

## Capitolul 4.

### Factori care influențează rezistența la oboseală

Rezistența la oboseală este influențată de un număr mare de factori. Aceștia pot fi grupați în câteva categorii principale:

- Factori constructivi care țin de forma și dimensiunile pieselor;
- Factori tehnologici în care intră structura materialului, tehnologia de fabricație, gradul de finisare a suprafețelor, tratamentele termice aplicate pieselor, etc.;
- Factori ce țin de condițiile de exploatare: tipul solicitării, condițiile de mediu, temperatura de lucru, condiții meteorologice extreme, etc.

#### 4.1. Factorul de concentrare a tensiunilor la solicitări statice

În acest subcapitol se vor lua în considerare concentratorii de tensiune și factorul ce ține seama de dimensiunea pieselor.

Calculul de rezistență ale unei structuri sunt bazate, în primul rând pe teoria elasticității. În cazul în care se depășește limita de curgere  $\sigma_c$ , apare deformarea plastică, și, ca urmare, trebuie utilizate teorii mai complexe ce trebuie să țină seama de apariția plasticității. Oboseala, ca și acțiunea factorilor de mediu cum ar fi coroziunea și tensiunea ce apare în jurul concentratorilor determinați de aceasta, sunt fenomene care apar la niveluri scăzute ale tensiunii, care, pentru solicitarea statică, reprezintă zona domeniului elastic. Comportamentul macroscopic, elastic al materialului izotrop este caracterizat de trei constante elastice: modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young (E), modulul de elasticitate transversal sau de forfecare (G) și coeficientul lui Poisson ( $\nu$ ). Relația bine-cunoscută între aceste constante este:  $E = 2G(1 + \nu)$ .

Într-o structură, abaterile geometrice de la forma netedă a pieselor componente ca și trecerile cu variații de geometrie de la o componentă la alta nu pot fi evitate. Toate aceste abateri geometrice poartă numele de concentratori de tensiune. Acești concentratori cauzează o distribuție neomogenă a stării de tensiuni, *figura 4.1*, cu valoarea mai mare a tensiunii la trecerea de la zona fără concentrator la zona cu concentrator. Coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , este definit ca raportul dintre tensiunea de la baza concentratorului și tensiunea nominală care ar fi fost prezentă în același punct dacă nu ar fi fost prezent concentratorul de tensiune:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nominal}}} \quad (4.1)$$

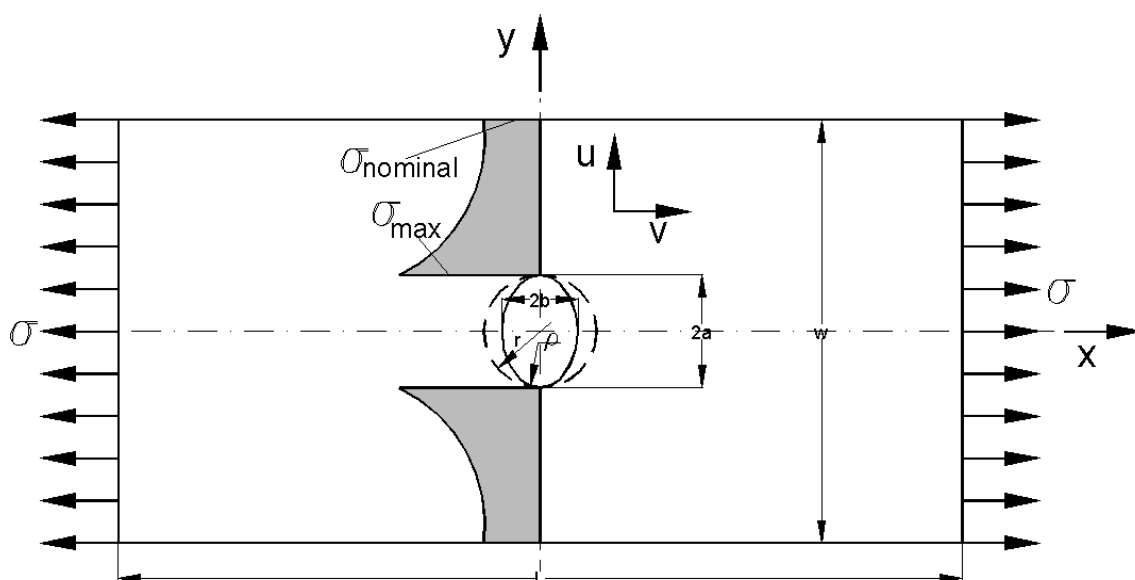


Fig. 4.1. Placă cu concentrator eliptic (circular) străpuns, solicitată la tracțiune monoaxială

Pentru tensiunea de la trecerea dintre zona cu concentrator și zona fără concentrator, tensiunea maximă este dată de relația:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \sigma \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (4.2)$$

în care  $\sigma$  reprezintă tensiunea într-o secțiune similară cu cea în care există concentratorul dar mai depărtată de acesta ( $\sigma$  poate fi egală și cu  $\sigma_{\text{nominal}}$ ),  $a$  și  $b$  sunt dimensiunile semiaxelor elipselor iar  $\rho$  reprezintă raza la vârful elipsei,  $\rho = \frac{b^2}{a}$ . Dacă  $\sigma = \sigma_{\text{nominal}}$ , din relația 4.2 se deduce faptul că valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor, pentru un concentrator eliptic, este dată de relația:

$$K_t = \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (4.3)$$

Dacă semiaxele elipsei devin egale,  $a=b=r$ , și ca urmare concentratorul devine circular, va rezulta  $K_t=3$ . Ca urmare, valoarea tensiunii în imediata vecinătate a unui concentrator circular va fi de trei ori mai mare decât valoarea tensiunii într-o secțiune similară dar fără concentrator. Din relația 4.3. se constată următoarele:

- dacă  $a \ll b$ ,  $K_t \rightarrow 1$ , ce reprezintă cazul fără concentrator întrucât  $a$  rămâne tot timpul, prin definiție, axa mare a elipsei;
- dacă  $b \rightarrow 0$  avem cazul unei fisuri transversale și se deduce că  $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$ , ceea ce nu poate fi adevărat în cazul real. În acest caz, tensiunea de la vârful unui astfel de concentrator (de tip fisură) trebuie determinată pe baza elementelor furnizate de Mecanica ruperii.

Coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor depinde numai de tipul solicitării și de geometria piesei, nedepinzând de natura materialului. Având în vedere aceste considerente, proiectanții ar trebui să limiteze acțiunea concentratorilor de tensiune, mai ales în cazul solicitării la oboseală.

## 4.2. Definiția $K_t$ în domeniul elastic

Mai jos se vor da câteva exemple de calcul analitic al coeficienților de concentrare a tensiunilor, în domeniul elastic, pentru câteva situații concrete.

Pentru cazurile mai complexe, când calculul analitic devine prea laborios, se poate recurge la alte metode de determinare:

- metoda elementelor finite;
- prin determinări experimentale: măsurători cu mărci tensometrice sau cu ajutorul fotoelasticimetricii.

Soluțiile analitice pentru calculul coeficientului teoretic de concentrare a tensiunilor, bazate pe teoria elasticității se bazează pe determinarea funcțiilor de deplasare  $u(x,y)$  și  $v(x,y)$ . Dacă se pot obține aceste funcții, pe baza lor se determină deformațiile specifice iar prin intermediul legii lui Hooke se determină și tensiunile. O parte din găsirea respectivei soluții o reprezintă determinarea deformațiilor specifice  $\epsilon_x(x,y)$ ,  $\epsilon_y(x,y)$  și  $\gamma_{xy}(x,y)$ , care trebuie să satisfacă ecuația de compatibilitate. În plus, trebuie să satisfacă ecuațiile de echilibru între tensiunile  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  și  $\sigma_z$ , luându-se în considerare și legătura existentă între constantele elastice ale materialului. Ecuațiile obținute sunt rescrise prin introducerea funcției de tensiuni  $\Phi$  dată de Airy ceea ce conduce la o ecuație biarmonică. Soluția ecuației astfel determinate conține necunoscute ce trebuie determinate prin impunerea condițiilor la limită.

Pentru concentratorul din figura 4.1 aceste condiții la limită sunt:

1. pentru  $x=\pm L/2 \rightarrow \sigma_x = \sigma$ ,  $\sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ ;
2. pentru  $y=\pm w/2 \rightarrow \sigma_x = 0$ ,  $\sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ ;
3. pentru  $y=\pm r \rightarrow \sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ .

Este evident faptul că tensiunea cea mai mare se înregistrează în imediata vecinătate a concentratorului. Pe măsură ce ne depărtăm de acesta, tensiunea scade după o anumită lege de variație, figura 4.2. De această variație se ține seama atunci când se ia în considerare efectul dimensiunii pieselor cu concentrator asupra limitei la oboseală. Pentru un concentrator eliptic străpuns într-o placă infinită solicitată monoaxial, soluția exactă pentru tensiunea  $(\sigma_x)_{x=0}$ , luată de-a lungul axei  $y$ , este dată de relația:

$$(\sigma_x)_{x=0} = \sigma \left( 1 + \frac{a(a-2b)(y - \sqrt{y^2 - c^2})(y^2 - c^2) + ab^2(a-b)y}{(a-b)^2(y^2 - c^2)\sqrt{y^2 - c^2}} \right) \quad (4.4)$$

unde  $c^2 = a^2 - b^2$ .

Pentru  $y = a$ , ecuația se reduce la ecuația (4.2). La distanță relativ mare de concentrator, respectiv pentru valori mari ale lui  $y$ , va rezulta  $(\sigma_x)_{x=0} = \sigma$ .

Pentru un concentrator circular de rază  $r$ , se poate scrie relația:

$$(\sigma_x)_{x=0} = \sigma \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{r}{y} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{r}{y} \right)^4 \right) \quad (4.5)$$

Din relația (4.5) se constată că pentru  $y=r$ , tensiunea în imediata vecinătate a găurii (concentratorului circular) este:  $(\sigma_x)_{x=0, y=r} = 3\sigma$ .

Distribuțiile tensiunii  $(\sigma_x)_{x=0}$ , pentru un concentrator eliptic cu  $a/b=3$  și respectiv  $K_t = 7$  și pentru un concentrator circular de rază  $r=a=b$ , sunt prezentate în figura 4.2. Tensiunea la vârful concentratorului eliptic este mai mare dar scade mai puternic pe direcția axei  $y$ , pe măsură ce ne depărtăm de concentrator.

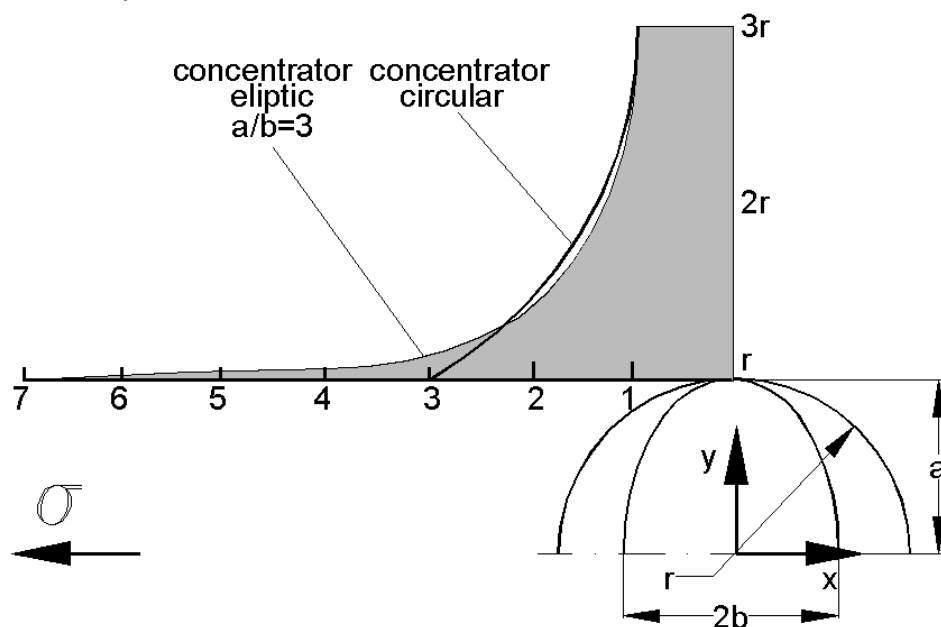


Fig. 4.2. Distribuția tensiunii  $\sigma_x$ , pe axa  $y$ , în dreptul unui concentrator eliptic și a unui concentrator circular

#### 4.3. Efectul geometriei concentratorului asupra coeficientului de concentrare a tensiunilor $K_t$

Pentru placa plană din figura 4.1, din punct de vedere al geometriei acesteia îi sunt caracteristice trei dimensiuni: lățimea  $W$ , lungimea  $L$  și diametrul găurii  $2r$ . Mărimea  $K_t$  este adimensională și ca urmare nu trebuie să depindă de valoarea dimensiunilor ci doar de raportul acestora. Presupunem că avem aceeași piesă din figura 4.1 dar cu dimensiunile de două ori mai mari, respectiv  $2W$ ,  $2L$  și  $4r$ , figura 4.3.

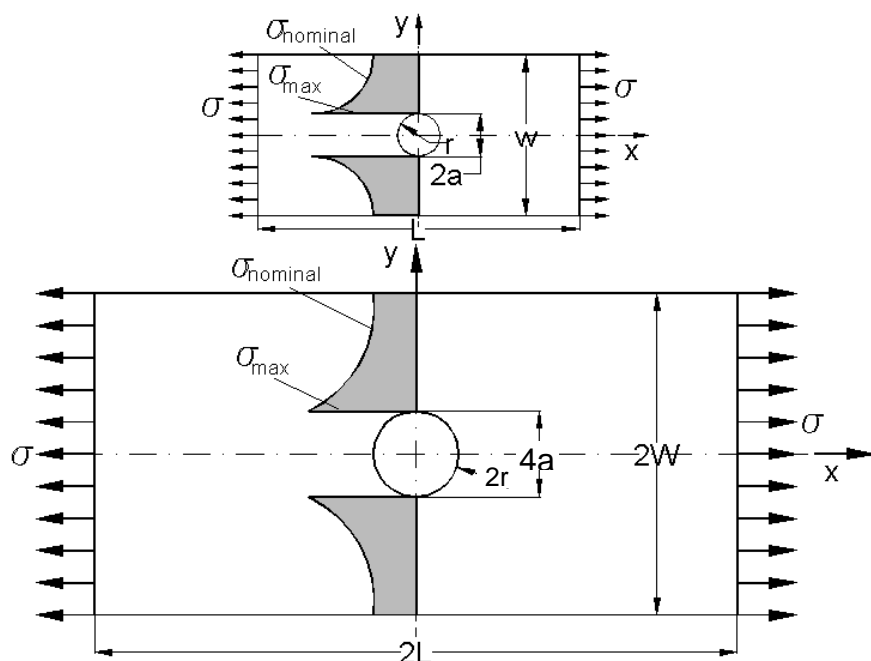
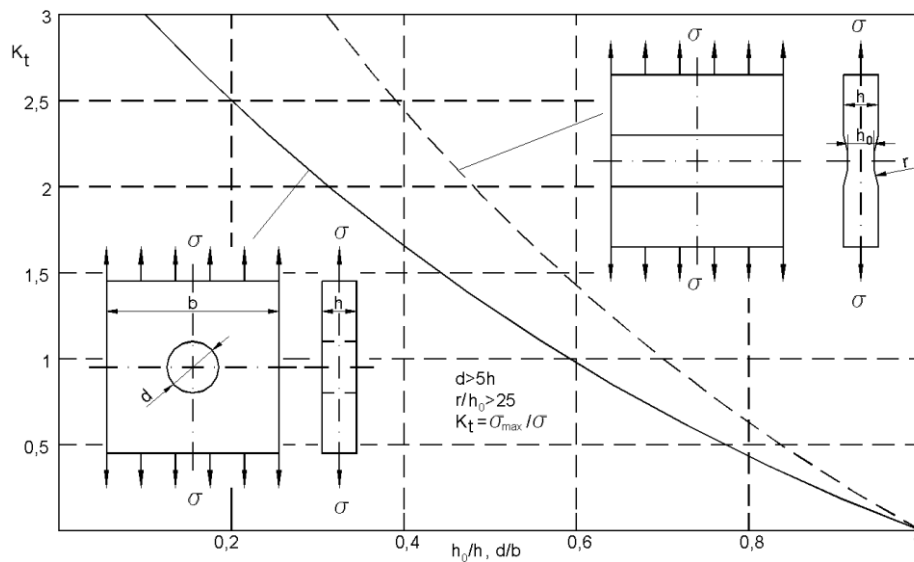


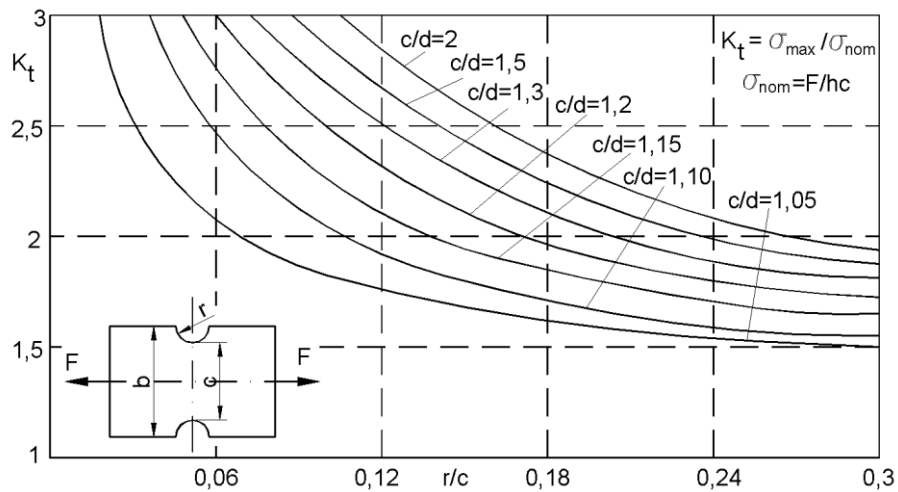
Fig. 4.3. Plăci cu aceeași geometrie, dimensiuni diferite, același  $K_t$  și variații diferite ale tensiunii

Dacă s-ar trasa câte o curbă caracteristică tensiune-deformație pentru fiecare din cele două probe, acestea ar trebui să fie identice. Ca urmare, în cele două probe ar trebui să avem o aceeași distribuție a tensiunilor în cele două piese. La nivelul concentratorului de tensiune vom găsi, într-adevăr, aceeași tensiune,  $\sigma_{\max}$ , și, ca urmare, valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor,  $K_t$  va fi aceeași. Cu toate acestea, variația tensiunilor plecând de la concentrator nu este aceeași, această variație nefiind adimensională. Pentru probele cu volume mai mari și concentrator de dimensiune mai mare, avem o zonă mai mare de material supus la tensiuni ridicate, ceea ce pentru fenomenul de oboseală este determinant.

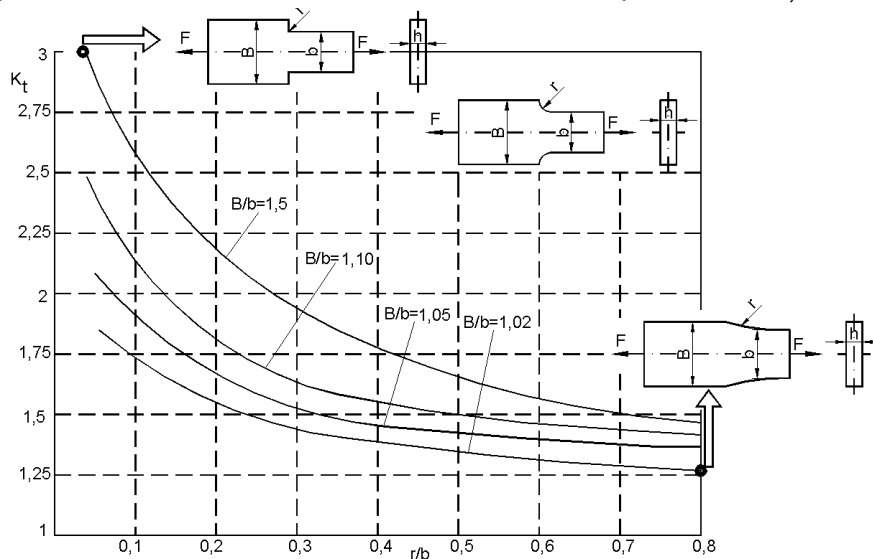
Graficele pentru determinarea valorii pentru  $K_t$  în funcție de forma și dimensiunile geometrice ale concentratorului sunt asemănătoare cu cele prezentate în figura 4.4. Mai multe grafice pentru diferite forme și diferite tipuri de încărcare pot fi găsite [1,2,3].



a) ??????????placă cu concentrator circular central sau teșitură transversală supusă la tracțiune monoaxială



b) h???? plăcă cu concentrator semicircular lateral supusă la tracțiune monoaxială



c) plăcă cu variație a secțiunii transversale supusă la tracțiune monoaxială

Fig. 4.4. Variația  $K_t$  în funcție de forma și dimensiunile geometrice ale concentratorului

De refacut desenele a) si b)

a) la curbe este  $b/c$ ???

de vazut valoarea minima la gaura – se pare ca la gaura valorile sunt mai mari

Din figurile 4.4a și 4.4b se constată faptul că atunci când raza de curbură a concentratorului crește, valorile pentru  $K_t$  devin din ce în ce mai mici, mai mari fiind pentru concentratorul circular central în raport cu concentratorul circular lateral. Din figura 4.4c se constată faptul că o rază de racordare mai mare între cele două secțiuni de mărime diferită conduce la micșorarea valorilor pentru  $K_t$ . Tot o reducere a acestor valori se produce și atunci când diferența dintre dimensiunile cele două secțiuni scade. Tot din această figură se constată faptul că valoarea concentratorului de tensiune poate fi scăzută de la 3 la 1,26 dacă dimensiunile secțiunilor transversale sunt apropiate și dacă raza de racordare între acestea este mare.

În figura 4.5 sunt prezentate trei forme geometrice diferite, având concentratori de aceeași dimensiune.

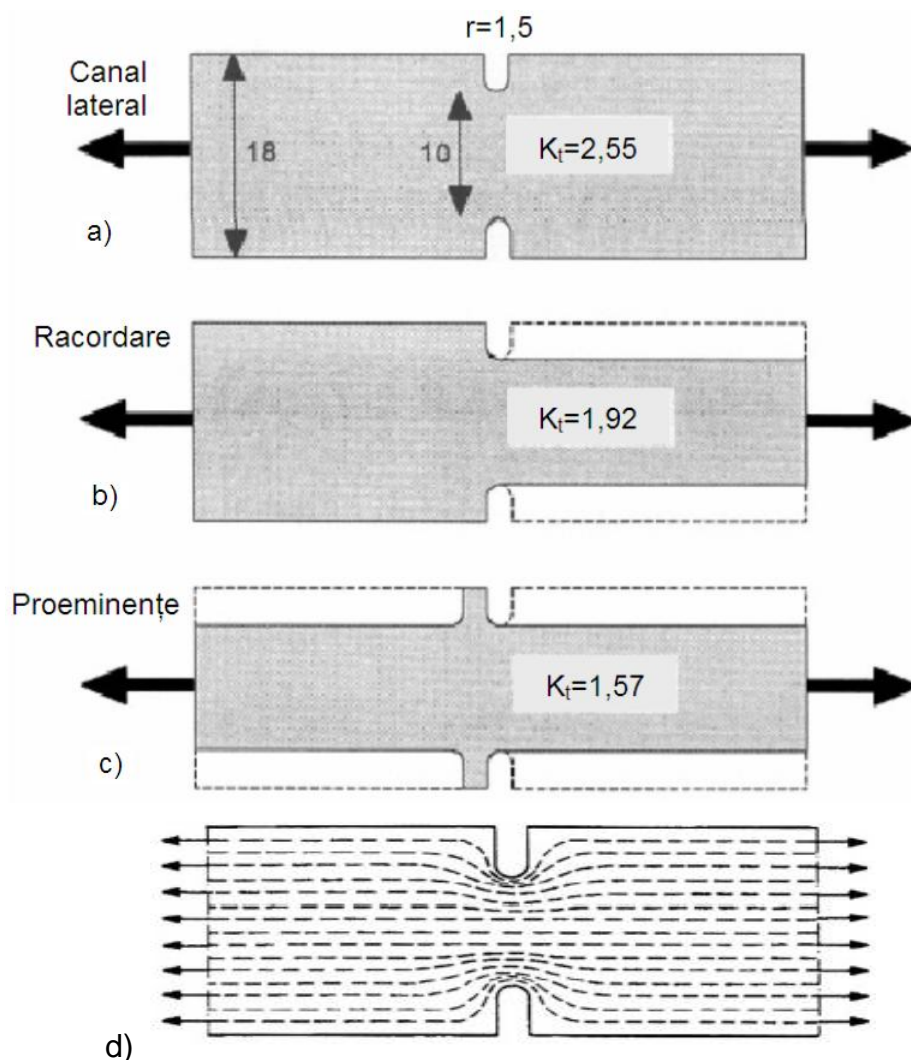


Fig. 4.5. Trei geometrii diferite, având concentratori cu aceeași rază

Se constată faptul că valoarea cea mai mare a factorului de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , se înregistrează pentru creștătura laterală, figura 4.5a. Racordarea între secțiunile de dimensiuni diferite se realizează din figura 4.5a prin îndepărtarea de material, figura 4.5b. În aceste condiții valoarea pentru  $K_t$  se reduce cu 25%. Geometria cu rază de

racordare induce mai puține distorsiuni decât cea cu canal lateral. În figura 4.5d se pot vedea direcțiile tensiunilor principale care sunt deviate în imediata vecinătate a concentratorului. Este de așteptat ca traiectoriile tensiunilor principale să fie mai puțin distorsionate în cazul concentratorului de tip rază de racordare. În figura 4.5c concentratorul este format prin îndepărtarea de material din ambele părți, stânga și dreapta. În aceste condiții, devierea direcțiilor tensiunilor principale este mai mică decât în celelalte două cazuri, și, ca urmare, și valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor  $K_t$  este mai mică. Din figura 4.5 se constată faptul că cea mai mare valoare a coeficientului de concentrare a tensiunilor  $K_t$  este dat de concentratorul lateral, de tip penetrare, care se poate obține și accidental: urme de lovituri, pitinguri, urme de la coroziune sau chiar imprimarea unor coduri de producător.

#### 4.4. Metode pentru determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor

Tehnicile pentru determinarea  $K_t$  au fost pentru început cele experimentale. În figura 4.6 se prezintă două exemple de determinare a coeficientului de concentrare a tensiunilor  $K_t$  prin fotoelasticimetrie. Câmpul de izotensiuni se află la interferența zonelor negre cu cele albe, numite franje. Pentru bara orizontală din figura 4.6b, supusă la încovoiere, paralelismul franjelor luminoase indică o aceeași distribuție a tensiunilor. Se constată faptul că un vârf al tensiunii care se stabilește la trecerea de la o secțiune la alta. Avantajul metodei constă în faptul că se poate obține câmpul tensiunilor de pe întreaga suprafață. Dezavantajul îl constituie acuratețea metodei.

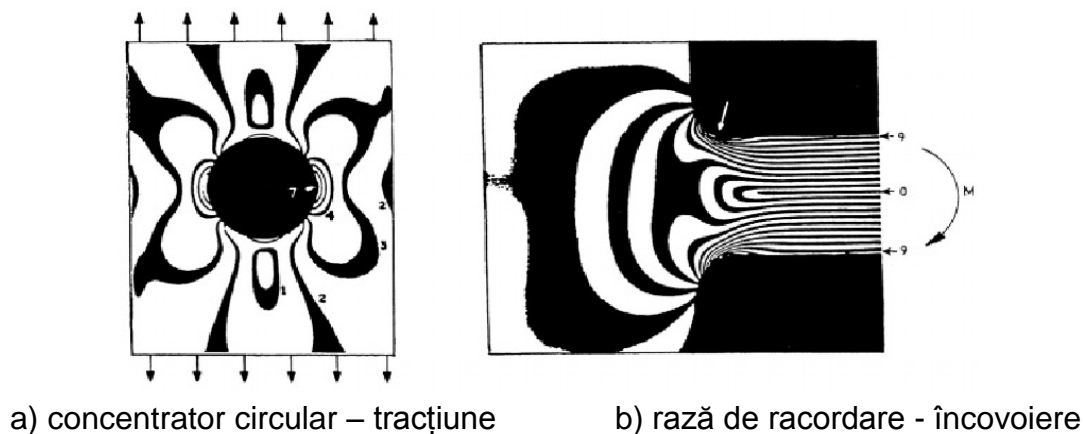


Fig. 4.6. determinarea  $K_t$  prin fotoelasticimetrie

O altă metodă în vederea determinării coeficientului de concentrare a tensiunilor îl reprezintă tehnica utilizării traductoarelor tensometrice. În acest caz, deformațiile din punctul central al traductorului se măsoară cu o bună acuratețe. Totuși, datorită gradientului mare al tensiunilor din imediata vecinătate a concentratorului de tensiune, trebuie utilizat un traductor electrotensometric cu dimensiunile grilei foarte mici,  $L, l < 1\text{ mm}$ . Din păcate, nu se poate măsura cu ajutorul acestei metode, deformația, și în acest fel să se determine tensiunea, chiar în centrul concentratorului. În general, această metodă se poate utiliza pentru determinarea deformațiilor în cazul structurilor sau a componentelor cu geometrie complexă.



În afară de datele privind similaritatea concentratorilor (în special cea a razelor), pentru estimarea valorilor  $K_t$  se poate utiliza și metoda interpolării rezultatelor între diferite geometrii pentru care există valori disponibile. Această estimare se poate face întrucât există date disponibile în acest sens în literatura de specialitate. Se pot utiliza date determinate prin diferite metode. Având în vedere acest lucru și al metodei în sine, acuratețea acestei metode este limitată.

Metoda cel mai des utilizată în acest timp este cea bazată pe analiza cu elemente finite, AEF. O ilustrare a modelului utilizat în acest sens este prezentată în figura 4.7. Geometria modelului trebuie să conțină un număr suficient de mare de elemente interconectate. În zona concentratorului de tensiune trebuie asigurată o densitate mai mare a elementelor utilizate.

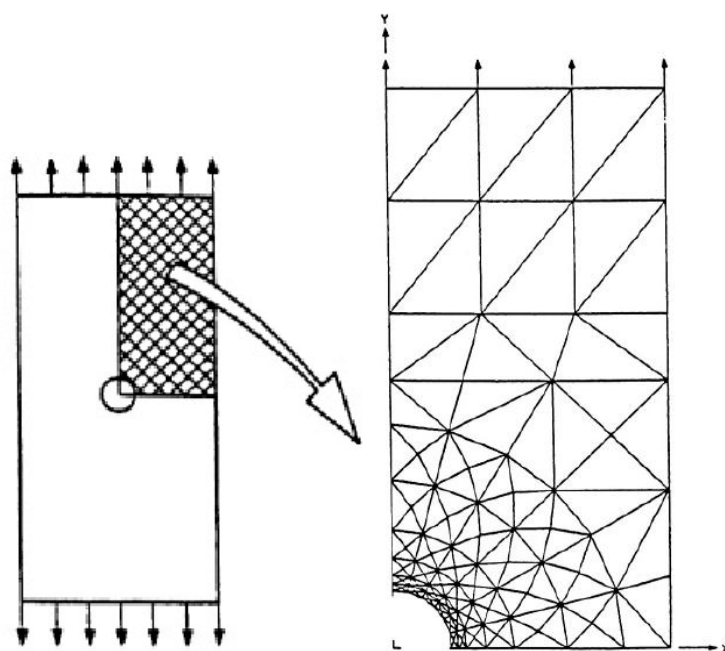


Fig. 4.7. Modelul utilizat în analiza cu elemente finite

Pentru forme complexe ale structurilor sau componentelor, metodele de calcul analitic și estimările devin impracticabile. Acest lucru este valabil pentru componentele cu geometrie 3D ce conține multe elemente dar și pentru componentele 2D cu o geometrie complexă, simetrie limitată și fără elemente comparabile simple. În cazul în care pentru determinarea  $K_t$  nu sunt disponibile tehnici experimentale, trebuie aplicate tehnici de analiză cu elemente finite pentru care s-au dezvoltat mai multe programe specializate. Soluțiile obținute nu sunt exacte, deoarece materialul continuum este înlocuit de un material multi-element. Cu toate acestea, pe baza acestei metode se pot obține rezultate destul de satisfăcătoare. Analiza cu elemente finite necesită o anumită experiență a utilizatorului și, de asemenea, trebuie făcută o analiză critică a rezultatelor obținute. O atenție deosebită trebuie acordată modelării, aplicării sarcinilor, condițiilor la limită impuse și, eventual, condițiilor ce derivă din simetria geometrică și de solicitare. De asemenea, trebuie utilizat programul pe calculator cel mai adecvat problemei propuse spre a fi rezolvate. De asemenea, programul respectiv trebuie verificat mai întâi pe modele simple pentru care sunt disponibile rezultate furnizate pe alte metode.

Criteriile ce trebuiesc avute în vedere pentru o comparație între calculele AEF și tehnicile experimentale sunt: precizia și raportul cost - eficiență. În cazul în care se utilizează programe de analiză cu elemente finite care furnizează rezultate verificate și, de asemenea, operatorul acestora are destulă experiență, criteriile menționate sunt în favoarea utilizării metodei AEF. Pe de altă parte, această metodă furnizează imagini destul de elocvente privind distribuția tensiunilor din imediata vecinătate a concentratorului de tensiune. Desigur, aceasta necesită un program de calculator și un computer adecvat pentru probleme complexe 3D. Pentru validarea rezultatelor furnizate de programele de AEF este bine să se utilizeze tehnici complementare cum ar fi determinarea deformațiilor pe baza tensometriei electrice rezistive. Aceste determinări se pot face în jurul unui punct determinat de intersecția elementelor finite.

#### **4.5. Efectul concentrării tensiunilor la solicitări de oboseală**

##### *Similitudinea și efectul de concentrator*

Prezența concentratorilor de tensiune reduce rezistența structurilor, atât în regim static cât și în regim dinamic de solicitare. Pentru solicitarea statică, efectul de concentrare a tensiunilor elastice este luat în calcul cu ajutorul coeficientului de concentrare  $K_t$  definit de relația  $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n$  ca fiind raportul dintre valoarea maximă a tensiunii și tensiunea nominală din secțiunea respectivă, obținute cu relațiile de calcul obișnuite din rezistența materialelor. Acest coeficient depinde de geometria concentratorului, de modul de solicitare și de felul în care a fost definită tensiunea nominală; el nu depinde de material și nici de valorile sarcinilor aplicate. Utilizarea coeficientului de concentrare statică nu este permisă dacă în zonă apar deformații plastice locale.

Este evident faptul că prezența unui concentrator de tensiune va reduce rezistența la oboseală a unei piese. Pe de altă parte, se cunoaște faptul că, epruvetele similare, din același material, cu același  $K_t$ , cu dimensiuni și raze de curbura ale concentratorului exterior mai mari au limita la oboseală mai mică. Din acest punct de vedere se remarcă efectul mărimii concentratorului asupra rezistenței la oboseală. Pentru a înțelege și a prezice efectul formei concentratorului și efectul dimensiunii acestuia asupra limitei la oboseală, trebuie reamintită definiția limitei oboseală. Aceasta reprezintă cea mai mică amplitudine a tensiunii, care este capabilă să nucleeeze o microfisură ce se poate propaga până cedarea finală.

O metodă utilizată pentru punerea în evidență a efectului concentrării tensiunilor asupra rezistenței la oboseală este următoarea: se trasează curba de durabilitate  $\sigma_a$ -N pentru o epruvetă fără concentrator. Se împart ordonatele curbei la coeficientul de concentrare  $K_t$  obținând astfel o curbă teoretică de durabilitate  $\sigma_{ak}$ -N pentru epruveta cu concentrator, solicitată în aceleași condiții ca și epruveta netedă. Repetând operațiunea pentru mai multe valori ale lui  $K_t$  se constată că, pe măsură ce valoarea coeficientului  $K_t$  crește, curba teoretică de durabilitate coboară. Dacă pentru o valoare dată a coeficientului  $K_t$  se determină pe cale experimentală curba de durabilitate  $\sigma_{ak}$ -N, se constată că aceasta este situată între curba teoretică și curba obținută pentru epruveta netedă. Rezultă că, un

concentrator de tensiune reduce rezistența la oboseală într-o măsură mai mică decât estimarea făcută pe baza utilizării coeficientului teoretic de concentrare statică,  $K_t$ . Ca urmare, utilizarea acestui parametru în calculul de oboseală conduce la erori inacceptabile.

În figura 4.6 se prezintă curbele la oboseală prin încovoiere rotativă, pentru un aliaj din aluminiu pentru care dimensiunea probei fără concentrator ( $K_t=1$ ) este egală cu dimensiunea minimă a piesei cu concentrator (Dumitru sau 11 la el).

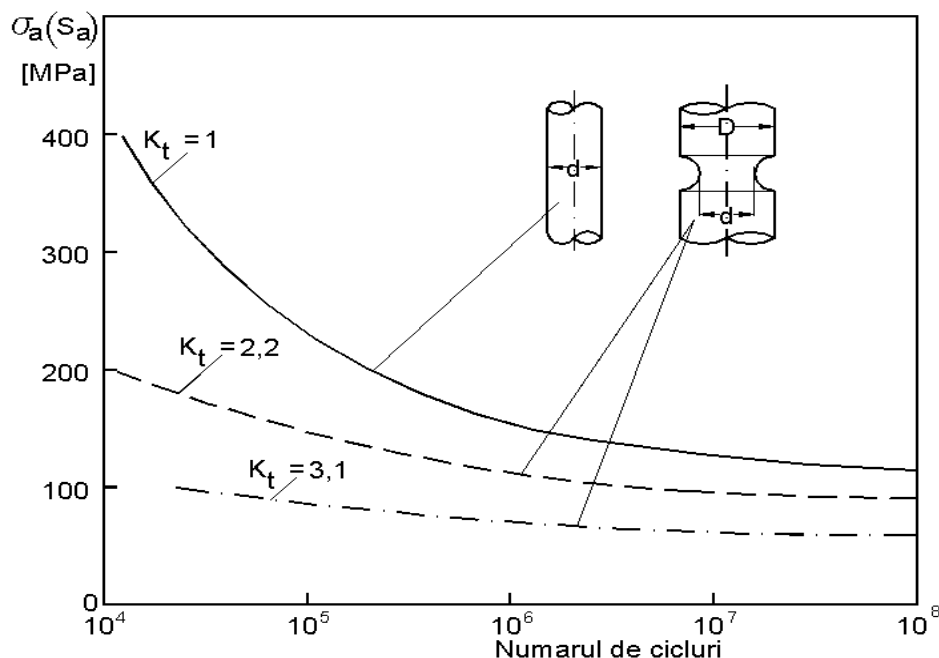


Fig. 4.5. Influența efectului de concentrare a tensiunilor

Se constată faptul că, reducerea rezistenței la oboseală în cazul probei cu concentrator nu are loc proporțional cu coeficientul de concentrare a tensiunilor pentru solicitarea statică,  $K_t$ . Rezistența la oboseală a piesei cu concentrator este mai mare decât cea care s-ar obține din raportarea rezistenței la oboseală a piesei fără concentrator la  $K_t$ .

În cazul solicitărilor la oboseală, efectul de concentrare a tensiunilor nu se ia în considerare prin  $K_t$  ci prin  $K_f$  numit coeficient efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală.

În domeniul durabilităților mari, diminuarea rezistenței la oboseală datorată efectului de concentrare a tensiunilor poate fi evaluată cu ajutorul factorului de reducere a rezistenței la oboseală  $K_f$ ; pentru acest parametru se mai utilizează în literatura de specialitate și denumirea de factor de oboseală al concentratorului sau coeficient efectiv de concentrare la oboseală. Pentru o durabilitate dată acest factor se definește ca fiind:

$$K_f = \frac{\sigma_R}{S_R} \quad (4.6)$$

în care  $\sigma_R$  reprezintă limita la oboseală pentru o epruvetă fără concentrator iar  $S_R$  reprezintă limita la oboseală pentru o epruvetă cu concentrator. De regulă, factorul  $K_f$  se definește și se determină pentru ciclul simetric. Se observă că structura relațiilor cu care au fost definiți coeficienții de concentrare  $K_f$  și  $K_t$  este aceeași din punct de vedere simbolic. Diferența constă în faptul că, coeficientul  $K_t$  este definit ca raportul a două

tensiuni în timp ce factorul  $K_f$  reprezintă raportul a două rezistențe la oboseală determinate pentru aceeași durată de viață.

Dacă raza de racordare de la vârful concentratorului este mare, valorile factorului  $K_f$  se apropie mult de cele ale coeficientului  $K_t$ . La valori mici ale razei de racordare avem  $K_f \ll K_t$ . O cauză posibilă a acestui comportament poate fi curgerea inversă ce se produce la rădăcina concentratorului în timpul fiecărei încărcări ciclice; deformările plastice care apar astfel conduc la o valoare reală a amplitudinii tensiunii locale maxime mai mică decât  $(K_t \cdot \sigma_a)$ , valoare dedusă presupunând o comportare elastică a materialului. Aceste efecte apar la majoritatea metalelor de uz ingineresc, dacă tensiunile aplicate au valori ridicate adică în cazul duratelor de viață scurte. La metalele foarte ductile aceste efecte pot apărea și la durate mici de viață. Totuși, la majoritatea materialelor curgerile sunt mici sau lipsesc chiar și la durabilități de  $10^6$  sau  $10^7$  cicluri. O altă cauză ar putea fi aceea că materialul este mai puțin sensibil la vârfurile de tensiune decât la tensiunile care acționează în zone cu dimensiuni mici dar finite. De aici rezultă necesitatea ca studiul procesului de deteriorare produs prin oboseală să se facă luând în considerare un volum finit de material. Ca urmare, tensiunea ce determină inițierea deteriorării prin oboseală este tensiunea cea mai mare; ea are o valoare mai coborâtă și se produce la o anumită distanță de punctul cel mai solicitat.

Pentru a caracteriza intensitatea efectului de concentrare produs de un concentrator de tensiuni, se folosește uneori coeficientul de sensibilitate la oboseală a concentratorului, definit cu relația:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (4.7)$$

Dacă  $K_f = K_t$ , coeficientul de sensibilitate la oboseală al concentratorului are valoarea  $q=1$  iar concentratorul are efectul maxim posibil. Valoarea coeficientului  $q$  scade atunci când  $K_f < K_t$ . Pentru  $K_f = 1$ , se obține valoarea minimă  $q=0$ , caz în care concentratorul nu are efect. S-a stabilit că valoarea coeficientului de sensibilitate  $q$  depinde de material și că, pentru un material dat, acesta crește odată cu raza de racordare a concentratorului. La unele materiale, cum sunt oțelurile,  $q$  crește de asemenea cu rezistența statică  $R_m$ . Experimental se constată că pentru materialele fragile solicitate la oboseală, efectul de concentrare a tensiunilor este mult mai sever decât la materialele ductile de mică rezistență. Valoarea coeficientului de sensibilitate la oboseală poate fi estimată cu relația:

$$q = \frac{1}{1 + \alpha \rho} \quad (4.8)$$

în care  $\alpha$  este o constantă de material având dimensiunea unei lungimi iar  $\rho$  este raza de racordare a concentratorului. Pentru oțeluri având rezistența la rupere statică  $R_m > 550$  MPa, constanta  $\alpha$  poate fi determinată cu relația:

$$\alpha = 6 \left( \frac{100}{R_m} \right)^{1.8} \quad (4.9)$$

O altă relație empirică utilizată pentru calculul coeficientului de sensibilitate la oboseală este:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}} \quad (4.10)$$

Această relație reprezintă o formă simplificată a relației lui Neuber. Pentru oțelurile cu  $R_m \leq 1500$  MPa, constanta de material  $\beta$  se poate calcula cu relația:

$$\beta = \frac{1,7}{\frac{R_m}{10^{586}}} \quad (4.11)$$

Relațiile (4.9) și (4.11) sunt aproximative, iar relația (4.10) reflectă tendința observată la datele experimentale obținute pentru piesele solicate la oboseală prin cicluri simetrice. Factorul de concentrare la oboseală  $K_f$  este un parametru empiric; el depinde de material, de forma și dimensiunile concentratorului precum și de modul de solitare.

Întrucât coeficientul  $K_f$  se determină experimental pentru ciclurile simetrice, utilizarea lui la ciclurile având tensiunea medie nenulă presupune introducerea unor condiții. Dacă se presupune că tensiunea maximă locală, produsă în zona concentratorului la vârf de sarcină, este mai mică decât limita de curgere a materialului, atunci amplitudinea tensiunii și tensiunea medie din punctul cel mai sollicitat al concentratorului se pot scrie sub forma:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= K_t S_a \\ \sigma_m &= K_f S_m \end{aligned} \quad (4.12)$$

Efectul tensiunii medii poate fi estimat utilizând o relație de forma ecuației (3.23), exprimată în funcție de tensiuni, respectiv:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (4.13)$$

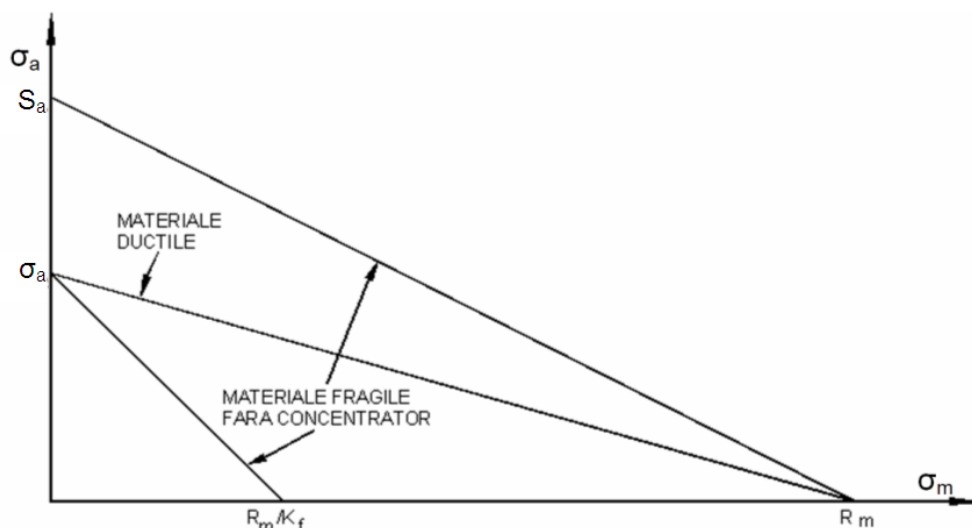
în care  $\sigma_a$  și  $\sigma_m$  corespund ciclului cu coeficient de asimetrie  $R$  iar  $\sigma_{as}$  corespunde unui ciclu simetric. Înlocuind relațiile (4.12) în relația (4.13) se obține amplitudinea tensiunii locale maxime, echivalentă ciclului simetric:

$$\sigma_{as} = \frac{K_t \sigma_a}{1 - \frac{K_f \sigma_m}{R_m}} \quad (4.14)$$

Luând în considerație efectul de sensibilitate al concentratorului, se poate înlocui  $K_t$  prin  $K_f$ , astfel încât se obține:

$$\sigma_{as} = \frac{\sigma_a}{\frac{1}{K_f} - \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (4.15)$$

Această relație este prezentată grafic în figura 3.14, atât pentru cazul particular  $K_f=1$  (concentrator inexistent sau ineficient) cât și pentru cazul general, ținând seama că  $S_{as} = \sigma_{as}/K_f$ .



**Fig. 4.6.** Reprezentarea grafică a relației 4.15

Diagramele obținute pot fi folosite la calculul pieselor confecționate din materiale fragile. Pentru materialele ductile, prezența factorului  $K_f$  la numitorul relației (4.14) nu este justificată întrucât, din cauza deformațiilor plastice mari care se produc înainte de rupere, atât la epruvetele cu concentrator cât și la cele fără concentrator se obține aceeași valoare a rezistenței de rupere statică  $R_m$ . Ca urmare, la aceste materiale diagrama funcției  $\sigma_{as}=f(\sigma_a, \sigma_m)$  este cea prezentată în figura 4.6.

La durate de viață scurte sau intermediare, în materialele ductile se produc curgeri importante, astfel că, amplitudinea tensiunii locale  $\sigma_a$  este mai mică decât  $K_t \sigma_a$ . În consecință, raportul dintre rezistența la oboseală a epruvetei cu concentrator și cea a epruvetei netede devine mai mic decât  $K_f$ , astfel încât este necesară definirea unui factor de concentrare  $K'_f$  variabil cu numărul de cicluri parcurs până la rupere:

$$K'_f = \frac{\sigma_{as}}{S_{as}} \quad (4.16)$$

La materialele ductile  $K'_f$  descrește de la valoarea  $K_f$  corespunzătoare durabilităților mari la valori apropiate de unitate, pentru durate scurte de viață.

#### **4.6. Influența dimensiunilor piesei asupra limitei la oboseală**

Efectul dimensiunii pieselor asupra limitei la oboseală poate fi determinat pe baza încercărilor experimentale. Un astfel de exemplu este prezentat în figura 3.15a. Se constată faptul că, pentru diferite oțeluri, limita la oboseală scade pe măsură ce dimensiunile pieselor cresc.

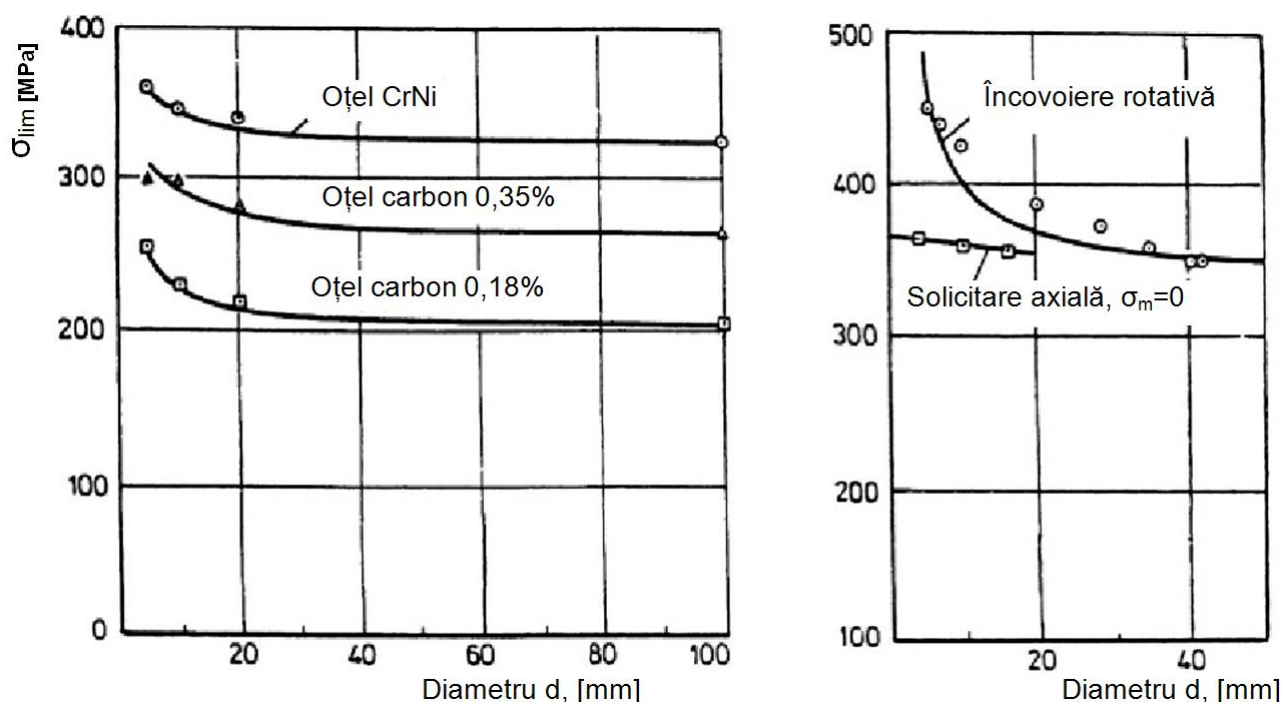


Fig. 3.15. Variația limitei la oboseală în raport cu dimensiunile pieselor

Același lucru se poate constata și din figura 3.15b, cu precizarea că pentru dimensiuni mici ale pieselor limita la oboseală este mai mare în cazul solicitării de încovoiere rotativă în raport cu solicitarea axială alternant-simetrică. Așa cum s-a văzut în capitolul 2, valoarea limitei la oboseală este determinată, în primul rând de defectele existente sau care se inițiază la suprafața materialului. Probabilitatea de a avea mai multe defecte este mai mare pentru materialele cu volum și suprafață mai mari. Ca urmare, rezultatele experimentale prezentate sunt explicabile, din acest punct de vedere. Pe de altă parte, la solicitarea axială un volum mai mare de material este supus tensiunii maxime spre deosebire de solicitarea de încovoiere unde doar în fibrele de la suprafață se introduce tensiunea maximă. Ca urmare, este explicabilă scăderea limitei la oboseală pentru solicitarea axială, figura 3.14b.

Efectul dimensiunilor piesei asupra limitei la oboseală se estimează pe baza coeficientului adimensional  $\epsilon$ , definit ca raportul dintre limita la oboseală a unei epruvete de dimensiune  $d$  și limita la oboseală a unei epruvete de dimensiune standard. Dacă se încearcă epruvete cilindrice, dimensiunea standard este de obicei 10 mm. În cele două cazuri încercarea se face cu același coeficient de asimetrie, de obicei  $R=-1$  (solicitare după un ciclu simetric). În figura 3.16 se prezintă o diagramă care prezintă curbele de variație a coeficientului  $\epsilon$  în funcție de dimensiunile epruvetelor, pentru diferite tipuri de oțeluri.

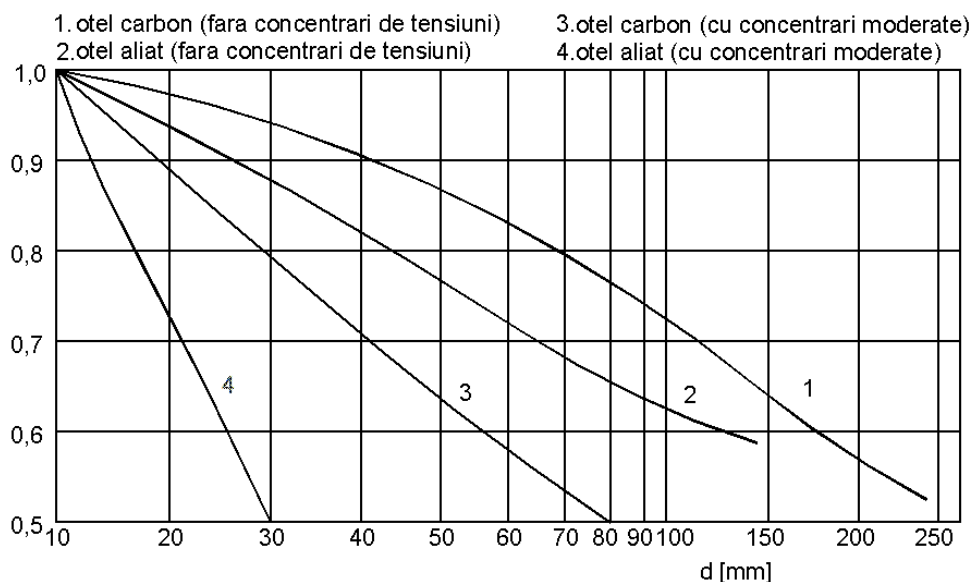


Fig. 3.16. Curbele de variație a coeficientului  $\varepsilon$  în funcție de dimensiunile epruvetelor

Pentru explicarea teoretică a influenței dimensiunilor asupra limitei la oboseală au fost propuse mai multe modelări. Unele dintre acestea țin seama de probabilitatea ca într-un anumit volum să existe un anumit număr de defecte sau să se inițieze deplasări ale dislocațiilor care să conducă la apariția defectelor. Dacă se consideră că densitatea de defecte pe unitatea de volum este constantă, odată cu creșterea volumului crește și probabilitatea existenței unui defect critic de la nivelul căruia să se propage în continuare o fisură până la rupere. Pe baza acestor considerații s-a propus a fi utilizată relația:

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{C \cdot \log \left( \frac{V}{V_0} \right)} \quad (3.25)$$

în care  $C$  este o constantă de material,  $V$  este volumul epruvetei cu dimensiune oarecare iar  $V_0$  este volumul epruvetei standard.

Alte relații de calcul țin seama de raportul dimensiunilor maxime ale celor două epruvete:

$$\varepsilon = \left( \frac{d_0}{d} \right)^r \quad (3.26)$$

unde  $r$  reprezintă o constantă de material, pentru oțeluri cuprinsă între 0,08 și 0,12.

### 3.2. Influența calității suprafeței asupra limitei la oboseală

Calitatea și în special rugozitatea suprafețelor au un efect semnificativ asupra inițierii fisurilor de oboseală. Pentru condițiile de producție industrială o suprafață de înaltă calitate este scumpă și nu neapărat necesară. În funcție de procesele de producție există o varietate de calități ale suprafeței. Calitatea suprafeței este caracterizată de termeni ca lustruire, rectificare, șlefuire, strunjire, frezare pe contur, găurire, tăiere, turnare, forjare, extrudare, etc. Efectul diferitelor condiții de finisaj ale suprafeței asupra curbei  $\sigma$ - $N$  și a limitei de oboseală a fost determinat pe baza a numeroase investigații experimentale



asupra diferitelor materiale., în special pentru oțeluri, Efectele calității suprafeței asupra limitei la oboseală sunt date de coeficientul de calitate a suprafeței, sau factor de reducere, notat cu  $\gamma$  și definit ca raportul dintre limita la oboseală a unei epruvete având o calitate oarecare a suprafeței și limita la oboseală a epruvetei șlefuite prin rectificare:

$$\gamma = \frac{\sigma_{R, \text{oarecare}}}{\sigma_{R, \text{rectificare}}} \quad (3.27)$$

În literatura de specialitate sunt prezentate date în legătură cu valorile pentru coeficientul  $\gamma$  în raport cu calitatea suprafețelor, în special pentru probele din oțel, și în funcție de tensiunea de rupere la tracțiune a materialului din care sunt confecționate aceste probe, fig. 3.17.

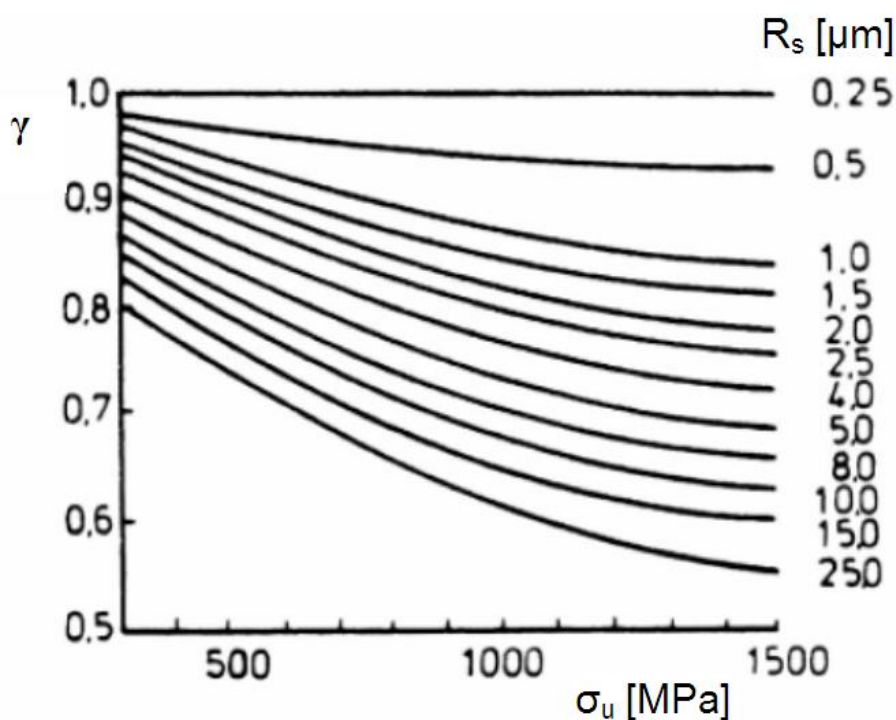


Fig. 3.17. Variația factorului  $\gamma$  în funcție de rugozitatea suprafeței {Jaap}

Se poate constata influența calității suprafeței asupra factorului  $\gamma$ , acesta putând ajunge și la valori de 0,5. se poate vedea, de asemenea, și faptul că factorul  $\gamma$  scade pe măsură ce rezistența la rupere prin tracțiune crește. Problema care se pune este dacă trebuie să suprapunem efectul calității suprafețelor peste efectul dat de concentratorii de tensiuni existenți pe piesele reale? Rugozitatea reprezintă concentratori microscopici în timp ce găurile, racordările, canalele de pană, etc. au dimensiuni macroscopice. O suprapunere a acestor efecte ar însemna calculul coeficientului de concentrare a tensiunilor după o relație de forma:

$$K_t = (K_t)_{\text{concentrator}} \cdot (K_t)_{\text{rugozitate}} \quad (3.28)$$

Cu toate acestea, nu este realist să se definească un  $K_t$  pentru rugozitățile apărute după prelucrarea unei suprafețe. Razele la rădăcina rugozităților ar fi foarte mici, și, ca urmare, valorile pentru  $K_t$  ar trebui să fie destul de mari. Pe de altă parte, este cunoscut din

experiența în exploatare, că rugozitatea suprafeței poate reduce în mod semnificativ calitatea la oboseala a unui element de structură sau a unui material de înaltă rezistență. Predicțiile asupra limitei la oboseală a unei structuri cu raze mari ale creștăturilor de la suprafață trebuie să includă un factor de reducere  $\gamma$  care să țină seama de calitatea suprafeței:

$$\sigma_1 = (\sigma_1)_{\text{prezis}} \cdot \gamma \quad (3.29)$$

cu  $\gamma$  determinat din figura 3.17, de exemplu.

Observații;

- în cazul materialelor de înaltă rezistență, la care și limita la oboseală este ridicată, trebuie să țină seama totuși de sensibilitatea mai ridicată a acestora în raport cu calitatea suprafeței;
- informațiile privind efectul calității suprafeței asupra limitei la oboseală este dat de factorul  $\gamma$ , totuși, în cadrul proiectării la oboseală sunt necesare mai multe informații în legătură cu acest aspect. Câteva dintre aceste sunt redată în continuare.

Sunt procese care au un efect favorabil sau defavorabil asupra coeficientului de calitate a suprafeței. Dacă stratul superficial al piesei se îmbunătățește prin diverse tratamente termice, termochimice sau mecanice, coeficientul  $\gamma$  se va îmbunătăți. O serie de procese tehnologice cum ar fi laminarea sau anumite tratamente termice cum ar fi recoacerea, au efecte defavorabile asupra proprietăților materialului din straturile superficiale ale pieselor. De asemenea, mai este cunoscut faptul că, la suprafețele materialelor mai moi, fisurile se amorsează mai ușor decât în cazul suprafețelor mai dure.