Schematizarea Gerber a cărei ecuație este:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.19)$$

- Schematizarea de tip elipsă cu ecuația:

$$\left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.20)$$

- Schematizarea Chester și Dodge cu ecuația:

$$\left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \right)^q + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.21)$$

unde q este o constantă de material.

- Schematizarea Bagci a cărei ecuație este dată de:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^4 = 1 \quad (3.22)$$

### 3.6. Efectele factorilor de solicitare

#### 3.6.1. *Influența tensiunii medii*

Majoritatea rezultatelor experimentale existente în literatura de specialitate au fost determinate pentru cicluri simetrice ( $R=-1$ ). Pentru o tensiune medie  $\sigma_m$  diferită de zero se produce o translație a curbei de durabilitate pe direcția axei de solicitare.

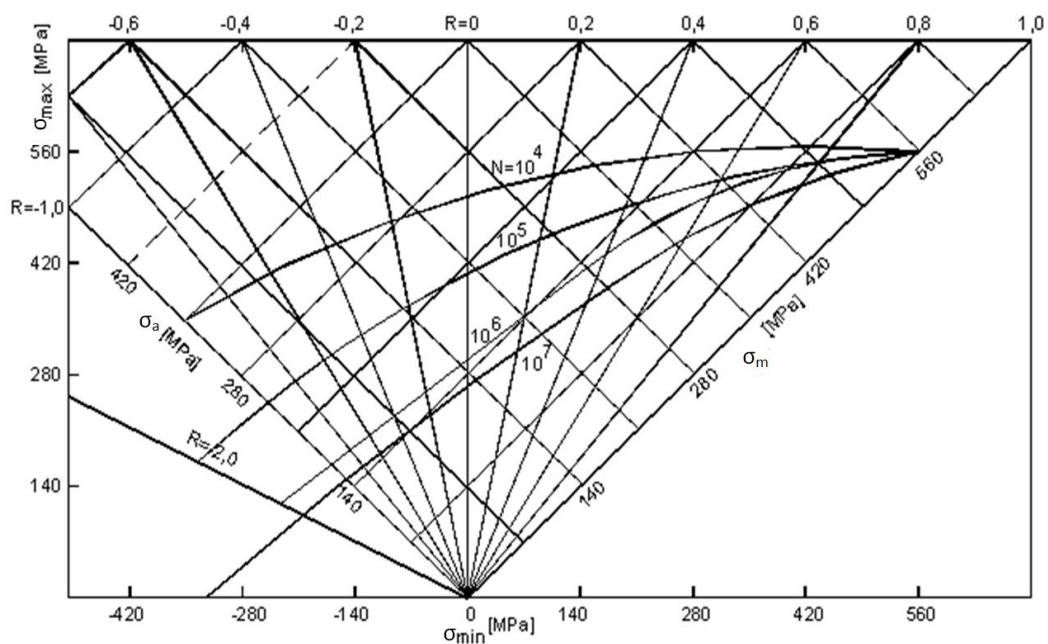
Observație: toate valorile tensiunilor din acest subcapitol sunt tensiuni limită.

De cele mai multe ori, efectul tensiunii medii produs asupra comportării la oboseală se pune în evidență trasând diagrame de tip Wöhler în coordonate  $\sigma_a-N$ , ( $\sigma_a$  fiind amplitudinea solicitării) pentru diferite valori ale solicitării medii  $\sigma_m$ , luate ca parametru. Din studiul acestor diagrame rezultă faptul că, tensiunile medii pozitive micșorează durata de viață a probelor în timp ce tensiunile medii negative o prelungesc.

În mod frecvent, în activitatea de proiectare se utilizează diagrame de tip Haigh, care stabilesc corelația dintre parametrii  $\sigma_a$  și  $\sigma_m$  ai solicitării pentru care se obține o durată de viață constantă. Acest tip de diagrame se pot obține pe baza diagramelor de durabilitate  $\sigma_a-N_f$ , ( $N_f$  fiind numărul de cicluri până la rupere) determinate experimental pentru diferite valori  $\sigma_m$  luate ca parametru.

Un alt procedeu utilizat pentru punerea în evidență a efectului tensiunilor medii este descris în cele ce urmează. Se aleg diferite valori ale coeficientului de asimetrie  $R$ . Pentru fiecare dintre acestea se determină rezistența la oboseală la diferite valori date ale duratei de viață. Pe baza rezultatelor astfel obținute se trasează o familie de curbe în coordonate  $\sigma_a-\sigma_m$  sau  $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$  considerând durata de viață ca parametru. Din examinarea acestor curbe se poate concluziona că,  $R$  are același efect asupra curbelor  $\sigma-N$  ca și cel dat de tensiunea medie. Ca urmare, la o valoare constantă pentru coeficientul de asimetrie  $R$  al ciclului, curbele  $\sigma-N$  furnizează aceleași informații ca și cele obținute pentru  $\sigma_m=\text{constant}$ . Diagramele trasate pentru o durată de viață constantă pot fi prezentate fie în coordonate  $\sigma_a-\sigma_m$  fie în coordonate  $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ . Cele două tipuri de diagrame sunt identice, dacă se rotesc cu  $45^\circ$ , obținându-se diagrama din *figura 3.11*.

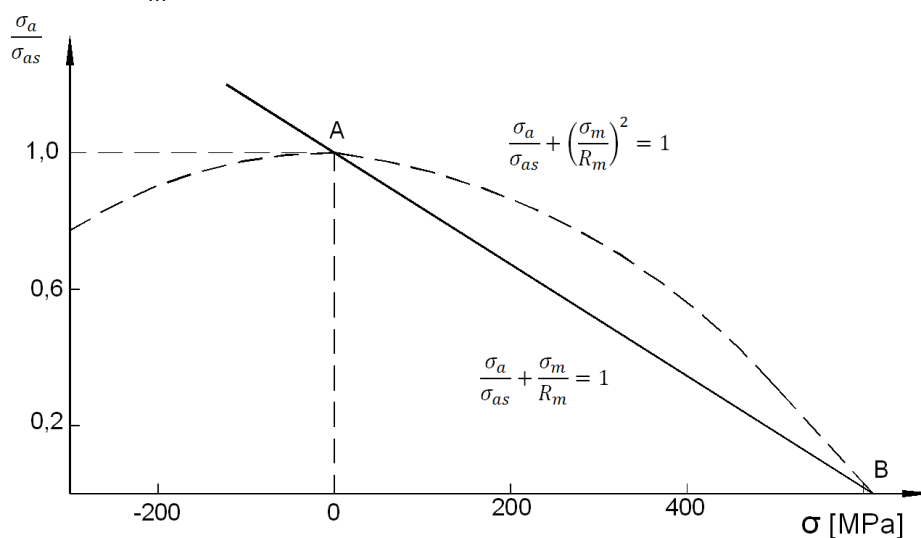




**Fig. 3.11.** Diagramele în coordonate  $\sigma_a$ - $\sigma_m$  și  $\sigma_{\max}$ - $\sigma_{\min}$

Din aceste diagrame se poate obține prin interpolare durata de viață pornind fie de la perechea de valori  $(\sigma_a, \sigma_m)$  fie de la perechea de valori  $(\sigma_{\max}, \sigma_{\min})$ . Se observă că, în cele două sisteme de coordonate condiția  $R=\text{const.}$  reprezintă o dreaptă ce trece prin origine. Această dreaptă reprezintă locul geometric al ciclurilor asemenea dar având durată de viață diferită.

O diagramă reprezentativă pentru epruvetele fără concentrator este diagrama de tip Haigh din figura 3.12. Ea se obține comparând două cicluri de oboseală ce conduc la aceeași durată de viață, unul având un coeficient de asimetrie  $R$ , celălalt fiind simetric ( $R=-1$ ). Amplitudinile tensiunilor pentru cele două cicluri au fost notate cu  $\sigma_a$  (ciclul cu coeficient de asimetrie  $R$ ) respectiv  $\sigma_{as}$  (ciclul simetric), iar solicitarea medie (tensiunea medie) a ciclului nesimetric cu  $\sigma_m$ .



**Fig. 3.12.** Diagrama Haigh (în abscisă  $\sigma_m$ )

Indiferent de forma funcției  $\sigma_a/\sigma_{as}=f(\sigma_m)$ , graficul acesteia trece prin două puncte:  $A(\sigma_m=0, \sigma_a/\sigma_{as}=1)$  ce corespunde ciclului simetric și  $B(\sigma_m=\sigma_u, \sigma_a/\sigma_{as}=0)$  ce corespunde ruperii statice. Graficul funcției amintite poate fi schematizat prin linia dreaptă AB de ecuație:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.23)$$

Această schematizare pare justificată pentru materiale ductile dar conduce la estimări eronate ale duratei de viață datorită gradului de supra-securitate pe care îl introduce. Pentru ciclurile ce au tensiunea medie negativă, linia AB poate fi continuată dar, de cele mai multe ori, se consideră că tensiunile medii negative nu aduc beneficii în calculul la oboseală și, ca atare, linia AB se continuă de regulă cu o orizontală de ordonată 1.

Au fost propuse și ecuații mai complicate decât dependențele liniare date de *ecuația* (3.23). Una dintre acestea este ecuația parabolică de tipul:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.24)$$

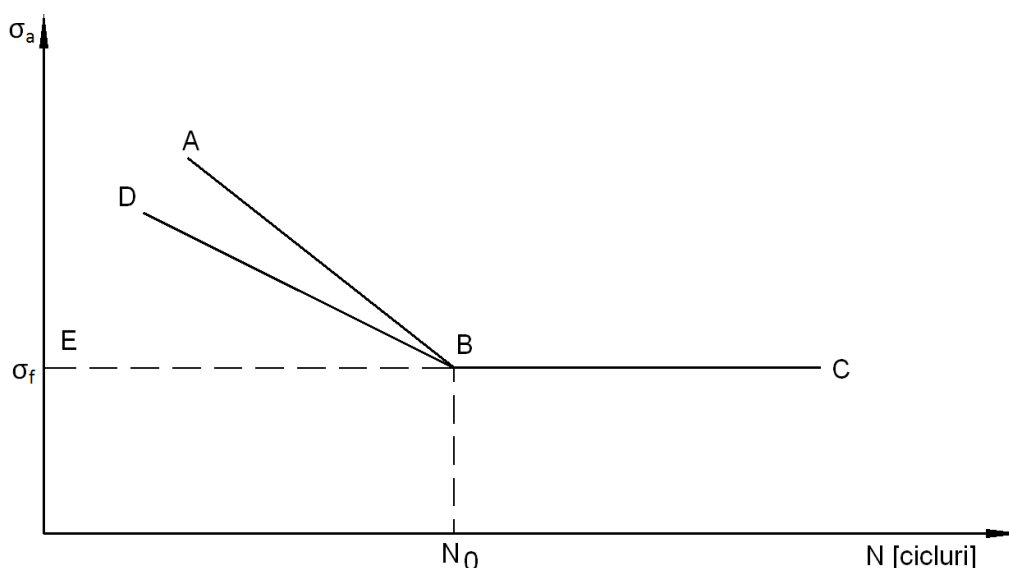
Reprezentarea liniară a diagramei ciclurilor limită a fost propusă de Goodman iar cea parabolică de Gerber.

Ecuațiile cu ajutorul cărora sunt descrise diagramele de forma  $\sigma_a=f(\sigma_m)$  sunt folosite pentru estimarea nivelului valorilor  $\sigma_a$  pentru toate curbele de durabilitate  $\sigma$ -N deci și pentru cele care corespund unor valori ale tensiunii medii pentru care nu există date experimentale. De exemplu, dacă pentru o componentă a unei structuri este necesară determinarea duratei de viață ținând seama de tensiunea medie, și nu se cunoaște decât curba de durabilitate  $\sigma$ -N determinată pentru ciclul simetric, atunci se rezolvă *ecuația* (3.23) în raport cu  $\sigma_{as}$  și apoi se determină durata de viață din diagrama existentă. În acest fel, orice pereche de valori  $(\sigma_a, \sigma_m)$  conduce la aceeași durată de viață ca și  $\sigma_{as}$  corespunzătoare acestora, determinată de ecuația respectivă. Efectul suprasolicitărilor de scurtă durată.

Uneori, în timpul funcționării, în piese apar solicitări variabile de scurtă durată având amplitudinea tensiunii mai mare decât limita la oboseală a materialului. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală a fost studiat experimental astfel: pentru o perioadă scurtă s-a încărcat o epruvetă cu o tensiune mai mare decât limita la oboseală. După descărcare epruveta a fost supusă la o solicitare ciclică având amplitudinea tensiunii egală cu limita la oboseală și s-a determinat numărul de cicluri  $N_0'$  la care aceasta s-a rupt.

Suprasolicitările pentru care rezultă  $N_0' \geq N_0$  în care  $N_0$  este durabilitatea neconvențională se numesc nepericuloase; acestea sunt prezentate grafic prin dreapta DB din *figura 3.13* în care linia frântă ABC reprezintă schematizarea curbei de durabilitate. Suprasolicitările pentru care rezultă  $N_0' < N_0$  se numesc periculoase și sunt reprezentate prin punctele cuprinse între dreptele DB și AB. Punctele situate între dreptele DB și EB

corespund unor suprasolicitări favorabile, deoarece, aplicate pieselor conduc la creșterea limitei la oboseală.



**Fig. 3.13. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală**

Un efect similar este produs de fenomenul de antrenare. S-a observat că, creșterea progresivă în trepte infime a amplitudinii solicitării de la valori inferioare limitei de oboseală la valori mult superioare acesteia poate conduce la creșterea durabilității. Această operație necesită parcurgerea unui număr mare de cicluri de solicitare controlate cu precizie, de aceea metoda este greu de aplicat în mod practic. Ea servește însă ca bază teoretică pentru procedeele tehnologice de detensionare prin vibrație a structurilor realizate prin sudare.

## Cuprins

Capitolul 3. Caracteristicile materialelor în termenii limitei la oboseală .....	33
3.1. Caracteristicile ciclului periodic cu variație continuă .....	33
3.2. Clasificarea ciclurilor de solicitare la oboseală .....	34
3.3. Limita la oboseală .....	36
3.4. Determinarea limitei la oboseală prin trasarea curbei Wöhler .....	37
3.5. Diagramele ciclurilor limită la oboseală .....	42
3.5.1. Diagrama ciclurilor limită de tip Haigh .....	42
3.5.2. Schematizări ale diagramei Haigh.....	45
3.6. Efectele factorilor de solicitare .....	48

3.6.1.	Influența tensiunii medii.....	48
3.7.	Efectul dimensiunii pieselor asupra limitei la oboseală.....	<b>Eroare! Marcaj în document nedefinit.</b>
3.8.	Influența calității suprafeței asupra limitei la oboseală.....	<b>Eroare! Marcaj în document nedefinit.</b>