

CURS 2

3.10 ELEMENTE DE MECANICA RUPERII

Ruperea reprezinta fenomenul de fragmentare a unui corp solid sub actiunea unor tensiuni interne sau externe aparute in urma unor sarcini constante sau crescatoare. Fenomenul de rupere poate fi clasificat dupa urmatoarele criterii:

1. *dupa modul cristalografic de producere*, se intalneste *rupere prin clivaj* si *rupere prin forfecare*. Ruperea prin clivaj consta in distrugerea legaturilor dintre atomii adiacenti planului de clivaj, sub actiunea tensiunilor normale la aceste plane. Planele de clivaj sunt plane cristalografice de mica densitate atomica si sunt caracteristice pentru fiecare structura cristalina in parte. Ruperea prin forfecare consta in distrugerea legaturii intre atomii situati pe plane adiacente de mare densitate atomica, sub actiunea tensiunilor tangentiale.
2. *dupa deformarea plastica ce precede ruperea* aceasta poate fi: *fragila(casanta)*, fara o deformare plastica vizibila sau *ductila*, insotita de o deformare plastica apreciabila.
3. *dupa aspect*, la un material policristalin, suprafata de rupere poate fi: *cristalin-stralucitoare*(grauntoasa), daca ruperea s-a produs fragil sau *mat-fibroasa*(cu gropite) daca ruperea s-a produs ductil.
4. *dupa traiectoria urmata de fisura*, se distinge *ruperea transgranulara* (intragranulara) daca fisura strabate grauntele, sau *intergranulara* daca grauntii nu se fisureaza, ci aluneca intre ei, dupa limitele de graunte.

Ruperea materialelor se poate produce printr-unul din cele cateva mecanisme fundamentale:clivaj, curgere plastica, fluaj.

Clivajul consta in fragmentarea solidelor cristaline de-a lungul anumitor plane cristalografice, sub actiunea unor forte destul de mari, pentru a rupe legaturile atomice. Clivajul se intalneste frecvent la metale cu structura cubica cu volum centrat (CVC) si hexagonal compacta (HC), la aliaje, dar aproape niciodata la metale cu structura cubica cu fete centrate (CFC). Ruperea prin clivaj, ca si ruperea fragila intergranulara, conduce la suprafete de rupere care, din punct de vedere microscopic, sunt orientate normal la tensiunea de intindere aplicata.

Ruperea prin curgere plastica. In urma deformarii plastice, incluziunile si particulele de faza secundara se desprind din matrice, golurile rezultate cresc si eventuala lor coalescenta conduce la rupere. Prezenta golurilor determina o suprafata de rupere cu denivelari caracteristice, fapt ce face ca ruperea sa se mai numeasca fibroasa sau cu gropite.

Fluajul. La temperaturi ridicate, materialele metalice se deformeaza plastic in mod continuu sub actiunea unor tensiuni permanente de un nivel scazut. In aceste situatii multe metale si aliaje se rup de-a lungul limitelor de graunte cu o deformare plastica relativ scazuta, cand sarcina este mentinuta un timp indelungat. Cauza producerii fluajului o constituie cresterea mobilitatii atomilor prin difuzie la temperaturi ridicate.

Fiecare material prezinta o inclinatie naturala spre unul sau altul dintre mecanismele de rupere. Pentru un material dat mecanismul de rupere care predomina depinde de

temperatura, tensiune, viteza de aplicare a sarcinii, conditiile chimice din mediul inconjurator.

Figura 3.19 prezinta schematic unele dintre tipurile de rupere produse prin intindere, care pot aparea in metale.

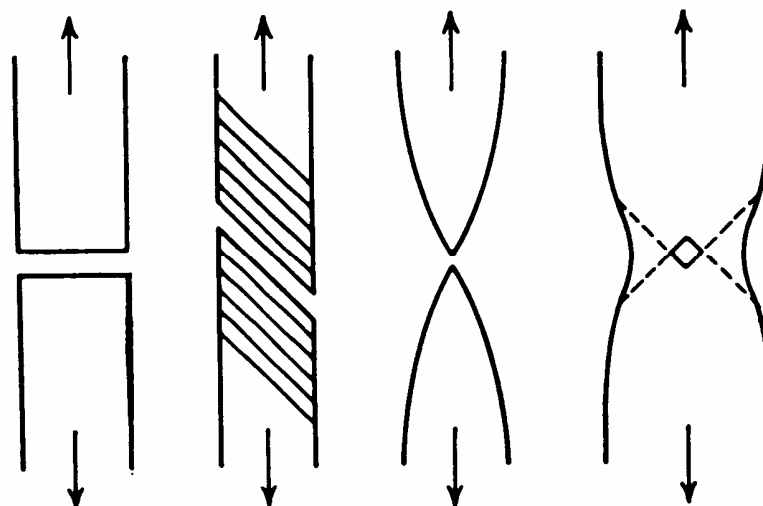


Fig. 3.19

Cateva dintre caracteristicile ruperilor ductile si fragile sunt prezentate in tabelul de mai jos :

Nivel de marire	Rupere fragila	Rupere ductila
Macroscopic	Fara deformare plastica	Cu deformare plastica
Microscopie optica	Suprafata plana	Graunti deformati
Microscopie electronica	Suprafata de clivaj	Suprafata cu gropite

Pentru a face o caracterizare a modului in care se rupe un material, se tine seama de o serie factori de ordin general cum ar fi valoarea tensiunii de rupere, marimea deformarii plastice ce insoteste ruperea, aspectul suprafetei de rupere, etc.

In conditii obisnuite, temperatura si presiune normale, precum si viteze mici de aplicare a sarcinii, fiecare material se manifesta, de preferinta, intr-unul din cele doua moduri de rupere. Astfel materialele pot fi impartite in intrinsec fragile si intrinsec ductile.

In desfasurarea lor, atat ruperea fragila cat si cea ductila, urmeaza trei etape:

1. amorsarea sau germinarea microfisurilor;
2. propagarea, cresterea sau extinderea microfisurilor;
3. oprirea fisurilor.

Ruperea fie ductila fie fragila, se produce in momentul in care un defect identificat ca o fisura preexistenta intr-un material, atinge o dimensiune critica. O diferentiere intre cele doua tipuri de ruperi se poate face dupa modul in care fisura evolueaza spre stadiul ei critic, precum si dupa energia consumata pentru procesul de rupere: ridicata la ruperea ductila si scazuta la ruperea fragila.

Ruperea fragila

Ruperea fragila constituie o cauza majora a distrugerii materialelor in timpul lucrului. Ruperile fragile se disting in mod obisnuit de cele ductile prin absentia aproape completa a deformatiilor plastice. Ruperile fragile se produc la tensiuni sub tensiunea de curgere specifica materialului. Suprafetele de rupere sunt adesea plate, stralucitoare cu aspect graunatos si doar rareori se remarca o evidentiere slaba a liniilor de alunecare. Din punct de vedere a traiectoriei urmate de fisura, ruperile fragile pot fi: transgranulare sau intergranulare.

Valorile teoretice ale rezistentei la rupere depasesc cu cateva ordine de marime valorile experimentale. Principala cauza a acestei diferente consta in prezenta defectelor ce slabesc reseaua cristalina.

Rezistenta unui material poate fi crescuta fie prin eliminarea defectelor, fie prin impiedicarea evolutiei acestor defecte. Aceasta explicatie a fost data de Griffith si se aplica numai corpurilor fragile.

Griffith si-a formulat teoria pornind de la ideea ca intr-un material fragil exista o multitudine de microfisuri care, conduc la o concentrare a tensiunilor astfel incat in anumite zone se poate atinge valoarea rezistentei teoretice, chiar daca tensiunea nominala aplicata este mult mai mica. Criteriul lui Griffith spune ca: " O fisura se va propaga atunci cand scaderea energiei de deformare elastica este cel putin egala cu energia necesara pentru a crea o noua suprafata a fisurii".

Rezistenta teoretica la rupere

Ruperea este determinata de distrugerea legaturilor dintre atomi. In cazul unei ruperi fragile ideale intreaga energie absorbita se consuma in procesul de creare de noi suprafete, fara sa se piarda nimic pentru deformarea plastica. Deoarece forta care actioneaza intre atomii unui corp depinde de distanta, r , dintre acestia, se poate presupune o variatie sinusoidala a tensiunii caracterizata de amplitudinea σ_{\max} si lungimea de unda λ (fig.) sub forma:

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (3.34)$$

Unde: $x=r-r_0$ este deplasare reciproca a atomilor.

Pentru deplasari mici, relatia (3.34) devine:

$$\sigma \cong \sigma_{\max} \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (3.35)$$

Pe baza legii lui Hooke putem scrie:

$$\sigma = E \frac{x}{r_0} \quad (3.36)$$

Unde: E este modulul de elasticitate longitudinal,
 r_0 , parametrul de retea.

Egalarea relatiilor (3.35) si (3.36) duce la :

$$\sigma_{\max} = \frac{\lambda E}{2\pi r_0} \quad (3.37)$$

Energia necesara producerii ruperii, raportata la unitatea de suprafata sau lucrul mecanic efectuat in timpul ruperii, raportat la unitatea de suprafata este egal cu suprafata de sub curba $\sigma = f(r)$, in domeniul $r_0-r_0+\lambda/2$:

$$U = \int_{r_0}^{r_0+\lambda/2} \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\sigma_{\max} \lambda}{\pi} \quad (3.38)$$

Considerand energia unitatii de suprafata γ_s si presupunand ca lucrul mecanic consumat pentru rupere a condus la crearea a doua noi suprafete, se poate scrie:

$$\frac{\sigma_{\max} \lambda}{\pi} = 2\gamma_s \quad (3.39)$$

Prin eliminarea parametrului λ intre relatiile (3.37) si (3.39) se obtine expresia rezistentei teoretice la rupere:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{r_0}} \quad (3.40)$$

Pe baza relatiilor de mai sus s-a demonstrat ca valorile teoretice ale rezistentei la rupere depasesc cu cateva ordine de marime (10 pana la 1000 de ori) valorile experimentale pentru majoritatea materialelor. Numai rezistenta la rupere a cristalelor filiforma (whiskeri) din metalele lipsite de dislocatii se apropie de rezistenta teoretica.

Pe baza rezultatelor obtinute s-a tras concluzia ca reseaua cristalina a materialelor nu este perfecta, asa cum s-a presupus in modelul pe baza caruia s-au facut calculele, ci aceasta contine anumite defecte si imperfectiuni care explica valorile mai scazute ale rezistentei la rupere.

Ruperea materialelor fragile ideale. Teoria lui Griffith.

Prima explicatie pe baze stiintifice a diferentei mari constatate intre rezistenta la rupere teoretica si cea experimentală a fost data de Griffith.

La baza teoriei lui Griffith sta ipoteza existentei in material a unor microfisuri, care produc o concentrare de tensiuni suficient de mare ca, in anumite zone sa se atinga valoarea rezistentei teoretice, chiar daca tensiunea nominala aplicata asupra materialului este mult mai mica decat rezistenta teoretica. Cand una dintre fisuri se propaga dand nastere unei rupei fragile, ea produce o marire a suprafetei fisurii. Aceasta necesita o energie suplimentara pentru a invinge forta de coeziune a atomilor, sau cere o crestere a energiei de suprafata. Sursa cresterii energiei de suprafata este energia de deformare elastica care este eliberata atunci cand se propaga fisura.

Criteriul lui Griffith permite determinarea tensiunii necesare propagarii unei fisuri intr-un material fragil ideal , in care deformatiile plastice sunt excluse. In demonstrarea teoriei sale, Griffith a considerat o placa subtire supusa la o tensiune de intindere uniaxiala, σ , placa in care se afla o fisura eliptica de lungime $2c$, conform figurii 3.20 .

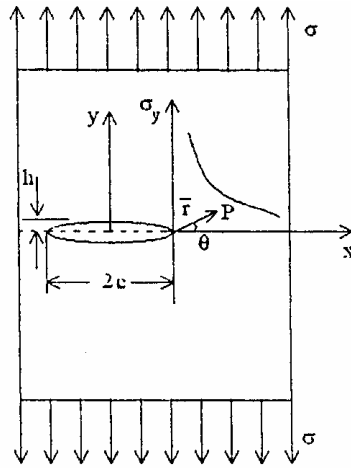


Fig. 3.20

Extinderea fisurii se face pe seama variatiei energiei de deformare elastica a retelei si a variatiei energiei de suprafata.

Pe baza teoriei lui Griffith, fisura se va propaga sub actiunea efortului constant σ , daca o crestere incrementală a lungimii fisurii nu duce la modificarea energiei totale a sistemului; cresterea energiei de suprafata este compensata de scaderea energiei de deformare elastica. In teoria elaborata de Griffith s-a considerat o placa subtire supusa la o tensiune de întindere uniaxială, σ , placa in care se afla o fisura eliptică de lungime $2c$. Extinderea fisurii se face pe seama variatiei energiei de deformare elastica a retelei cu cantitatea $\Delta U_e = -\pi c^2 \sigma^2 / E$ si a variatiei energiei de suprafata cu cantitate $\Delta U_s = 4c\gamma_s$.

Energia totală, considerata pe unitatea de suprafata, care intra in acest proces va fi:

$$U = \Delta U_s + \Delta U_e = 4c\gamma_s - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \quad (3.41)$$

Pe masura ce fisura se propaga, energia de deformare se relaxeaza, inmagazanandu-se in energie de suprafata.

Daca intre aceste procese exista un echilibru, fisura este stabila, in caz contrar, fisura se propaga instabil. Conditia de instabilitate poate fi exprimata matematic prin relatia:

$$\frac{d\Delta U}{dc} = 0 = \frac{d}{dc} \left(4c\gamma_s - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \right) \quad (3.42)$$

sau

$$4\gamma_s - \frac{2\pi c \sigma^2}{E} = 0 \quad (3.43)$$

Din relatia (3.43) rezulta tensiunea normală necesara pentru propagarea unei fisuri, in conditiile starii plane de tensiune:

$$\sigma_f = \left(\frac{2\gamma_s E}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (3.44)$$

unde: γ_s este energia de suprafata,

E , modulul de elasticitate longitudinal,

Pentru starea plana de deformatii expresia tensiunii este:

$$\sigma_f = \left(\frac{2\gamma_s E}{\pi(1-\nu^2)c} \right)^{1/2} \quad (3.45)$$

unde ν este coeficientul lui Poisson sau coeficient de contractie transversala.

Din relatia lui Griffith scrisa sub forma (3.44) sau (3.45), se observa ca tensiunea necesara pentru propagarea fisurii este cu atat mai mica cu cat lungimea fisurii este mai mare.

Teoria lui Griffith permite obtinerea, prin calcul, a unor valori satisfacatoare ale rezistentei la rupere a materialelor fragile ideale ca, de exemplu, sticla. La materialele metalice, calculele indica lungimi ale fisurilor de cativa milimetri, fapt care nu se intalneste in mod real. La materialele metalice, fie ele ductile sau fragile, fisurile se formeaza prin deformare plastica.

Ruperea materialelor fragile reale

1. Teoria lui Orowan

Orowan a aratat ca ecuatia lui Griffith devine compatibila cu ruperea materialelor fragile reale, daca energiei de suprafata, γ_s , i se adauga si lucrul mecanic de deformare plastica necesar extinderii fisurii, γ_p :

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (3.46)$$

Deoarece γ_p are valori mult mai mari decat γ_s (10^2 - 10^3 J/m fata de 1J/m) in ecuatia (3.46) se poate neglija energia de suprafata astfel ca, pentru materialele metalice fragile, se poate scrie:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_p}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (3.47)$$

2. Teoria lui Irwin

Relatia lui Griffith, (3.45), cat si cea obtinuta de Orowan, (3.47), sunt dificil de aplicat in mod practic. Ele impun cunoasterea cantitativa a unei marimi greu de masurat, cum este tensiunea de suprafata, sau insuficient de clar definite.

Pe baza teoriei ruperii a lui Irwin, pentru o fisura eliptica de lungime $2c$ dintr-o placa infinita supusa unei tensiuni normale, σ , perpendiculara pe planul fisurii, forta care actioneaza pe unitatea de lungime a frontului fisurii este:

$$G_f = \frac{\pi c \sigma^2}{E} \quad (3.48)$$

Marimea G_f , poarta numele de forta de extensie a fisurii sau viteza de relaxare a energiei de deformare.

Ruperea are loc cand tensiunea normala atinge valoarea critica, σ_f , la care propagarea fisurii devine instabila si forta de extensie a fisurii capata o valoare critica, $G_f=G_{fc}$, adica:

$$G_{fc} = \frac{\pi c \sigma_f^2}{E} \quad (3.49)$$

Din relatia de mai sus rezulta expresia tensiunii de fisurare:

$$\sigma_f = \left(\frac{G_{fc} E}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (3.50)$$

Cu cat G_{fc} este mai mare, cu atat materialul are o capacitate mai mare de a se opune ruperii fragile.

Teoria mecanicii ruperii

O alternativa la abordarea energetica prezentata de teoriile de mai sus (Griffith, Irwin, Orowan) are la baza calcularea tensiunilor. O fisura produce atat o concentrare de tensiuni, dar perturba si starea de tensiune in vecinatatea ei. Pe baza teoriei elasticitatii, in cazul starii plane de deformatii, intr-un punct $P(r,\theta)$ conform fig.3.20, componentele campului de tensiuni sunt:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.51)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.52)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.53)$$

Unde: ν este coeficientul lui Poisson,

K_I , factor de intensitatea tensiunii, indicele I referindu-se la modul I de propagare a fisurii (Fig. 3.21).

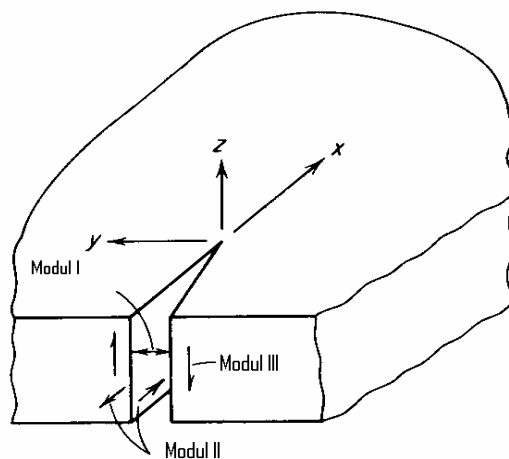


Fig. 3.21

Factorul de intensitate a tensiunii K , reprezinta o masura a cresterii intensitatii tensiunii in prezenta unei fisuri fata de tensiunea ce exista in piesa, in absenta fisurii. Deci ruperea are loc cand K atinge o valoare critica K_c . Determinandu-se K pentru o proba considerata etalon, aceasta se poate aplica si altor piese daca se cunoaste calibrarea.

In cazul unei placi infinite supusa unei tensiuni, expresia factorului de intensitate a tensiunii este:

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi c} \quad (3.54)$$

Unde α exprima efectul geometriei piesei asupra factorului de intensitate a tensiunii. Rel. in care se considera ca $\alpha=1$, este similara cu relatia din teoria lui Irwin obtinuta in abordarea energetica. Deci pentru starea plana de tensiune avem:

$$G_v = \frac{K^2}{E} \quad (3.55)$$

Pentru starea plana de deformatii vom avea:

$$G_v = \frac{1-\nu}{2G} K^2 \quad (3.56)$$

In cazul in care tensiunea aplicata atinge valoarea critica σ_f , tensiunea normala necesara propagarii instabile a fisurii, factorul de intensitate a tensiunii capata o valoare critica K_c , numita tenacitatea ruperii si reprezinta o constanta de material.

Tenacitatea la rupere caracterizeaza comportarea fragila sau ductila a materialelor. Pentru K_c mic se manifesta tendinta de rupere fragila, iar pentru K_c mare tendinta de rupere ductila.

Raza de curbura la varful fisurii

Orificiul eliptic dintr-o placa subtire, fig. , va degenera intr-o fisura in conditiile in care raza de curbura la varful fisurii, ρ , indeplineste conditia:

$$\rho = p = \frac{h^2}{c} \ll c \quad (3.57)$$

Unde p este parametrul elipsei.

Pe baza teoriei elasticitatii, Inglis a stabilit ca pentru modul I de propagare a fisurii, tensiune maxima ce apare la extremitatile axei mari a elipsei este:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + \frac{2c}{h}\right) \quad (3.58)$$

Inlocuind in relatia (3.58) marimea h prin raza de curbura la varful fisurii data de rel. (3.57) rezulta:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}}\right) \approx 2\sigma \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (3.59)$$

Fisura se va propaga numai daca tensiunea normala invinge fortele de legatura dintre atomi, adica:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{coeziune}} \quad (3.60)$$

In aceste conditii, tensiunea σ , capata valoarea critica necesara propagarii fisurii, σ_f , iar σ_{\max} , valoarea rezistentei teoretice la rupere. Astfel rel. (3.59) devine;

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_f \sqrt{\frac{c}{\rho}} = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{r_0}} \quad (3.61)$$

De unde rezulta:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E\rho\gamma_s}{4cr_0}} \quad (3.62)$$

Comparand expresiile (3.59) si (3.61) se obtine ca:

$\rho = \frac{8}{\pi} r_0 \approx 3r_0$, adica raza de curbura la varful unei fisuri active este necesar sa fie de aproximativ trei distante atomice.

Germinarea microfisurii

Germinarea fisurilor se realizeaza printr-un mecanism care are la baza dislocatiile. La scara atomica, o dislocatie poate fi considerata drept o microfisura; aceasta dezvoltandu-se prin concentrarea dislocatiilor la diferite obstacole de pe planele de alunecare: limite de gaunte, suprafete de macle, incluziuni, etc.

Indiferent de tipul ruperii, fragil sau ductil, germinarea microfisurilor este determinata de actiunea componentelor tangentiala din planele de alunecare. Tensiunea critica, τ_N , necesara germinarii unei microfisuri depinde de mecanismul prin care se formeaza microfisura. Luand in considerare gruparea dislocatiilor la un obstacol, cele n dislocatii vor forma o microfisura cu latimea $D=nb$ si lungimea $2c$, unde cu b s-a notat modulul vectorului Burgers (Fig.3.22).

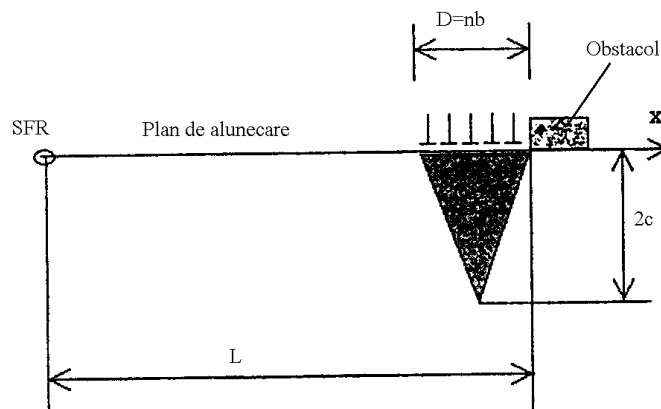


Fig.3.22

Microfisura devine activa, in momentul in care tensiunea de intindere, σ_L , care actioneaza la varful fisurii este cel putin egala cu tensiunea teoretica de rupere, σ_t . Tinand seama de expresia tensiunii de intindere intr-un punct $P(r, \theta)$, situat in fata gruparii de dislocatii si de expresia tensiunii teoretice de rupere, conditia ca o microfisura sa devina activa poate fi exprimata:

$$\tau_s \sqrt{\frac{L}{r}} \geq \sqrt{\frac{E\gamma_s}{r_0}} \quad (3.63)$$

Unde: τ_s reprezinta tensiunea efectiva pe planul de alunecare,

L este distanta de la sursa de dislocatii la obstacol.

Deoarece:

$$\tau_s = \tau - \tau_i \quad (3.64)$$

Unde: τ este tensiunea aplicata pe planul de alunecare, tensiune care in momentul germinarii atinge valoarea critica, τ_N , iar τ_i este contratensiunea generata prin gruparea dislocatiilor, conditia (3.64) poate fi scrisa la limita:

$$\tau_N = \tau_i + \sqrt{\frac{Er\gamma_s}{Lr_0}} \quad (3.65)$$

Inlocuind in ec. (3.65) modulul de elasticitate longitudinal cu cel transversal, luand $r=r_0$ si admitand ca sursa de dislocatii se afla in centrul unui graunte de dimensiune d , adica $L=d/2$, se obtine:

$$\tau_N = \tau_i + \sqrt{\frac{2G\gamma_m}{d}} \quad (3.66)$$

Unde $\gamma_m = 2(1+\nu)\gamma_s$ reprezinta energia cheluita la varful unei fisuri de clivaj care se propaga in interiorul unui graunte dintr-un material policristalin.

Criteriul de rupere fragila este dat de relatia:

$$\tau_N < \tau_c \quad (3.67)$$

Unde τ_c este tensiunea de curgere.

Tinand cont de ec. () si de relatia lui Petch pentru exprimarea tensiunii de curgere, conditia () devine:

$$\tau_i + \sqrt{\frac{2G\gamma_m}{d}} < \tau_i + K'_y d^{-1/2} \quad (3.68)$$

Unde $K'_y = \sqrt{\frac{4Gb\tau_0}{\pi(1-\nu)}}$ este un coeficient care reprezinta o masura a efectului

dislocatiilor aglomerate la limita de graunte, iar τ_0 este limita de curgere a materialului considerat sub forma de monocristal.

In aceste conditii, criteriul de rupere se scrie:

$$K'_y > \sqrt{2G\gamma_m} \quad (3.69)$$

Propagarea microfisurii

Dupa germinarea fisurii, incepe stadiul de propagare a ei in grauntele in care a fost germinata. Propagarea microfisurii si dezvoltarea ei intr-o forma macroscopica este determinata, la ruperea fragila, de actiunea tensiunilor normale si la ruperea ductila de componentele tangentiale.

Din punct de vedere energetic, microfisura cuprinde patru contributii: energia proprie a grupului de n dislocatii grupate la un obstacol, energia suprafetelor create pri rupere, energia de relaxare elastica a retelei in urma formarii microfisurii si lucrul mecanic

efectuat de campul de tensiuni in procesul de crestere a volumului ca urmare a propagarii fisurii. Insumand aceste componente energetice, considerate pe unitatea de lungime, se obtine:

$$U = \frac{Gnb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + 4c\gamma_m - \frac{\pi\sigma^2\sigma_f^2}{G} - \sigma b c \quad (3.70)$$

Unde r_1 , respectiv r_0 sunt dimensiunile dislocatiei si amiezului acesteia intr-o directie perpendiculara pe lungimea dislocatiei.

Tinand seama de ec (), ecuatia () devine:

$$U = \frac{Gnb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + 2c\gamma_m - \sigma b c \quad (3.71)$$

Si astfel, conditia ca fisura sa se propage instabil, $\frac{\partial U}{\partial c} \leq 0$, poate fi scisa astfel:

$$2\gamma_m - \sigma b \leq 0 \quad (3.72)$$

Numarul de dislocatii care s epot grupa la un obstacol pe o lungime L este $n = \frac{\pi k \tau_s L}{Gb}$,

unde constanta k ia valorile $1-\nu$ sau 1, dupa cum dislocatia este marginala sau elicoidala.

Viteza de propagare a fisurii

Ruperea fragila nu este posibila daca fisurile care se formeaza nu s epot propaga cu viteza mare prin material. Pornind de la ideea echilibrului dintre energia de deformare elastica eliberata prin propagarea fisurii, energia inmagazinata in noile suprafete formate prin rupere si energia cinetica produsa prin deplasarea rapida a materialului aflat de o parte si de alta a fisurii, Mott a determinat expresia vitezei de propagare a fisurii sub forma:

$$V = Bv_0 \left(1 - \frac{c_c}{c}\right) \quad (3.73)$$

Unde: B este o constanta care, in cazul starii plane de tensiune, are valoarea 0,38, v_0 este viteza sunetului prin material, c_c este lungimea critica a unei fisuri Griffith, c este lungimea microfisurii reale.

Ruperea ductila

Ruperea ductila este un proces ce se desfasoara cu un consum energetic ridicat, fiind insotit de o deformatie plastica totala apreciabila. Spre deosebire de ruperea fragila, ruperea ductila este caracterizata de o propagare stabila a fisurii; daca sarcina care determina propagarea fisurii inceteaza, fisura se opreste.

Ruperea ductila este insotita de o cantitate mare de deformare plastica. Acest lucru permite ca in urma unui studiu microscopic sa se faca usor deosebirea intre o rupere ductila si una fragila. O alta caracteristica ce diferentiaza cele doua forme de rupere o constituie numarul de fragmente rezultate. In cazul ruperii ductile cea mai mare parte a energiei consumate este transformata in deformare plastica in timp ce in cazul ruperii

fragile ea conduce la crearea de noi suprafețe. În consecință, ruperea ductilă, în comparație cu cea fragilă, este urmată de formarea unui număr redus de fragmente.

Ruperile ductile se produc la tensiuni situate deasupra rezistenței la curgere a materialului.

În timpul prelucrării materialelor prin tracțiune pot apărea diferite tipuri de ruperi ductile: ruperea prin forfecare (la monocristale), ruperea con-cupa și cupa dublă (la policristale). În cazul ruperii prin forfecare, deformarea plastică este localizată pe anumite plane și direcții și se asociază în majoritatea cazurilor cu viteze mari de deformare având drept rezultat alunecarea unei jumătăți a barei peste cealaltă.

Ruperea con-cupa constituie tipul cel mai obișnuit de rupere ductilă. Ea se produce, mai întâi, în urma coalescenței golurilor la centrul barei, formând cupa și apoi se extinde la suprafețele exterioare prin forfecare, în urma căreia ia naștere conul (Fig.).

În ce privește aspectul microscopic, aproape invariabil, ruperea ductilă este transgranulară.

Tensiunea de menținere în mișcare a fisurii

În corpurile fragile ideale, când tensiunea a atins nivelul corespunzător ruperii, σ_f , o fisură de dimensiune critică, c_c , se extinde rapid, iar tensiunea necesară menținerii fisurii în mișcare, σ_m , scade pe măsura extinderii ei. La materialele metalice, chiar cele considerate foarte fragile, ruperea este precedată de deformări plastice necesare germinării fisurii. Mecanismul procesului de rupere depinde de emarimea energiei de deformare plastică, de viteza de propagare a fisurii, de temperatură și de natura materialului. După ce fisura a atins dimensiunea ei critică, tensiunea necesară menținerii fisurii în mișcare, σ_m , va fi determinată de suma dintre energia superficială a fisurii, γ_s , și lucrul de deformare plastică necesar extinderii fisurii, γ_p . În condițiile stării plane de tensiune, se poate scrie:

$$\sigma_m = \left[\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi c} \right]^{1/2} \quad (3.74)$$

Din relația de mai sus se observă că tensiunea necesară menținerii fisurii în mișcare scade odată cu creșterea fisurii.

Factori de influență ai comportării la rupere

Comportarea ductilă sau fragilă a unui material este determinată de o serie de factori interni sau externi.

Ruperea aceluiași material poate avea un caracter fragil respectiv ductil după cum ne situăm la temperaturi sub sau deasupra unei temperaturi critice. Fenomenul poartă numele de tranziție ductil-fragil. Temperatura critică este determinată de relația dintre limita de curgere a materialului și tensiunile implicate în proces (tensiunea aplicată din exterior σ_f , tensiunea consumată în proces σ_G).

Temperatura de tranziție variază în funcție de câțiva factori grupați în: factori operaționali, factori structurali, factori externi.

Factorii operationali se refera la : starea de tensiune, geometria corpului, viteza de aplicare a sarcinilor.

Starea de tensiune are ca parametru determinant coeficientul de rigiditate, dat de relatia:

$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} \quad (3.75)$$

Cele doua tensiuni maxime se exprima functie de tensiunile si deformatiile principale prin:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma_{\max} = E \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

Pe baza celor de mai sus rel. (3.75) devine :

$$\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_1 - 0,5(\sigma_2 + \sigma_3)} \quad (3.76)$$

Pentru principalele tipuri de solicitari, valorile coeficientului de rigiditate sunt:

$\alpha = 0$, pentru starea sferica de tensiuni ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)

$\alpha = 0,5$, pentru starea liniara de tensiuni ($\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$)

$\alpha = \infty$, pentru compresiune pe trei directii.

Un coeficient de rigiditate de valoare ridicata indica tendinta materialului de a se rupe ductil.

Geometria corpului influenteaza comportarea la rupere prin modificarea starii de tensiune. Astfel, prezenta pe suprafata materialului a unor crestaturi sau asperitati mareste riscul unei comportari fragile. Crestaturile actioneaza in sensul scaderii coeficientului de rigiditate, cu atat mai mult cu cat gradul de ascutire la varful lor este mai mare.

Cu cat viteza de aplicare a sarcinii este mai ridicata, cu atat caracteristicile fragile ale materialului sunt mai accentuate.

Factorii structurali se refera la : natura, structura si compozitia chimica a materialului. Acesti factori se refera la : marimea de graunte d , fortele de frecare interne care se opun miscarii dislocatiilor, σ_i , factorul microscopic de intensitate a tensiunii, k_y , energia consumata la varful fisurii pentru propagarea ei, γ_m , modulul de elasticitate transversal, G .

Factorii externi se refera la : temperatura, actiune coroziva si fragilizanta a mediului si iradiere cu neutroni. Cresterea temperaturii conduce la marirea tendintei de comportare ductila a unui material.

Variatia limitei de curgere cu temperatura, in conditii de mentinere constanta a alungirii si a vitezei de deformare, poate fi exprimata sub forma:

$$\sigma = C e^{\frac{Q}{kT}} \quad (3.77)$$

unde: Q este energia de activare a curgerii plastice,

k , constanta lui Boltzman,

T , temperatura absoluta,

C , constanta de proportionalitate.

Cresterea temperaturii modifica si caracterul ruperii, de la transgranular la intergranular.

Iradierea cu neutroni, ca si actiunea coroziva a mediului, actioneaza in sensul cresterii temperaturii de tranzitie, respectiv, a cresterii tendintei de comportare fragila a

materialelor metalice. In ce priveste actiunea mediului coroziv se poate vorbi despre fragilizarea cu hidrogen, fragilizarea la revenire, fragilizarea la albastru.

Ruperea la fluaj

Fenomenul fluajului apare atat la temperature normale, dar in special la temperature ridicate, cand asupra corpului se actioneaza cu o stare de tensiune un timp foarte indelungat. In aceasta situatie, materialul metallic se deformeaza plastic la tensiuni constante si in general mult mai mici ca limita sa de curgere.

Fluajul reprezinta capacitatea materialelor metalice de a se deforma in timp, lent si continuu sub actiunea unor sarcini constante. La temperature ridicate, deformatia obtinuta prin fluaj are valori importante, in special cand $T > 0,4T_{top}$.

Studiul fenomenului de fluaj se poate efectua pe baza variatiei in timp a deformatiilor pentru o tensiune si o temperature constanta respective pe baza curbelor de fluaj (Fig.3.23) a carei panta este viteza de deformare care se numeste viteza de fluaj.

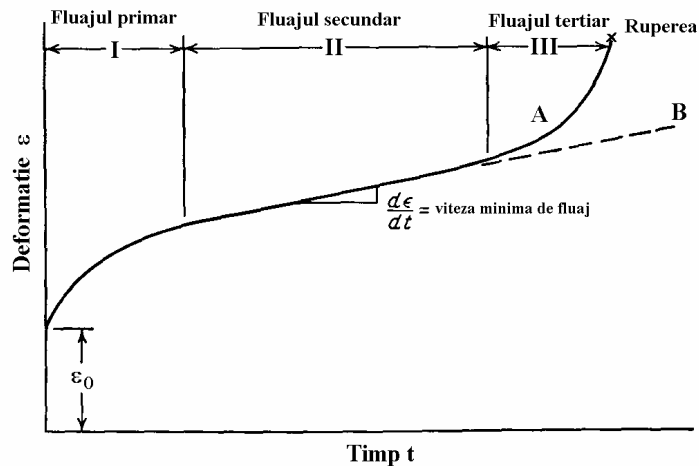


Fig. 3.23

Pe curba de fluaj se pot identifica 3 zone distincte, care corespund unor regimuri diferite de fluaj:

- zona I este caracterizata printr-o viteza de fluaj descrescatoare si poarta numele de zona fluajului primar sau nestabilizat;
- zona II este caracterizata de o variatie liniara a deformatiei in timp, viteza de fluaj fiind constanta si se numeste zona fluajului secundar sau stabilizat. Valoarea medie a vitezei de fluaj in aceasta zona se numeste viteza maxima de fluaj (v_f);
- zona III se caracterizeaza prin cresterea rapida a vitezei de fluaj pana in momentul ruperii ca urmare a accentuarii gaturirii si poarta numele de zona fluajului tertiar sau accelerat.

Forma curbelor de fluaj depinde mult de temperature si tensiunea de incercare. La tensiuni si temperature ridicate se produce o reducere considerabila a zonei fluajului

secundar, fluajul tertiar si ruperea materialului producandu-se mult mai repede. La tensiuni mici si temperaturi scazute, pe curba de fluaj va lipsi zona fluajului tertiar. Din punct de vedere a mecanismelor prin care se realizeaza fluajul se poate considera ca acesta se obtine din suprapunerea a trei procese(Fig.3.24):

1. deformarea instantanee aparuta la aplicarea tensiunii;
2. fluajul tranzitoriu, care predomina in zona fluajului primar si care este caracterizat de o viteza de fluaj continuu descrescatoare, apropiindu-se de o valoare minima constanta in zona fluajului secundar;
3. fluajul viscos , care predomina in zona fluajului secundar si care este caracterizat de o viteza de deformatie constanta.

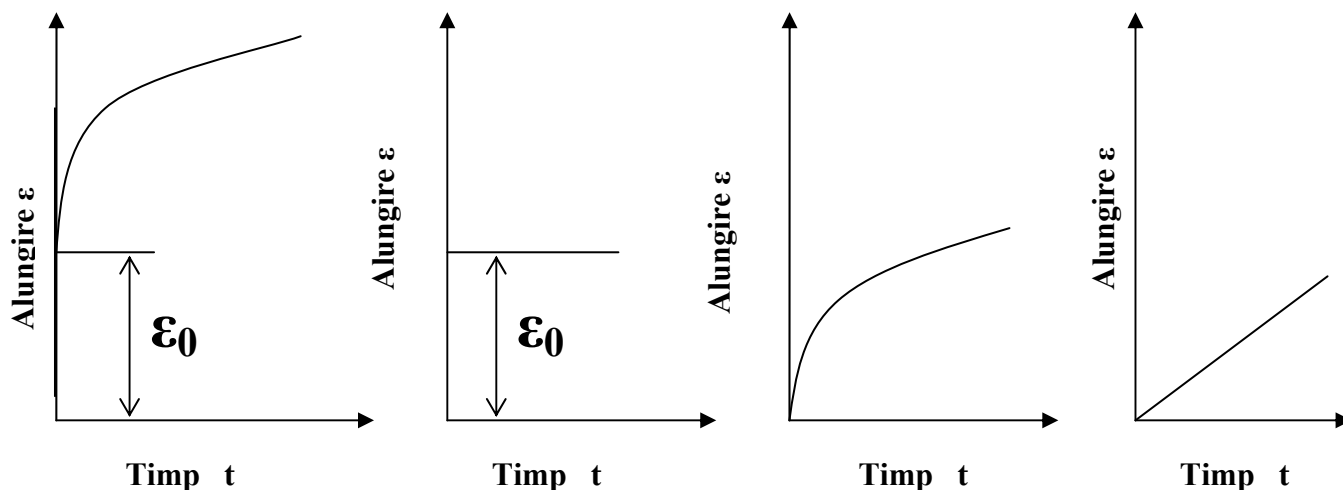


Fig. 3.24

Fluajul tranzitoriu apare la toate temperaturile, in timp ce fluajul viscos se produce in special la temperaturi mai mari de $0,4T_{top}$.

Cottrel a stabilit relatia ce defineste viteza de fluaj sub forma:

$$\dot{\epsilon} = At^{-n} \tag{3.78}$$

unde: A, n sunt constante
t, timpul.

Pentru n=1 se obtine ecuatiile care descrie fluajul tranzitoriu produs la temperaturi joase:

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = \alpha \ln t \tag{3.79}$$

unde α este o constanta.

Ecuatia fluajului tranzitoriu la temperaturi ridicate se obtine din relatia (3.78) pentru n=2/3:

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = \beta t^{1/3} \tag{3.80}$$

unde β este o constanta.

In cazul in care n=0, se obtine ecuatiile care descrie fluajul viscos:

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = \gamma t \tag{3.81}$$

unde γ este o constanta.

Aparitia fenomenului de fluaj se explica prin depasirea obstacolelor de catre dislocatii. Obstacolele, care se opun deplasarii dislocatiilor si deci deformarii, sunt depasite sub actiunea combinata a tensiunii si fluctuatiilor termice. La temperaturi aflate sub $(0,4-0,5)T_{top}$, atunci cand fenomenul de difuzie este neansemnat, depasirea obstacolelor de catre dislocatii se realizeaza prin procese care nu implica difuzia. Deoarece la aceste temperaturi fluajul este tranzitoriu, rezulta ca acest tip de fluaj este determinat de procese necontrolate de difuzie. Fluajul tranzitoriu consta in mici deformatii plastice obtinute prin activare termica. Fiecare noua deformatie duce la cresterea ecruisarii materialului, iar viteza de fluaj scade continuu.

La temperaturi situate peste $(0,4-0,5)T_{top}$, cand au loc procese de difuzie, apare fluajul secundar sau fluaj γ , ca urmare a producerii echilibrului intre ecruisare si restaurare. Efectele ecruisarii sunt echilibrate, in urma faptului ca, din gruparile de dislocatii, scapa dislocatii elicoidale si marginale: primele printr-un proces de alunecare

Peste obstacole, cele din urma prin catarare. Fenomenele de difuzie se produc mai usor de-a lungul limitelor dintre graunti decat in interiorul acestora. De aceea in cazul unui material policristalin cu graunti mici, fluajul este mai puternic decat la un material cu granulatie mare.

La aparitia fluajului de temperatura inalta, pe langa difuzie, contribuie si alte fenomene cum sunt: alunecarea limitelor de graunte (procesul de curgere a grauntilor unul peste altul) si alunecarea dupa alte sisteme de alunecare decat cele caracteristice structurii respective.

CAPITOLUL 4

REZISTENȚA LA DEFORMARE ȘI DEFORMABILITATEA METALELOR ȘI ALIAJELOR

3.2. Factorii de influență ai rezistenței la deformare

Influența gradului de deformare asupra rezistenței la deformare Curbele ecruisării

Caracteristicile mecanice σ_c si σ_r (rezistența la curgere și rezistența la rupere) obținute prin încercări la tracțiune dau numai o imagine convențională asupra rezistenței materialului. La prelucrările prin deformare plastică este necesar să se cunoască caracteristicile mecanice reale, mai exact rezistența reală la deformare în funcție de gradul de deformare dat.

Pentru aceasta se poate folosi următoarea relație:

$$\sigma_{real} = C_{\sigma} \delta^n \quad (4.8)$$

unde: σ_{real} este rezistența reală la deformare

C_{σ} - coeficient care reprezintă rezistența reală la deformare pentru $\delta=1$

δ - gradul de deformare logaritmic ($\delta = \ln L/L_0$, L_0 fiind lungimea inițială și L - lungimea epruvetei deformată)

n – coeficient de ecrusare

Variația schematică a rezistenței la deformare cu gradul de deformare pentru un policristal este prezentată în figura 4.2.

S-a observat că variația lui σ_{real} după relația 1 are loc numai la începutul deformării, adică până la o mărime $\delta = 0,3 \dots 0,4$. Peste această valoare creșterea lui σ_{real} se apropie mai mult de legea:

$$\sigma_{real} = \sigma_0 + m\delta \quad (4.9)$$

unde σ_0 este valoarea obținută pe ordonată prin prelungirea tangentei dusă la curbă

m – coeficient care reprezintă intensitatea ecrusării ($m = \tan \alpha$, fig.1)

Curbele ecrusării pot fi realizate experimental prin măsurători făcute la anumite stadii ale deformării folosind relația:

$$\sigma_{real} = \sigma \frac{A_0}{A_{real}} \quad (4.10)$$

unde: A_0 este secțiunea inițială a epruvetei

A_{real} - secțiunea epruvetei la momentul măsurării

σ - rezistența convențională dată de relația $\sigma = F/A_0$, F fiind forța măsurată la momentul considerat.

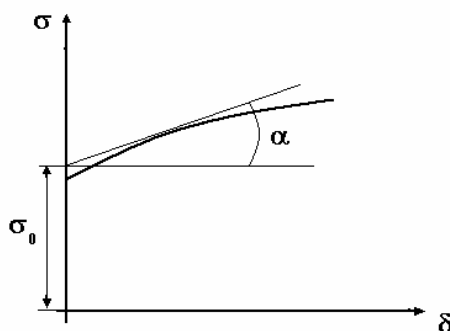


Fig.4.2

Considerand că volumul epruvetei nu se modifică în timpul deformării poate fi scrisă relația:

$$A_0 l_0 = A_{real} l_{real} \quad (4.11)$$

sau

$$\frac{A_0}{A_{real}} = \frac{l_{real}}{l_0} \quad (4.12)$$

unde l_0 este lungimea inițială și l_{real} - lungimea epruvetei deformată la momentul măsurării

Dar:

$$\frac{A_0}{A_{real}} = \frac{A_0}{A_{real} - A_0 + A_0} = \frac{1}{\frac{A_0 - A_0 + A_{real}}{A_0}} = \frac{1}{1 - \psi} \quad (4.13)$$

și

$$\frac{l_{real}}{l_0} = \frac{l_{real} - l_0 + l_0}{l_0} = \frac{l_0}{l_0} + \frac{l_{real} - l_0}{l_0} = 1 + \varepsilon \quad (4.14)$$

deci σ_{real} se va putea exprima și astfel:

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.15)$$

sau

$$\sigma_{real} = \sigma \frac{1}{1 - \psi} \quad (4.16)$$

În mod aproximativ curbele ecruisării se pot trasa folosind mărimea alungirii relative ε sau a gaturii relative ψ în momentul apariției gaturii, adică atunci când forța de tracțiune este maximă.

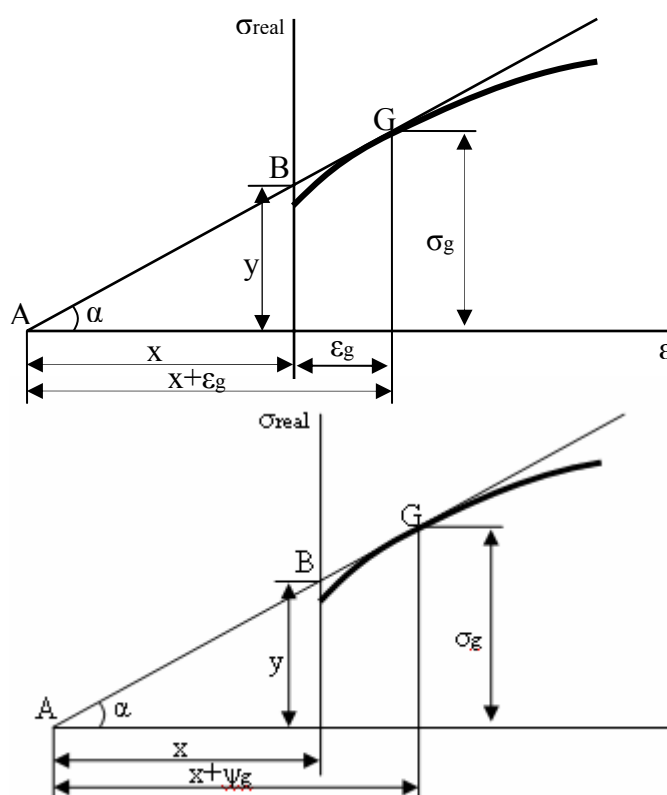


Fig.3.3

Fig. 3.3 Construcția grafică a curbei $\sigma_{real}-\varepsilon$ Fig. 3.4 Construcția grafică a curbei $\sigma_{real}-\psi$

$\sigma_{real}-\varepsilon$

$\sigma_{real}-\psi$

Pornind de la relația:

$$F = \sigma_{real} A_{real} \quad (4.17)$$

Diferențind relația de mai sus se obține:

$$dF = \sigma_{real} dA_{real} + A_{real} d\sigma_{real} \quad (4.18)$$

Din relațiile 4.11,4.12,4.13,4.14 se deduce că:

$$A_{real} = \frac{A_0}{1 + \varepsilon}$$

și

$$dA_{real} = -\frac{A_0 d\varepsilon}{(1 + \varepsilon)^2}$$

Aceste relații introducându-le în relația 4.18 se obține:

$$dF = -\sigma_{real} \frac{A_0 d\varepsilon}{(1 + \varepsilon)^2} + \frac{A_0}{1 + \varepsilon} d\sigma_{real} \quad (4.19)$$

Pentru începutul gătuirii, când $F=F_{max}$, $dF=0$, $\sigma_{real}=\sigma_g$, $\varepsilon=\varepsilon_g$, $\sigma=\sigma_r$ se poate scrie că:

$$\sigma_g \frac{d\varepsilon}{1 + \varepsilon_g} - d\sigma_{real} = 0$$

sau

$$\frac{d\sigma_{real}}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_g}{1 + \varepsilon_g} \quad (4.20)$$

$\frac{d\sigma_{real}}{d\varepsilon}$ este tangenta curbei ecruisării în punctul de gatuire. Din relația 4.15 rezultă că

$$\text{pentru } \sigma_{real} = \sigma_g \text{ (si } \sigma = \sigma_r), \frac{\sigma_g}{1 + \varepsilon} = \sigma_r$$

Prin urmare:

$$tg \alpha = \frac{d\sigma_{real}}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_g}{1 + \varepsilon_g} = \frac{\sigma_r}{1} \quad (4.21)$$

Din construcția grafică (fig.4.4) scriind relațiile:

$$tg \alpha = \frac{d\sigma_{real}}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_g}{x + \varepsilon_g} = \frac{y}{x} \quad (4.22)$$

și comparându-le cu cele scrise mai sus rezultă:

$$x=1, y=\sigma_r$$

Dacă în relația 4.18 se înlocuiește A_{real} și dA_{real} în funcție de gatuirea relativă:

$$A_{real} = A_0(1 - \psi)$$

și

$$dA_{real} = -A_0 d\psi$$

se obține:

$$dF = -\sigma_{real} A_0 d\psi + A_0(1 - \psi) d\sigma_{real} \quad (4.23)$$

În condiții asemănătoare cu cazul precedent, când $F=F_{max}$, $dF=0$, $\sigma_{real}=\sigma_g$, $\sigma=\sigma_r$, $\psi=\psi_g$ se poate scrie:

$$\frac{d\sigma_{real}}{d\psi} = \frac{\sigma_{real}}{1 - \psi} \quad (4.24)$$

Folosind construcția grafică din figura 4.4 și relația de mai sus se pot scrie egalitățile:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma_{real}}{d\psi} = \frac{\sigma_g}{1-\psi_g} = \frac{\sigma_r}{(1-\psi_g)^2} = \frac{y}{x} \quad (4.25)$$

În punctul G(fig.4.4) gaturirea fiind mică se poate aprecia că:

$$(1-\psi_g)^2 = 1-2\psi_g + \psi_g^2 \approx 1-2\psi_g$$

prin urmare din relațiile de mai sus reiese că:

$$y=\sigma_r, \quad x=1-2\psi_g$$

Cunoscându-se mărimile σ_r , ψ_g și respectiv ε_g de la încercarea prin tracțiune se poate construi aproximativ curba ecruisării $\sigma_{real}-\varepsilon$ sau $\sigma_{real}-\psi$, care este adevărată numai pentru punctul G(fig.4.3,fig.4.4).

Rezultatele experimentale au arătat că înainte și după punctul G curba reală se găsește sub linia BG. Aceasta arată că intensitatea ecruisării este mai mare la începutul deformării, ea descrescând pe măsură ce ε respectiv ψ cresc.

Curba ecruisării construită prin folosirea alungirii relative este mai des utilizată însă mai puțin precisă din cauza neuniformității alungirii pe lungimea epruvetei în special pentru valori mari ale lui ε .

În cazul în care deformarea se face din mai multe porniri și opriri cu grade de deformare diferite, poate să apară o curbă experimentală fără o creștere a efortului cu gradul de deformare.

Este posibil ca la începutul unei a doua etape a deformării să aibă loc o înmuiere a metalului deformat și nu o ecruisare.

Acest fenomen are loc ca urmare a modificărilor posibile în mișcarea dislocațiilor. Pot să apară dislocații de semn opus celor apărute în etapa anterioară și să anihileze o parte din cele vechi fără a se modifica direcția forței exterioare care produce deformarea. Acest fenomen de înmuiere are loc cu atât mai pronunțat cu cât gradul de deformare anterior a avut o valoare mai mare.

Gubkin a împărțit curba ecruisării $\sigma_{real}-\varepsilon$ în patru zone(Fig.4.5):

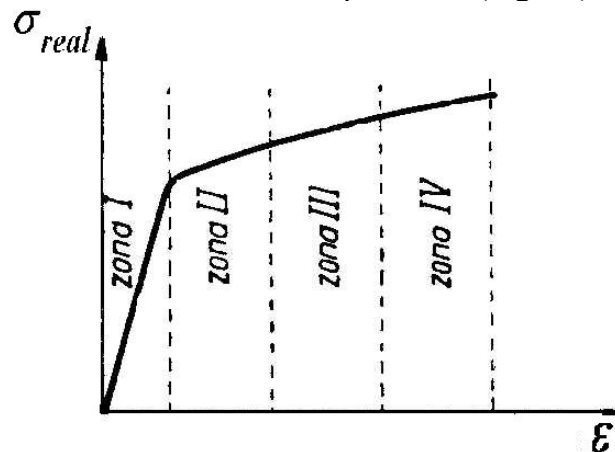


Fig.3.5

Zona I reprezintă partea din curbă unde se produc numai deformații elastice, până la limita de curgere σ_c

Zona II începe de la limita de curgere până la începutul gaturirii σ_g

Zona III începe de la punctul unde apare gatuirea ($F=F_{\max}$) și până la ruperea epruvetei prin întindere

Zona IV este prezentă numai la curbele trasate prin încercări la compresiune și corespunde deformațiilor mari, care nu pot fi atinse la deformarea prin tracțiune.