

## CAPITOLUL 6

### REGIMUL TERMIC AL DEFORMĂRII METALELOR ȘI ALIAJELOR

#### 6.1. Noțiuni introductive

Pentru ca materialele să poată fi ușor prelucrate prin deformare ele trebuie să aibă o rezistență mică la deformare și o deformabilitate mare. La majoritatea materialelor aceste condiții pot fi realizate prin încălzire.

La temperaturile la care are loc deformarea la cald rezistența la deformare este mai mică de 10...12 ori în comparație cu rezistența aceluiași material în stare rece. Deformarea la rece asigură calitate a suprafeței piesei și precizie dimensională mai bună decât deformarea la cald.

Deformarea la rece se poate aplica numai la materialele cu rezistența mai redusă la deformare și deformabilitate ridicată la temperatura ambiantă și pentru obținerea pieselor de dimensiuni mici.

Deformarea la semicald caută să îmbine avantajele ambelor procedee de deformare.

Pentru încălzire se folosesc mai multe tipuri de instalații care pot fi grupate în două mari grupe:

- instalații care folosesc pentru încălzire combustibili lichizi sau gazoși ( cuptoare cu cameră, cuptoare cu propulsie)
- instalații care folosesc pentru încălzire curentul electric (încălzirea prin inducție, prin contact)

În cuptoare, încălzirea semifabricatelor se face pe baza schimbului de căldură între spațiul de lucru al cuptorului și suprafața semifabricatului încălzit. La încălzirea electrică prin inducție sau prin contact, căldura se degajă direct în semifabricat, ceea ce face ca viteza de încălzire a semifabricatului și randamentul instalațiilor să fie mai ridicate decât la încălzirea în cuptoare cu combustibil.

Pentru alegerea unui regim termic optim este necesar a se stabili mai întâi intervalul de temperatură la care se poate face deformarea. Acest interval de temperatură este specific fiecărui material, fiind condiționat de mărimea gradului de deformare ce poate fi realizat fără să apară fisuri în piesă, în timpul deformării ei și de obținerea prin deformare a unei structuri impuse.

La încălzirea semifabricatelor pentru deformare există un interval de temperatură admis și unul tehnologic.

Intervalul de temperatură admis se stabilește astfel încât rezistența la deformare să fie mică și deformabilitatea ridicată. Din punct de vedere a rezistenței la deformare, tendința ar fi ca limita superioară de temperatură să fie cât mai ridicată. Din punct de vedere a deformabilității această limită se fixează la acea temperatură la care deformabilitatea începe să scadă. Scăderea deformabilității la temperaturi ridicate este dată de începutul creșterii excesive a grăunților și a începerii procesului de topire la limitele intercrystaline.

Aceste fenomene se produc cu atât mai intens cu cât temperatura de încălzire se apropie de temperatura de topire a materialului respectiv. Temperatura critică la care aceste fenomene încep să se producă intens se găsește cu 150-300<sup>0</sup> C sub linia solidus.

Temperatura minimă admisă pentru deformare este limitată de gradul de deformare ce se poate realiza la acea temperatură și de structura ce se urmărește să se obțină în urma deformării. Dacă în urma deformării se urmărește obținerea unei

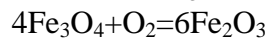
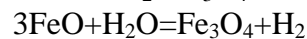
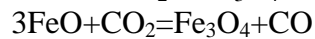
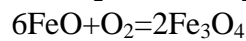
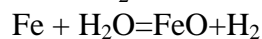
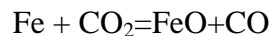
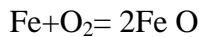
structuri complet recristalizate, atunci temperatura minimă se limitează în funcție de acest parametru, la temperaturi mai ridicate. Dacă în urma deformării se urmărește obținerea unui structuri fine se poate coborî temperatura minimă de deformare realizandu-se așa numita deformare la semicald.

Intervalul de temperatură tehnologic este acela la care are loc deformarea propriu-zisă și trebuie să fie cuprin în intervalul de temperatură admis.

La temperaturi ridicate mai ales la încălzirea în cuptoare, unde semifabricatul vine în contact cu flacăra sau gazele arse, care conțin oxigen, bioxid de carbon, vapori de apă, etc., apar fenomenele de oxidare și decarburare.

### **Oxidarea**

Intre oxigen, bioxid de carbon , vaporii de apă și oțelul care se încălzește au loc următoarele reacții chimice:



Asupra procesului oxidării oțelului au influență mai mulți factori printre care:

-compoziția gazelor arse. După cum aceste gaze vor conține în cantitate mai mare sau mai mică elemente oxidante ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  și  $\text{H}_2\text{O}$ ) în aceeași măsură oxidarea se va produce mai mult sau mai puțin intens.

Influența mai mare asupra oxidării o are oxigenul și vaporii de apă și mai mică bioxidul de carbon.

Dacă în gazele de ardere există și bioxid de sulf( $\text{SO}_2$ ) atunci la aceleași condiții de încălzire, viteza de oxidare va crește.

-temperatura. Oxidarea decurge cu atât mai intens cu cât temperatura este mai ridicată. Astfel dacă la  $900^\circ\text{C}$  se ia viteza de oxidare egală cu unitatea, atunci la  $1000^\circ$  ea va fi 2, la  $1100^\circ\text{C}$ -3,5 iar la  $1300^\circ\text{C}$ -7.

Până la aproximativ  $700^\circ\text{C}$  oxidarea se produce mai puțin intens, aproape neglijabil. Din acest punct de vedere este indicată deformarea la semicald.

-durata de menținere. Cantitatea de oxid crește cu mărirea duratei de menținere a semifabricatului în cuptor la temperatura data.

Legătura între cantitatea de oxid formată și durata de menținere la temperatura dată (în intervalul  $600\dots 1200^\circ\text{C}$ ) se poate exprima prin relația:

$$q = c\sqrt{\tau}e^{-\frac{9000}{T}} \quad (6.1)$$

în care q este cantitatea de oxid formată în  $\text{g}/\text{cm}^2$

$\tau$  - durata de menținere a semifabricatului în cuptor, în min.

T- temperatura semifabricatului, în K

c- coeficient care depinde de conținutul gazelor arse

Relația 6.1 este valabilă pentru cazurile în care oxidul nu se desprinde de semifabricat, formand astfel un strat izolator pentru oxidarea ulterioară.

-raportul dintre suprafața și volumul semifabricatului încălzit. Cu cât acest raport este mai mare la un volum dat, cu atât și cantitatea de oxid va fi mai mare în unitatea de timp.

-starea chimică a metalului. Cu cât conținutul de carbon din oțel este mai ridicat, cu atât mai mică va fi cantitatea de oxid formată. Acest fenomen se explică prin aceea că pe

suprafața semifabricatului are loc oxidarea carbonului (decarburarea) formându-se oxid de carbon, care are rol protector.

- viteza de mișcare a gazelor în raport cu suprafața piesei. De viteza de deplasare a gazelor de ardere depinde prezența în apropierea piesei a unei concentrații mai mari sau mai mici de elemente oxidante. Peste o anumită viteză de deplasare a gazelor (circa 0,1m/s) aceasta nu mai influențează simțitor viteza de oxidare deoarece în aceste condiții se ajunge la un echilibru în reacție, care nu mai poate fi modificat de viteza gazelor arse.

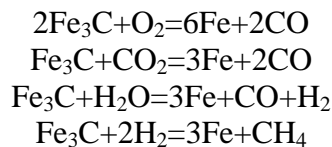
Prezența fenomenului oxidării face ca în timpul încălzirii să aibă loc pierderi de material. La încălzirea semifabricatelor de oțel în cuptoare cu combustibil, pierderile de metal se ridică la 2-3% din volumul semifabricatului sau chiar mai mult.

La încălzirea electrică, fiind prezent pe suprafața semifabricatului numai oxigenul din aer și încălzirea având loc într-un interval mai scurt de timp și pierderile de material sunt mai mici, reducându-se la 0,5...1% din volumul semifabricatului.

### **Decarburarea**

Pe lângă oxidare, la temperaturi ridicate are loc și decarburarea oțelului.

Gazele care produc decarburarea sunt: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, care cu cementita produc următoarele reacții:



Viteza de decarburare este mai mare la începutul încălzirii deoarece după ce se formează un strat de oxid pe suprafața semifabricatului, acesta are rol izolator.

Deasemenea pe măsură ce stratul de oxid pătrunde spre interiorul semifabricatului, se oxidează stratul decarburat. Deci grosimea stratului decarburat nu crește proporțional cu timpul, ci dimpotrivă poate rămâne constant sau chiar să se micșoreze fiind în strânsă legătură cu viteza de oxidare.

Asupra procesului decarburării are influență mare starea chimică a oțelului. Cu cât conținutul de carbon este mai mare, cu atât și procesul decarburării va fi mai intens.

Wolframul și aluminiul favorizează decarburarea pe când alte elemente de aliere au o mai mică influență asupra acestui fenomen.

### **Protecția contra oxidării și decarburării**

Pentru a micșora pierderile de material prin oxidare și grosimea stratului decarburat se pot aplica următoarele metode:

- micșorarea duratei de menținere a semifabricatului în cuptor prin mărirea vitezei de încălzire (prin mărirea temperaturii cuptorului).
- folosirea unei atmosfere de protecție. Compoziția gazelor, pentru ca acestea să fie mai puțin oxidante sau decarburante depinde de temperatură. Pe măsură ce crește temperatura conținutul de CO în gazele arse trebuie să fie mai mare pentru ca oxidarea să nu aibă loc.
- acoperirea suprafeței semifabricatului cu un strat protector. Această acoperire se poate realiza fie prin galvanizare (de obicei cuprare) fie prin folosirea altor soluții preparate în acest scop.

### **Curățirea oxizilor de pe semifabricatele încălzite**

Prin oxidarea semifabricatelor în timpul încălzirii latura negativă a acestui proces nu se limitează numai la pierderile de material, ci oxizii formați au o influență dăunătoare în procesul deformării.

Oxizii rămași pe semifabricat se răcesc mai repede decât restul materialului și ei devin mai duri, astfel că în timpul deformării se imprimă în piesă.

După înlăturarea oxizilor imprimați în piesa matrițată, suprafața acesteia rămâne neregulată, de slabă calitate, fapt pentru care, pentru prelucrările ulterioare trebuie lăsat un adaos mare.

Oxizii rămași pe suprafața semifabricatului au acțiune abrazivă, astfel că vor uza prematur sculele. S-a constatat că matrițele folosite pentru matrițarea pieselor lipsite de oxizi au o durabilitate mai mare cu circa 40..60% decat cele în care se matrițează semifabricate cu oxizi pe suprafața lor.

Pentru curățirea oxizilor de pe semifabricatele încălzite se folosesc mai multe metode:

1. **metoda hidraulică**, înlăturarea oxizilor prin aceasta metodă se face prin stropirea semifabricatului încălzit cu un jet de apă sub presiune(100...150atm). Sub acțiunea apei oxizii se răcesc, crapă și se înlătură de pe semifabricat.
2. **metode mecanice**, se folosesc pentru curățirea oxizilor de pe semifabricatele de dimensiuni relativ mici și de formă cilindrică sau paralelipedică.

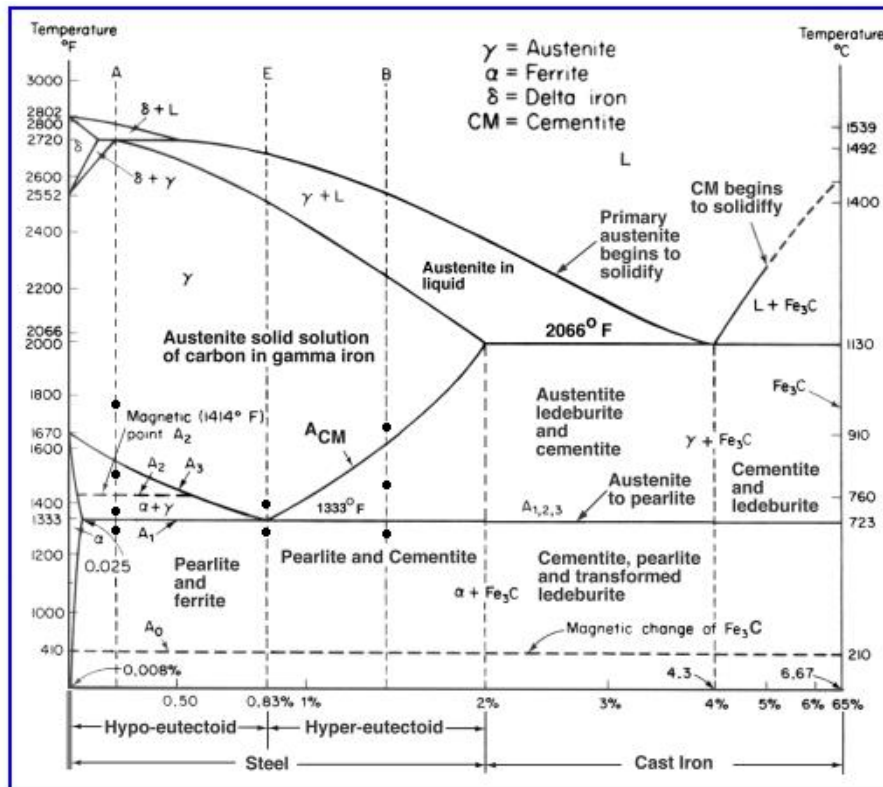
### **Stabilirea intervalului de temperatura optim pentru deformare**

În vederea alegerii unei regim termic rational, trebuie stabilit intervalul de temperatura în care se poate realiza deformarea. Deosebim un interval de temperatura admis și un interval de temperatura tehnologic. Intervalul de temperatura admis se alege în domeniul în care materialul are rezistența la deformare redusă, deformabilitatea mare și în care recristalizarea poate decurge complet. Determinarea acestui interval se face pe baza diagramelor de echilibru și a unor încercări tehnologice pentru determinarea deformabilității, rezistenței la deformare și a mărimii graunților. Un prim element care limitează intervalul de temperatura admis pentru deformare este domeniul în care materialul respectiv are o structură monofazică (pentru a avea o plasticitate ridicată). Limita superioară a intervalului de temperatura admis este dată de temperatura la care încep să se manifeste pronunțate fenomene care duc la scăderea deformabilității: oxidarea spațiilor intercrystaline, topirea substanței intercrystaline, creșterea excesivă a graunților. Limita inferioară a intervalului de temperatura admis pentru deformare se stabilește în funcție de gradul de deformare ce se poate realiza la acea temperatura și de structura ce se dorește a fi obținută (pentru o structură complet recristalizată sunt necesare temperaturi relativ înalte de sfârșit de deformare, în schimb pentru obținerea unei structuri fine cu urme de ecruisare se poate cobori limita minimă până în domeniul de semicald. În conformitate cu aceste considerente, intervalul de temperatura admis pentru deformarea la cald a oțelurilor va fi (pe baza diagramei Fe-C):

$$T_{sup} = T_{solidus} - (150 \dots 200)^{\circ}C$$

$$T_{inf} = A_{r3} + (30 \dots 60)^{\circ}C \text{ pentru oțelul hipoeutectoid}$$

$$T_{inf} = A_{r1} + (40 \dots 50)^{\circ}C \text{ pentru oțelul hipereutectoid}$$



**Fig.6.1** Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C [Material Science and Metallurgy 4th edititon, Pollack, Prentice – Hall 1988]

Intervalul tehnologic de temperatura de deformare, este intervalul in care se realizeaza efectiv deformarea. El trebuie sa fie cuprins in intervalul admis. La stabilirea intervalului tehnologic de temperatura trebuie sa se tina seama de faptul ca in timpul loviturii semifabricatul sufera o incalzire (prin transformarea unui parti din energia de deformare in caldura) urmata de o racire intre lovituri(cand semifabricatul cedeaza caldura mediului inconjurator).

#### 4.2 Stabilirea vitezei de încălzire

Prin viteză de încălzire se înțelege creșterea temperaturii semifabricatului în unitatea de timp.

Se deosebesc trei viteze de încălzire:

- viteza de încălzire tehnic posibilă, care depinde de instalația de încălzire
- viteza de încălzire admisibilă, care poate fi atinsă la un semifabricat dat
- viteza de încălzire reală, care se realizează în timpul încălzirii.

Viteza care interesează mai mult este viteza admisibilă de încălzire. Această viteză este limitată de tensiunile termice care se nasc în semifabricat în timpul încălzirii din cauza neuniformității temperaturii pe secțiune. In cursul încălzirii straturile exterioare ale semifabricatului se încălzesc mai repede și se dilată mai mult decat cele din interior. Din acest motiv pe secțiunea semifabricatului se nasc tensiuni de sens contrar. La diferențe mari de temperatură, tensiunile termice pot atinge valori atat de mari încat să depășească rezistența la rupere a materialului încălzit și să producă fisuri. Pentru ca aceste tensiuni termice să nu producă fisuri trebuie ca diferența de temperatură de care depinde mărimea tensiunilor să nu depășească o anumită limită. Această valoare limită

este dată de viteza(maximă) admisibilă de încălzire. Tensiunile termice apar datorită proprietăților elastice ale materialelor care se încălzesc.

Oțelul de exemplu are proprietăți elastice pronunțate până la circa 550°C, după care acestea scad, crescând proprietățile plastice.

Rezultă că și tensiunile termice sunt mai mari și mai periculoase în cazul oțelului până la 550°C.

Tensiunile termice cresc proporțional cu viteza de încălzire, cu coeficientul de dilatare, cu dimensiunile piesei și cu modulul de elasticitate al materialului încălzit.

O posibilă relație de legătură între acești parametri este prezentată mai jos:

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha_0 E \Delta t}{2(1 - \nu)} \quad (6.2)$$

în care  $\sigma_{\max}$  este efortul maxim ce ia naștere în semifabricat

$\alpha_0$  – coeficientul de dilatare liniară a materialului încălzit

$E$  – modulul de elasticitate al materialului încălzit

$\Delta t$  – diferența de temperatură dintre suprafața și miezul semifabricatului încălzit

$\nu$  - coeficientul lui Poisson

Dacă în relația 2 în loc de efortul maxim se introduce rezistența admisibilă a materialului  $\sigma_a$  atunci se poate calcula diferența de temperatură admisă  $\Delta t_a$  între suprafața și miez deci:

$$\Delta t_a = \frac{2(1 - \nu)}{\alpha_0 E} \sigma_a \quad (6.3)$$

Pe de altă parte diferența de temperatură  $\Delta t$  între suprafața și miezul semifabricatului este dată de relația:

$$\Delta t = \frac{VR^2}{4a} \quad (6.4)$$

în care  $V$  este viteza de încălzire în °C/h

$R$ - raza cilindrului(sau semilatura patraturii) semifabricatului în m

$a$ - difuzibilitate termică, în m<sup>2</sup>/h( $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ ,  $\lambda$  fiind conductivitatea termică,  $c$ -

căldura specifică a materialului,  $\rho$ - densitatea materialului)

Comparând relațiile 3 și 4 și înlocuind  $\nu$  cu 0,3, valoarea vitezei admisibile de încălzire  $V_a$  este dată de relația:

$$V_a = \frac{5,6a\sigma_a}{\alpha_0 ER^2} \quad (6.5)$$

Pe baza schimbului de căldură dintre semifabricat și mediul de încălzire, în unitatea de timp, se poate scrie relația:

$$\alpha(t_c - t_s)A_s = M_s c V \quad (6.6)$$

în care  $\alpha$  este coeficientul de transmitere a căldurii de la mediul de încălzire la semifabricat în kcal/m<sup>2</sup>h°C

$t_c$  - temperatura cuptorului în °C

$t_s$  - temperatura semifabricatului în °C

$A_s$  - suprafața semifabricatului care primește căldura de la mediul de încălzire în m<sup>2</sup>

$M_s$ - masa semifabricatului, în kg

$C$  - căldura specifică a materialului încălzit în kcal/kg°C

$V$ - viteza de încălzire, în °C/h

Din relația 6 se poate scoate valoarea vitezei de încălzire:

$$V = \frac{(t_c - t_s) A_s}{M_s c} \quad (6.7)$$

Din compararea relatiilor 5 si 6 se deduce ca:

$$\alpha_a = \frac{M_s c}{(t_c - t_s)} \frac{5,6a\sigma_a}{\alpha_0 ER^2} \quad (6.8)$$

Neglijand transmiterea caldurii prin convecție, care este mica in raport cu cea transmisa prin radiatie (la temperaturi ridicate 3...5%), coeficientul de transmitere al caldurii se calculeaza cu:

$$\alpha = C_t \frac{\left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 \right]}{T_c - T_s} \quad (6.9)$$

in care  $C_t$  este coeficientul de iradiere

$T_c$  – temperatura cuptorului, K

$T_s$  – temperatura semifabricatului, K

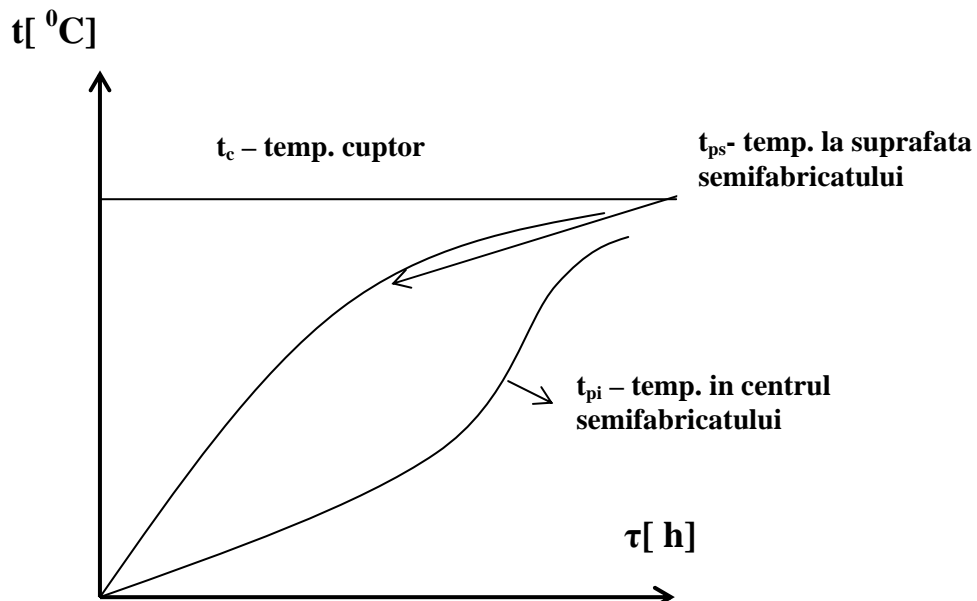
Punandu-se conditia ca  $\alpha_a \leq \alpha$  rezulta ca temperatura cuptorului trebuie limitata in functie de sectiunea si caracteristicile materialului incalzit.

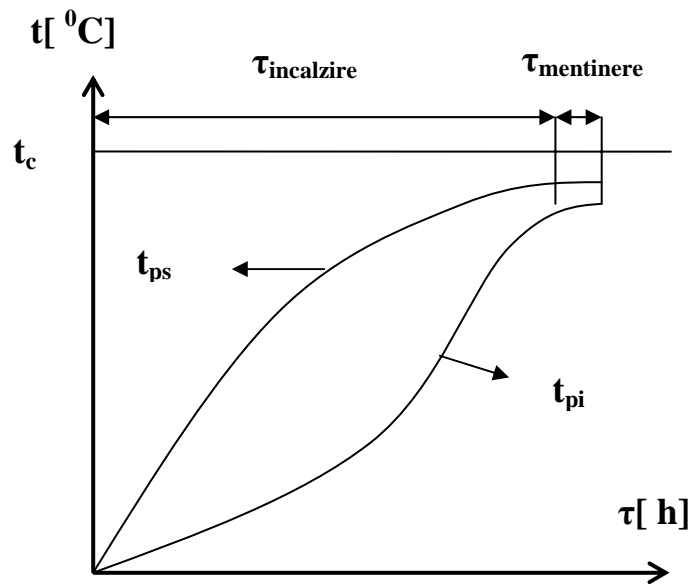
Pentru a putea stabili daca un semifabricat poate fi introdus direct intr-un cuptor incalzit la temperatura finala de regim ( $t_c = t_s + 50 \dots 150^\circ\text{C}$ ) se foloseste criteriul Biot (Bi) care se calculeaza cu relatia:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \quad (6.10)$$

Daca criteriul Biot este mic ( $Bi < 0,25$ ) atunci semifabricatul se considera "subtire" si se poate introduce direct in cuptorul incalzit la temperatura finala (incalzire intr-o singura treapta). Cantitatea de caldura transmisa de la suprafata semifabricatului spre interiorul sau se apropie de cea primita de suprafata semifabricatului de la mediul de incalzire, deci diferenta de temperatura suprafata-centru are valoare redusa (Fig.6.2 a)

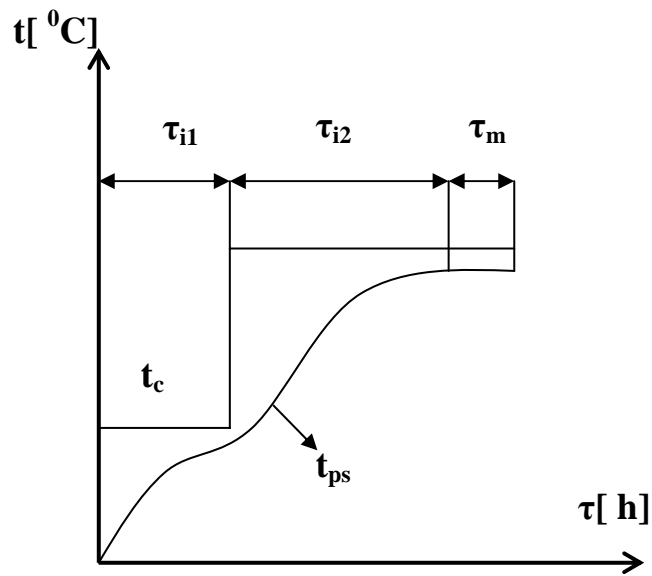
Daca criteriul Biot este mare ( $Bi > 0,5$ ) atunci semifabricatul se considera "gros" si incalzirea trebuie facuta in mai multe trepte. Cantitatea de caldura primita de suprafata semifabricatului de la mediul de incalzire este mare in raport cu cantitatea de caldura transmisa spre interiorul semifabricatului deci diferenta de temperatura suprafata-centru este relativ mare si incalzirea se va face in mai multe trepte (Fig.6.2.c,d). Intervalul  $0,25 < Bi < 0,5$  reprezinta un domeniu de trecere in care se incadreaza piesele de marime mijlocie. Aceste semifabricate necesita o incalzire in doua trepte (Fig.6.2b)





b.

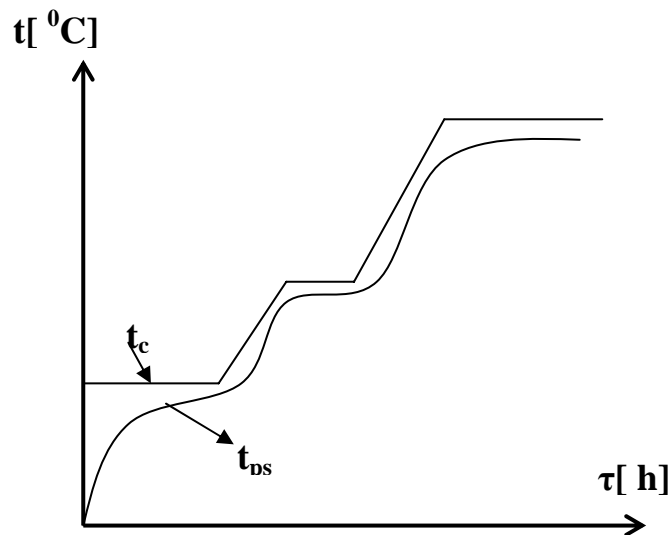
Incalzirea pieselor mijlocii (o treapta de incalzire cu mentinere)



c.

Incalzirea pieselor groase in doua trepte (si unele mijlocii)





d.

### Incalzirea in trei trepte a pieselor groase din oteluri inalt aliate

Fig.6.2

In expresia criteriului Biot marimea  $\alpha$  arata capacitatea de transmitere a caldurii de la mediul de incalzire la semifabricat iar marimea  $\lambda$  capacitatea de trecere a caldurii de la suprafata semifabricatului spre interior.

Pentru un semifabricat de raza  $R$ , cu cat  $\alpha$  este mai mare si  $\lambda$  mai mic, cu atat va apare o diferenta mai mare de temperatura intre suprafata si miez.

#### 4.3. Stabilirea duratei de încălzire

Calculul timpului de încălzire se face pornindu-se de la ecuația schimbului de căldură dintre semifabricat și mediul de încălzire:

$$\alpha(t_c - t_s)A_s d\tau = M_s c dt \quad (6.11)$$

de unde rezultă:

$$d\tau = \frac{M_s c dt}{(t_c - t_s)A_s} \quad (6.12)$$

Integrand relația de mai sus se obține expresia duratei de încălzire:

$$\tau = \frac{M_s c}{A_s} \ln \frac{t_c - t_{si}}{t_c - t_{sf}} \quad (6.13)$$

unde:

$\tau$  este timpul de încălzire, în h;

$t_{si}$ - temperatura inițială a semifabricatului , în  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{sf}$ - temperatura finală a semifabricatului, în  $^{\circ}\text{C}$ .

Relația 6.13 exprimă valoarea duratei de încălzire pentru situația în care temperatura cuptorului este constantă în timpul încălzirii și se încălzesc piese subțiri.

Pentru piese de mărime mijlocie se folosește relația:

$$\tau = \frac{M_s c}{A_s k} \ln \frac{t_c - t_{si}}{t_c - t_{sf}} \quad (6.14)$$

Coeficientul  $k$  din relația de mai sus depinde de forma semifabricatului și de criteriul Biot.

Pentru piese cilindrice , coeficientul  $k$  se calculează cu relația:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{Bi}{3,5}}$$

iar pentru plăci k se calculează cu relația:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{Bi}{3}}$$

Durata de încălzire calculată cu relațiile 4.13, 4.14 asigură atingerea temperaturii  $t_{sf}$  la suprafața semifabricatului. Temperatura miezului rămâne mai mică decât a suprafeței. Cu cât durata de menținere în cuptor este mai mare cu atât se va ajunge la o diferență mai mică de temperatură între suprafață și miez.

## CAPITOLUL 7

### FORJAREA LIBERA

#### 7.1. Introducere

Forjarea este un procedeu tehnologic de prelucrare a metalelor si aliajelor (aflate in stare plastica), sub actiunea unor forte exterioare dinamice (de soc) sau cvasistatice (lente). Forjarea poate fi:

1. forjare libera, in care curgerea materialului este dirijata de catre nicovalele de deformare si unele scule simple.
2. forjarea in matrita (matritarea), in care deformarea materialului se realizeaza in cavitatile unor scule numite matrite, astfel incat in final piesa va lua forma cavitatii (care este negativul piesei).

In general dupa forjare piesele sunt supuse unor prelucrari prin aschiere si tratamente termice, cu scopul de a le aduce la forma, precizia si caracteristicile impuse. Exista insa si piese care nu mai sufera nici o prelucrare in urma forjarii, aceasta fiind de fapt tendinta actuala.

Capacitatea unui material de a fi prelucrat prin forjare se masoara cu ajutorul forjabilitatii, care inglobeaza doua notiuni: rezistenta la deformare si deformabilitatea. Forjabilitatea este cu atat mai ridicata cu cat rezistenta la deformare este mai redusa si deformabilitatea mai ridicata.

#### 7.2. Materiale forjabile

Materialele metalice forjabile sunt acele materiale care pot fi deformate plastic prin unul din procesele de forjare. Printre principalele materiale se enumera aliajele feroase si neferoase.

Aliajele feroase se pot grupa la randul lor in oțeluri carbon și oțeluri aliate, iar cele neferoase în metale și aliaje grele și ușoare. Din punct de vedere al utilizării industriale, cele mai răspandite aliaje feroase sunt oțelurile carbon. Pentru ca acestea să fie ușor deformabile se folosesc mai frecvent cele care au carbonul în limitele 0...1,4%. Peste această limită ele devin greu forjabile.

In categoria oțelurilor carbon forjabile intră următoarele calități: oțelurile carbon obișnuite OL(STAS 500); oțelurile carbon de calitate OLC(STAS 880).

O altă categorie de materiale forjabile o formează oțelurile aliate pentru construcții de mașini (STAS 7450), oțelurile refractare (STAS 3583), oțelurile pentru arcuri (STAS 795), oțelurile pentru rulmenți (STAS 1456) s.a.

Prezența unor elemente în compoziția oțelului influențează comportarea la deformare a acestora astfel:

*Sulf* sub 0,025% se dizolvă în oțel neinfluențând deformabilitatea. Peste această concentrație se formează eutectoidul FeS+Fe cu punct de topire de 985<sup>0</sup>C, care provoacă fragilitatea la roșu a oțelului; pentru a evita acest lucru se introduce Mn, care reacționează mai ușor cu sulful formând Mn S cu punctul de topire de 1620<sup>0</sup>C (mai mare decat temperatura de deformare). Acest compus reduce si el deformabilitatea oțelului, dar nu la fel de mult cum o face FeS+Fe. Din această cauză conținutul de sulf nu trebuie să depășească 0,025% maximum 0,035%.

*Fosforul* este solubil în oțeluri până la 1,2 % marind densitatea și micșorand deformabilitatea acestora; conținutul său nu trebuie să depășească 0,06%.

*Manganul* apare ca element însoțitor în oțeluri de construcție până la 0,8 și în cele de scule până la 0,3%; în aceste limite el nu influențează prea mult deformabilitatea și duritatea oțelului.

Alte elemente însoțitoare cum ar fi *cromul, nichelul, wolframul, molibdenul*, influențează și ele ca elemente de aliere deformabilitatea oțelului, însă într-o măsură redusă față de elementele enumerate anterior.

Dintre metalele și aliajele neferoase ușoare se enumeră aluminiul și aliajele sale pe bază de Si, , Cu, Mg, Zn și Mn, precum și aliajele pe bază de magneziu , care conțin Mn, Al, Sn sau Zn.

*Cuprul și aliajele sale*, cuprul are deformabilitate foarte bună atât la rece cât și la cald, fiind ușor prelucrabil prin deformare plastică. Cuprul pur se utilizează doar în industria electrotehnică, în alte industrii folosindu-se doar aliaje ale acestui metal (Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Mn, etc.).

*Alamele* (aliaje C-Zn) au rezistența la deformare și deformabilitatea puternic influențate de conținutul de zinc. Astfel la temperatura ambiantă alamele cu 30% Zn au deformabilitatea cea mai ridicată. Prezența impurităților reduce mult deformabilitatea alamelor.

*Bronzurile* sunt aliaje binare ale Cu cu Sn, Al, Ni, Mn, Si, etc. La care se adaugă în proporții mici și alte elemente. Bronzurile cu Sn pentru deformare au până la 3,3% Zn pentru creșterea caracteristicilor de rezistență și îmbunătățirea structurii. Bronzurile cu Al au caracteristicile de deformare influențate de conținutul de Al, deformabilitatea maximă obținându-se la 8-10% Al.

*Aluminiul și aliajele sale* au o largă întrebuintare datorită caracteristicilor mecanice ridicate și a densității reduse. Al pur la fel ca și Cu, are o bună deformabilitate atât la cald cât și la rece, neridicând probleme la prelucrările prin deformare plastică. În practică se utilizează foarte mult aliaje de Al și puțin Al pur. Elementele de bază care formează aliaje cu Al sunt Cu, Mg, Mn, Si. Peste un anumit conținut în aceste elemente de aliere, aliajele devin fragile și greu deformabile. De aceea conținutul elementelor de aliere cu Al se limitează la : 5% Cu, 2,5% Mg, 1% Mn, 1,6% Fe.

*Aliajele de titan* sunt tot mai mult utilizate datorită densității foarte reduse și rezistenței mecanice la coroziune foarte ridicate. Principalele elemente de aliere sunt Al (max 7%) și Cr (max 3%), dar se întâlnesc în cantități mici și Mo, V, Mn.

În tabelul 7.1 este prezentată o clasificare a materialelor în ordinea descrescătoare a capacității lor de forjare.

Tabelul 7.1

Forjabilitate maximă	Domeniul aprox. al temp. de forjare <sup>0</sup> C
Aliaje de aluminiu	400-550
Aliaje de magneziu	250-350
Aliaje de cupru	600-900
Oțeluri carbon și slab aliate	850-1150
Oțeluri inoxidabile martensitice	1100-1250
Oțeluri inoxidabile austenitice	1100-1250
Aliaje de nichel	1000-1150
Aliaje de titan	700-950
Aliaje de molibden	1150-1350
Aliaje de wolfram	1200-1300

---

## Forjabilitate minimă

---

### 7.3. Tipuri de semifabricate

Semifabricatele destinate forjării se pot prezenta în două stări: stare turnată și stare laminată.

Cele mai utilizate semifabricate turnate sunt lingourile. Problema care se pune asupra compoziției lingourile din oțel este legată de conținutul de oxizi sau oxigen cât și altor gaze care pot rămâne în masa metalică (oxidul de carbon și hidrogenul). Toate acestea sunt dăunătoare calității oțelului elaborat.

Printre materiile prime cu cea mai largă utilizare în secțiile de forjă se enumeră semifabricatele laminate. Ele sunt de diferite forme și dimensiuni cum ar fi: blumurile (semifabricate cu secțiune transversală patrata STAS 436-80), sleburile (semifabricate cu secțiune transversală dreptunghiulară STAS 436-80), țagăle (semifabricate cu secțiune transversală patrata sau rotunda STAS 2881-80), profilele, etc.

### 7.4. Temperatura de forjare

În vederea forjării, materialele metalice trebuie să posede o deformabilitate ridicată. Acest lucru impune ca plasticitatea să fie maximă iar rezistența la deformare minimă. Pentru îndeplinirea acestor cerințe semifabricatele destinate forjării se încălzesc.

Temperatura de început de forjare a oțelurilor carbon este determinată de temperatura de topire iar cea de sfârșit de zona transformării fazei  $\gamma$  în  $\alpha$ . Oțelurile înalt aliate se forjează de obicei într-un interval de temperatură mai îngust decât cel al oțelurilor carbon. Acest lucru se datorește faptului că la temperaturi prea ridicate granulația lor crește mult, iar la temperaturi prea scăzute plasticitatea scade foarte mult. Din aceste cauze, tehnologiile pieselor din oțeluri înalt aliate, care necesită un timp mai îndelungat de deformare, se realizează prin mai multe încălziri față de aceleași piese realizate din oțeluri carbon.

Controlul temperaturilor de forjare reprezintă una din condițiile de bază ale desfășurării corecte a procesului de deformare.

Oțelurile carbon se recomandă să se deforma în domeniul soluției solide  $\gamma$ . Ca limită superioară se impune o temperatură cu  $200...300^{\circ}\text{C}$  sub linia solidus. În limitele dintre  $A_1$  și  $A_3$ , oțelurile hipoeutectoide au o structură formată din austenită și ferită. Acestea sunt suficient de plastice, dar deformarea în această zonă nu poate fi realizată deoarece se execută parțial la rece având loc în același timp și fenomene însoțitoare de recristalizare în special când forjarea se execută cu grade reduse de deformare.

Forjarea în aceste condiții poate provoca creșterea grosolană a grăunților de ferită.

Temperaturile de forjare ale oțelurilor aliate sunt influențate de compoziția chimică a acestora. Astfel oțelurile care au conținut de Cr până la 1,4% se forjează în limitele  $1100...750^{\circ}\text{C}$ , oțelurile austenitice între  $1150...900^{\circ}\text{C}$ , iar cele cu până la 12% Mn între  $950$  și  $850^{\circ}\text{C}$ .

Alamele cu peste 60% Cu sunt deformabile în limitele  $600...850^{\circ}\text{C}$ .

Bronzurile cu Sn se forjează între  $900...780^{\circ}\text{C}$ , iar bronzurile cu Ni între  $1150...950^{\circ}\text{C}$ .

## 7.5. Debitarea semifabricatelor

Prin debitare se înțelege divizarea unui semifabricat de o formă dată, în două sau mai multe bucăți, la dimensiuni stabilite.

În secțiunile de debitare se utilizează mai multe metode de debitare printre care: debitarea prin forfecare, debitarea prin rupere, debitarea cu ferăstrăul, debitarea cu discuri abrazive, debitarea cu flacără oxiacetilenică.

### 1. Debitarea prin forfecare

Este procedeul prin care semifabricatele sunt fragmentate în mai multe bucăți prin acțiunea a două cuțite (Fig.7.1) [2].

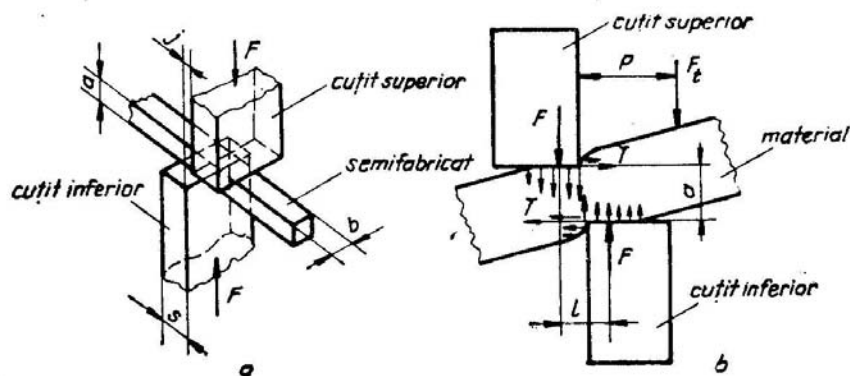


Fig.7.1

a. schema de principiu, b. forțe și momente

Datorită forței active  $F$  dată de cuțitul superior, pe cuțitul inferior ia naștere forța de reacțiune  $F$ . După intrarea cuțitelor până la o anumită adâncime, în material se creează o tensiune de forfecare, care provoacă desprinderea unei bucăți din semifabricatul inițial.

Prin avansul cuțitelor în material crește treptat și presiunea asupra fețelor laterale ale acestora. Această presiune atinge o valoare maximă, iar după o scurtă perioadă de descreștere lină, scade brusc la valoarea zero.

Intrucât forța  $F$  nu acționează în planul forfecării, asupra materialului se creează un cuplu  $M = F \times l$  care tinde să rotească semifabricatul. Datorită acestui efect iau naștere forțele  $T$ , care acționează pe tășișul cuțitelor. La o anumită adâncime de pătrundere a cuțitelor în material, semifabricatul nu va mai avea tendința să se rotească datorită echilibrului de momente:

$$F \times l = T \times a \quad (7.1)$$

### 2. Debitarea prin rupere

Procesul de debitare prin rupere poate fi aplicat numai la rece, acelor materiale care au rezistența la rupere mai mare de  $60 \text{ daN/mm}^2$ . Dacă această condiție nu este îndeplinită, în timpul debitării semifabricatele se îndoaie.

Înainte de a se aplica operația propriu-zisă de debitare, semifabricatele sunt pregătite, practicându-se pe ele o crestătură în locul viitoarei rupei până la adâncimea de  $h = 0,1d$  (Fig.7.2)[2].

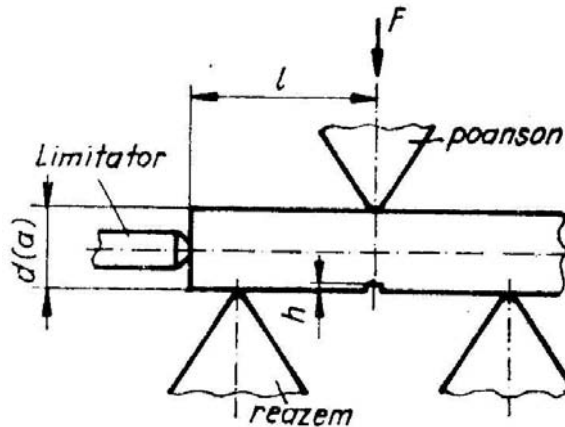


Fig.7.2

Forța necesară ruperii se determină în funcție de secțiunea și rezistența la rupere materialului.

Pentru semifabricatele cu secțiuni circulare forța de rupere se poate calcula cu relația:

$$F = k \frac{0,4d\sigma_r}{l} \quad (7.2)$$

unde:

k, este coeficientul care include modul în care acționează forțele exterioare, neuniformitatea structurii, etc.

$\sigma_r$ , rezistența la rupere a materialului în daN/mm<sup>2</sup>

d,l, diametrul și lungimea semifabricatului, în mm

### 3. Debitarea cu fierăstrăul

Forfecarea și ruperea sunt metode de bază pentru pregătirea semifabricatelor necesare forjării. Dacă se impune obținerea unor suprafețe cu calități superioare a tăieturilor și o precizie mare a semifabricatului debitat, se recomandă debitarea cu fierăstrăul. Cu toate că procedeul se realizează cu productivități mici, preț de cost ridicat, pierderi de material și consum mare de scule, se utilizează foarte frecvent pentru debitarea semifabricatelor cu secțiuni mari, bare profilate, țevi.

Debitarea se poate realiza folosind fierăstraie alternative sau fierăstraie circulare.

Debitarea cu fierăstraie circulare asigură obținerea unei suprafețe de calitate superioară.

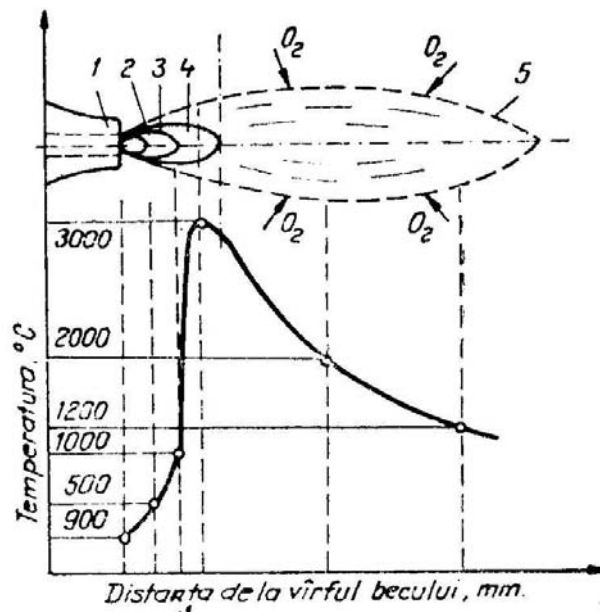
Diametrul D al panzelor de fierăstrău disc se alege în funcție de latura a sau diametrul d al semifabricatului de debitat respectându-se condiția:  $D \geq 3d$

### 4. Debitarea cu flacără oxiacetilenică

Acestă metodă își găsește aplicarea la tăierea semifabricatelor din oțeluri de diferite calități cu conținutul de carbon până la 0,7%. Principiul metodei constă în încălzirea cu flacără oxiacetilenică a locului unde urmează a fi executată debitarea. Încălzirea se realizează până la culoarea albicioasă a materialului, după care se trimite un curent de oxigen sub presiune. Sub acest curent de oxigen au loc reacții de oxidare(ardere), iar cantitatea de oxizi formată este suflată în afara zonei de către presiunea oxigenului.

Instalația folosită la debitarea cu flacără oxiacetilenică se compune din sursele de alimentare cu gaz combustibil(acetilenă) și oxigen, supapa de siguranță și aparatul în care are loc amestecul de gaze. Temperatura obținută prin arderea amestecului(Fig.7.3) este diferită pe lungimea flăcării[2]. Pentru ca procesul de decurgă normal, la începutul debitării se va utiliza pentru încălzire temperatura cea mai mare, iar după ce se formează

oxizii se dirijează jetul de oxigen sub presiune, care în continuare va întreține arderea materialului.



**1-capătul becului; 2-nucleul flăcării; 3-strat de carbon liber; 4- flacăra primară; 5- flacăra secundară**

**Fig.7.3**

Alături de procedeele de debitare enumerate mai sus se pot aminti și altele :

- debitarea prin fricțiune, care utilizează căldura rezultată prin frecarea dintre o panză-disc lăsa și materialul de debitat; panza rotindu-se cu o viteză periferică mare (120...140)m/s, astfel ca bara se încălzește local, se topește și mici bucăți de material se desprind fiind înlăturate continuu.
- debitarea anodo-mecanică, materialul debitat fiind îndepărtat prin descărcarea electrică dintre scula și bara.
- debitarea cu discuri abrazive, asemănătoare cu debitarea prin fricțiune însă discurile sunt din materiale abrazive (corindon natural, electrocorindon).
- debitarea cu plasma și arc electric, care utilizează energia arcului electric format între un electrod și semifabricatul de debitat.

Alegerea procedurii de debitare se face ținând seama în primul rând de economicitatea procedurii. Dacă nu se impune o formă strictă a capetelor semifabricatului debitat se va folosi forfecarea sau ruperea, metode care au productivitate ridicată. Dacă se impun condiții stricte de formă geometrică se va folosi debitarea cu ferastraul. Semifabricatele cu grosime mare vor fi debitate oxiacetilenic.

## 7.6. Utilaje tehnologice pentru forjare liberă

Utilajele principale în secțiile de forjă sunt acelea cu care se execută deformarea plastică, adică prelucrarea propriu-zisă a materialului. Celelalte sunt utilaje auxiliare care execută operații premergătoare forjării, ulterioare acestor operații, sau fac legătura între ele.

În categoria mașinilor de forjare se încadrează acelea la care se realizează deformarea materialelor prin lovire (ciocane, prese cu șurub) precum și cele care deformează pisele prin presare (prese hidraulice, prese mecanice). Mașinile care se



folosesc la forjarea liberă, dezvoltă prin lovire sau presare lentă o energie care se transformă în lucru mecanic de deformare.

Utilajele auxiliare execută operații premergătoare celei de deformare propriuzisă, acestea fiind cele care realizează depozitarea, debitarea, încălzirea, curățirea de oxizi, etc., precum și cele ulterioare, care execută debavurarea, calibrarea, tratamentul termic, controlul, etc. Tot din categoria utilajelor auxiliare fac parte și diferitele mijloace de manevrare și transport a semifabricatelor și pieselor forjate între diferitele faze ale procesului tehnologic, sau în timpul realizării lui.

La mașinile de forjat, pentru realizarea destinației lor, este necesară o energie pe care mașina o preia de la o sursă exterioară. Această energie se consumă în principal, pein deformarea plastică a metalului  $E_{dp}$ , prin deformarea elastică a organelor mașinii  $E_e$ , prin frecări  $E_f$ , prin eventuala accelerare a unor organe ale mașinii  $E_a$ . Uneori o parte din energie se disipează în mediul înconjurător (vibrații ale solului, căldură, etc.),  $E_p$ , iar în alte cazuri o parte din energie rămâne neutilizată,  $E_n$ .

Având în vedere cele de mai sus, bilanțul energetic al mașinilor de forjat în cazul general se scrie:

$$E = E_{dp} + E_e + E_f + E_a + E_p + E_n \quad (7.3)$$

Din relația 7.3 se poate stabili randamentul total al mașinii sub forma:

$$\eta = \frac{E_{dp}}{E} \quad (7.4)$$

Pentru forjarea liberă se utilizează cel mai frecvent ciocanele autocompresoare, ciocanele abur-aer și presele hidraulice. Schemele cinematice simplificate ale acestor tipuri de mașini sunt prezentate în figura 7.4 [2].

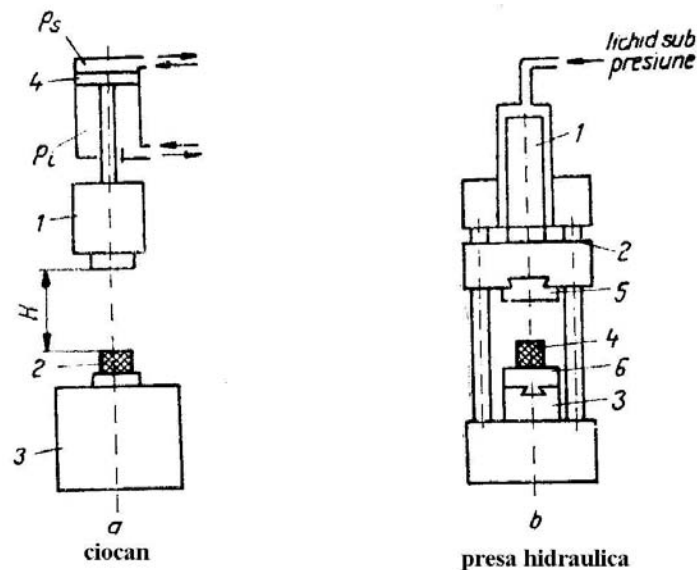


Fig.7.4

Ciocanele dezvoltă lucrul mecanic de deformare prin transformarea energiei cinetice a părții căzătoare 1 numită berbec, care acționează asupra semifabricatului 2 așezat pe nicovală, respectiv șabota 3 (Fig.7.4,a). La ciocane energia de lovire se poate realiza de către o masă în mișcare de translație, respectiv două sau mai multe mase în mișcare de translație în sensuri contrare. Principalele tipuri de ciocane utilizate pentru forjarea liberă sunt: ciocane autocompresoare (pneumatice) folosite pentru forjarea liberă

a pieselor mici si mijlocii; ciocane abur-aer, care au nevoie pentru functionare de aer comprimat(4...8bar) sau abur supraincalzit

La presele hidraulice lucrul mecanic de deformare se obține prin transformarea energiei unui lichid aflat la presiune înaltă (Fig.7.4,b) în cilindrul 1, care asigură cursa în jos a traversei 2 pe care se află nicovala superioară 5. Prin avansul traversei, nicovala deformează semifabricatul 4 aflat pe masa 3 a presei. Pe masa presei se află montată nicovala inferioară 6.

Presele hidraulice sunt utilaje cu largă utilizare la prelucrarea metalelor prin deformare plastică atat la cald cat și la rece. Răspandirea lor se datorește avantajelor pe care le au. Astfel, presele hidraulice dezvoltă forțe mari (pană la 1000MN și peste). Deasemenea acestea pot asigura un domeniu de viteze destul de larg( $10^{-1} \dots 5 \cdot 10^2$  mm/s). Din punct de vedere al acționării, presele hidraulice pentru forjare liberă se execută în două variante: cu acționare deasupra nivelului solului și sub nivelul solului. Indiferent de varianta acționării, funcționarea se realizează cu agent energetic(apă sau ulei) a cărui parametrii de lucru se obțin într-o instalație hidraulică separată de utilajul propriu-zis.. Parametrul principal al agentului energetic este presiunea. Valoarea de regim a presiunii se obține cu ajutorul unor pompe și a unor elemente componente intermediare care pot fi acumulatele sau multiplicatoarele de presiune.

Alegerea tipului de utilaj necesar realizării unei operații de forjare trebuie să aibă în vedere analiza a doi parametrii de bază: forța și energia dezvoltate de utilaj în vederea atingerii obiectivului stabilit.

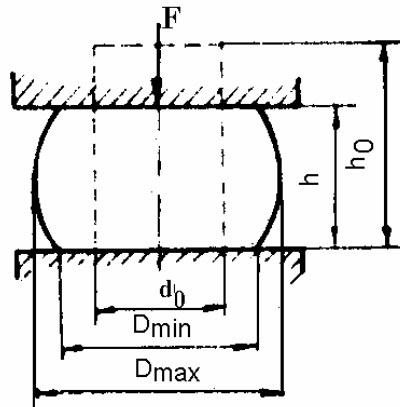
Pentru deformarea plastică a materialelor metalice se consumă un lucru mecanic. Dacă de exemplu se refulează un semifabricat pe o presă hidraulică, deformarea plastică începe numai în momentul cand forța dată de utilaj, repartizată pe unitatea de suprafață a semifabricatului, depășește rezistența la deformare a materialului. Forța consumată pentru refulare crește treptat pe măsură ce suprafața transversală a semifabricatului crește. Lucrul mecanic consumat pentru realizarea unui anumit grad de refulare se exprimă prin produsul dintre forța medie de deformare și mărimea reducerii înălțimii. Se poate astfel remarca faptul că din forța nominală pe care o dezvoltă presa și care se poate menține constantș pe întreaga cursă de lucru, semifabricatul supus deformării consumă doar o anumită cantitate.

Față de presele hidraulice, capacitatea de lucru a ciocanelor se caracterizează prin aceea că ele pot dezvolta o energie constantă la fiecare cursă, aplicand-o semifabricatelor supuse deformării, cu viteză ridicată. In aceste condiții forța de deformare este dependentă de gradul reducerii înălțimii semifabricatului. Pentru refularea cu mai multe lovituri de ciocan a unui semifabricat cu raportul dintre înălțime și diametru constant, în condițiile utilizării energiei maxime a ciocanului la fiecare lovitură, forța variază astfel: la primele lovituri semifabricatul se refulează cu grade mari de deformare și forțe mici, iar la ultimele lovituri reducerile sunt din ce în ce mai mici iar forțele necesare deformării din ce în ce mai mari. Dacă același semifabricat se deformeaza la o presă hidraulică, forța consumată pentru refulare poate avea aceeași variație în timp, dar ca valoare totală necesară deformării va fi de aprox. două ori mai mică. Această diferență apare din cauza vitezei cu care se realizează procesul. La ciocane, datorită vitezelor ridicate (6...8m/s), rezistența la deformare este mai mare, în timp ce la prese care dezvoltă viteze de aprox. 0,1...0,25 m/s, rezistența la deformare a materialului este mai mică.

## 7.6. Operații de bază la forjarea liberă

### 7.6.1. Refularea

Prin refulare se înțelege comprimarea unui semifabricat în direcția axei lui longitudinale. In urma acestui proces se micșorează înălțimea semifabricatului,



**Fig.7.5**

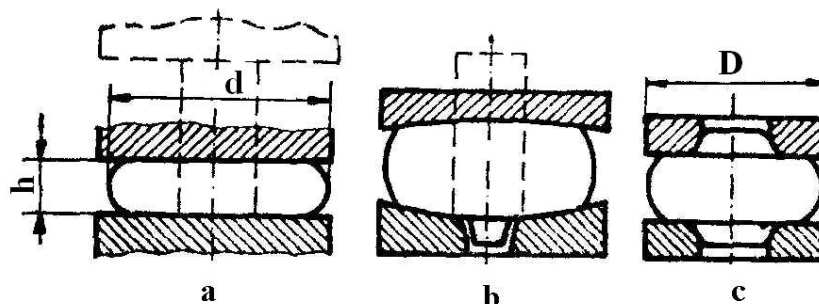
Operația de refulare se utilizează cel mai frecvent la executarea pieselor în formă de disc sau a altor piese de rotație cu înălțime relativ mică. De asemenea operația se mai folosește pentru:

- mărirea dimensiunilor transversale ale semifabricatelor sau a lingourilor în vederea unei întinderi ulterioare care să conducă în final la mărirea coroașului,
- micșorarea anizotropiei proprietăților mecanice create prin forjarea într-o singură direcție,
- obținerea preforjatelor găurite în vederea următoarei lor forjări pe dorn.

Principalele tipuri de refulare sunt:

1. refularea între scule plan paralele,
2. refularea între nicovale profilate(convexe sau concave),
3. refularea parțială ( în inel)

Principalele metode de refulare sunt prezentate în figura 7.6.



**a.- cu plăci plane; b- cu plăci concave; c.- cu plăci profilate cu cavitati de extrudare**

**Fig.7.6**

In cazul operației de refulare trebuie avut în vedere respectarea catorva reguli în vederea desfășurării corecte a operației. Aceste reguli se referă la:

1. înălțimea sau lungimea semifabricatului care se supune refulării nu trebuie să fie mai mare de 2,2...2,5 ori diametrul, în caz contrar producându-se flambarea acestuia.
2. în cazul cand după refulare urmează să se execute o întindere, înălțimea de refulare trebuie să fie cel puțin egală cu diametrul semifabricatului refulat.
3. se recomandă ca, gradul de refulare  $k = A_{ref}/A_{Si}$  să fie mai mic decât 3...4 (valoarea mică pentru semifabricate mici, iar cea mare pentru semifabricate mari). Nerespectarea acestei condiții poate duce la apariția fisurilor.
4. înaintea operației de refulare, lingourilor li se teșesc muchiile care altfel ar fi o sursă importantă de concentrare a tensiunilor, mai ales a celor de întindere care produc fisuri în material.
5. temperatura la care se execută refularea trebuie să fie cat mai apropiată de temperatura maximă admisibilă pentru a reduce forța necesară refulării și pentru a favoriza sudarea defectelor de material.

### Calculul fortei si presiunii specifice de deformare la refulare

Pentru calculul presiunii medii de deformare și respectiv a forței de refulare, literatura de specialitate prezintă mai multe relații în funcție de forma transversală a corpului, de dimensiunile corpului și de modul de variație a tensiunii de frecare și a presiunii pe suprafața de contact dintre corp și scule.

#### a. Semifabricat cu sectiune transversala dreptunghiulara si lungime infinita

Se considera un semifabricat de lungime infinita a carui sectiune transversala are inaltimea  $h$  si latimea  $b$ . Se considera un element din semifabricat de lungime unitara pentru care deformatia în lungul axei longitudinale se poate considera nula ( $\epsilon_1=0$ ). Starea de tensiuni în elementul considerat este prezentata în fig.7.7 si poate fi asimilata cu o stare plana de tensiuni, deoarece în orice sectiune transversala eforturile sunt aceleasi. Pentru determinarea fortei de deformare se pleaca de la ecuatia de echilibru a tensiunilor pe axa  $x$ :

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (7.5)$$

Deoarece  $\epsilon_1 = \epsilon_y = 0$ , rezulta ca  $\tau_{xy} = 0$ .

Termenii din ecuatia pot fi explicitati astfel: derivata partiala a efortului  $\sigma_x$  în raport cu variabila  $x$  este egala cu diferentia totala în raport cu aceeași variabila (deoarece variatia lui  $\sigma_x$  nu depinde decât de variabila  $x$ );  $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$  se exprima din asemanarea triunghiurilor dreptunghice de inaltime  $h/2$  si cateta  $\tau$ , respectiv de inaltime  $z$  si cateta  $\tau_{xz}$ .

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{d\sigma_x}{dx}; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{2\tau}{h} \quad (7.6)$$

Inlocuind relatiile (7.6) în ecuatia (7.5) rezulta:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau}{h} = 0 \quad (7.7)$$

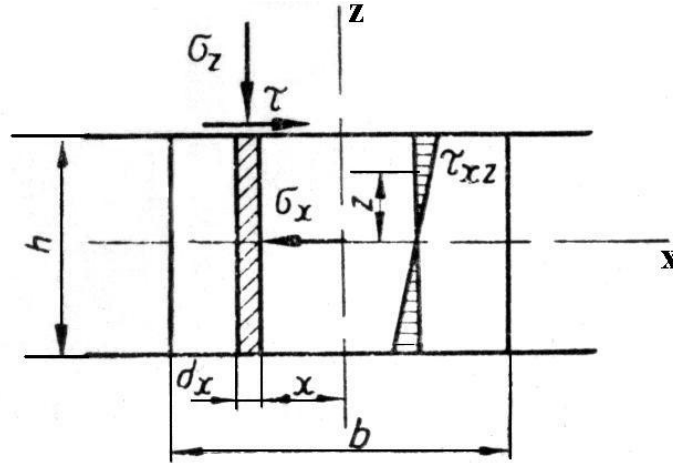


Fig. 7.7

Pentru calculul fortei de deformare trebuie determinata valoarea lui  $\sigma_z$ . Pentru aceasta se foloseste ecuatia plasticitatii, considerand  $\sigma_x$  si  $\sigma_z$  eforturi principale sub forma:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{\partial\sigma_z}{\partial x}$$

Deci relatia (7.5) devine:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{2\tau}{h} = 0$$

sau:

$$d\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} dx \quad (7.8)$$

Rezolvarea in continuare a ecuatiei (7.8) se va face in functie de variatia care se adopta pentru tensiunea  $\tau$  (in functie de raportul  $h/b$  si coeficientul de frecare  $\mu$ ) astfel:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_z; \quad \tau = \mu \cdot 2 \cdot k; \quad \tau = k; \quad \tau = \frac{2x}{b} \cdot k \quad (7.9)$$

Calcululele analitice au demonstrat ca cea mai acoperitoare relatie este  $\tau = \mu \cdot 2 \cdot k$ .

In continuare se va determina relatia de calcul a fortei de deformare considerand pentru  $\tau$  primele doua relatii:

a. daca  $\tau = \mu \cdot \sigma_z$  relatia (7.8) devine:

$$d\sigma_z = -\frac{2 \cdot \mu \cdot \sigma_z}{h} dx$$

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z} = -\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot dx \quad (7.10)$$

Integrand ecuatia (7.10) rezulta:

$$\ln \sigma_z = -\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot x + \ln C \text{ sau}$$

$$\sigma_z = C \cdot e^{-\frac{2\mu x}{h}} \quad (7.11)$$

Pentru determinarea constantei C se folosesc conditiile initiale:

La  $x = \frac{b}{2}$ ;  $\sigma_z = 2k$ , deci:

$$2k = C \cdot e^{\frac{2\mu b}{h^2}} \text{ de unde:}$$

$$C = 2ke^{-2\mu\frac{b}{h}}$$

Inlocuind pe C in relatia ( 7.11) se obtine:

$$\sigma_z = 2k \cdot e^{\frac{2\mu}{h}(\frac{b}{2}-x)} \quad (7.12)$$

Cunoscand tensiunea normala  $\sigma_z$ , forta totala de deformare F se determina cu relatia:

$$F = 2 \int_0^{b/2} \sigma_z dx = 4k \int_0^{b/2} e^{\frac{2\mu}{h}(\frac{b}{2}-x)} dx$$

Prin integrarea ecuatiei de mai sus se obtine:

$$F = 2k \cdot \frac{h}{\mu} (e^{\frac{\mu b}{h}} - 1) \quad (7.13)$$

Cunoscand forta F necesara pentru deformarea unui element de latime b si lungime unitara, presiunea de defomare se obtine din relatia:

$$p = \frac{F}{b} = 2k \frac{h}{\mu b} (e^{\frac{\mu b}{h}} - 1) \quad (7.14)$$

b. daca  $\tau = \mu \cdot 2k$  rezulta:

$$d\sigma_z = -4\mu k \frac{dx}{h}$$

Prin integrare rezulta:

$$\sigma_z = -\frac{4\mu k}{h} x + C \quad (7.15)$$

Constanta C se determina similar cu cazul anterior, din conditii initiale:

$$\text{La } x = \frac{b}{2} \quad 2k = -\frac{4\mu}{h} k \frac{b}{2} + C \text{ de unde } C = 2k + 4\mu k \frac{b}{2h}$$

Inlocuind in relatia ( 7.15) se obtine:

$$\sigma_z = 2k + 4\mu k \frac{b}{2h} - 4\mu k \frac{x}{h}$$

$$\sigma_z = 2k \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \left( \frac{b}{2} - x \right) \right] \quad (7.16)$$

Fora de deformare F se determina din relatia:

$$F = 2 \int_0^{b/2} \sigma_z dx = 4k \int_0^{b/2} \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \left( \frac{b}{2} - x \right) \right] dx \text{ sau}$$

$$F = 2k \left( 1 + \frac{\mu b}{2h} \right) b \quad (7.17)$$

Fora specifica va fi:

$$F = 2k\left(1 + \frac{1}{2}\mu\frac{b}{h}\right) \quad (7.18)$$

Forța totală necesară pentru deformarea unei bare de lungime  $l$  va fi:

$$F = 2k\left(1 + \frac{1}{2}\mu\frac{b}{h}\right)bl \quad (7.19)$$

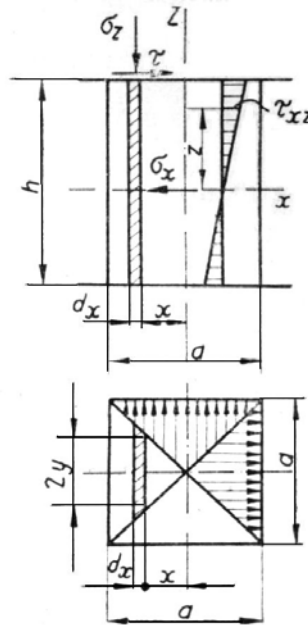
c. Procedând analog pentru  $\tau = k$  și  $\tau = \frac{2x}{b}k$  rezultă:

$$\sigma_z = 2k\left[1 + \frac{1}{h}\left(\frac{b}{2} - x\right)\right] \quad (7.20)$$

$$\sigma_z = 2k\left[1 + \frac{1}{bh}\left(\frac{b^2}{4} - x^2\right)\right] \quad (7.21)$$

### b. Semifabricat cu secțiune transversală patrată

Se consideră un semifabricat de secțiune transversală patrată cu înălțimea  $h$  și latura pătratului  $a$ . În acest caz schema stării de tensiuni este prezentată în fig. 7.8.



**Fig. 7.8** Schema stării de tensiuni la refularea unui semifabricat de secțiune transversală patrată între scule plan-paralele.

Pentru calculul forței de deformare și în acest caz se pleacă de la ecuația diferențială de echilibru pe axa X:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (7.22)$$

Pe baza celor prezentate anterior și în acest caz se pot face următoarele explicitări:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{d\sigma_x}{dx}; \quad \frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_z}{dx}; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \text{ deoarece } \varepsilon_y = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{2\tau}{h}$$

Inlocuind in relatia ( 7.22) rezulta:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{2\tau}{h} = 0 \quad (7.23)$$

de unde:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = -\frac{2\tau}{h}$$

$$d\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} dx \quad (7.24)$$

In relatia ( 7.24) adoptam pentru  $\tau$  legea de variatie  $\tau = \mu 2k$  :

$$d\sigma_z = -\frac{4\mu k}{h} dx \quad (7.25)$$

Integrand relatia ( 7.25) rezulta:

$$\sigma_z = -\frac{4\mu k}{h} x + C \quad (7.26)$$

Determinarea constantei C se face din conditiile initiale.

$$\text{La } x = \frac{a}{2} \quad \sigma_z = 2k$$

$$2k = -\frac{4\mu k}{h} \frac{a}{2} + C \quad \text{de unde } C = 2k + \frac{4\mu k}{h} \frac{a}{2}$$

Inlocuind constanta C in relatia ( 7.26) se va obtine:

$$\sigma_z = 2k \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \left( \frac{a}{2} - x \right) \right] \quad (7.27)$$

Fora totala de deformare va fi data de :

$$F = 4 \int_0^{a/2} \sigma_z 2y dx = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{a}{h} \right) a^2 \quad (7.28)$$

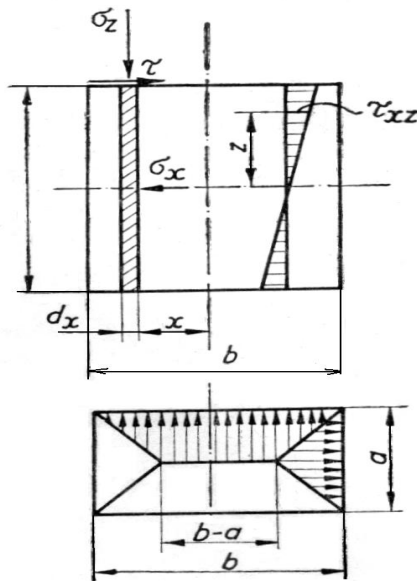
Presiunea specifica de deformare va fi:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{a^2} = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{a}{h} \right) \quad (7.29)$$

### c. Semifabricat cu sectiune transversala dreptunghiulara

In acest caz schema starii de tensiuni este prezentata in fig. 7.9 .





**Fig.7.9 Schema starii de tensiuni la refularea unui semifabricat cu sectiune transversala dreptunghiulara intre scule plan-paralele**

Din figura 7.9 se poate observa ca sectiunea dreptunghiulara a x b poate fi impartita in doua jumatati de patrat de latura a si un dreptunghi de dimensiune a x (b-a). In aceste conditii calculul fortei totale de deformare se poate face insumand componenta caracteristica sectiunii patrate cu cea a dreptunghiului.

$$F = 2k\left(1 + \frac{1}{3}\mu\frac{a}{h}\right)a^2 + 2k\left(1 + \frac{1}{2}\mu\frac{a}{h}\right)a(b-a)$$

Dupa ordonare rezulta:

$$F = 2k\left(1 + \mu\frac{3b-a}{6b}\frac{a}{h}\right)ab \quad (7.30)$$

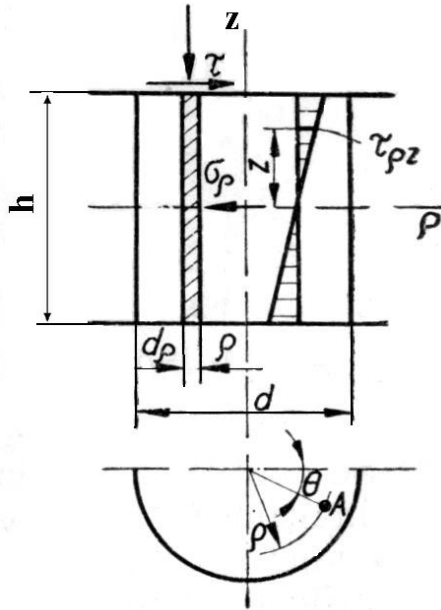
Relatia ( 7.30) este valabila pentru cazul in care  $b > a$ .

Presiune specifica de deformare va fi:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{a \cdot b} = 2k\left(1 + \mu\frac{3b-a}{6b}\frac{a}{h}\right) \quad (7.31)$$

#### **d. Semifabricat cu sectiune transversala circulara**

Schema starii de tensiuni pentru acest caz este prezentata in figura 7.10, presupunand ca in orice sectiune axiala starea de tensiuni este identica.



**Fig. 7.10 Schema starii de tensiuni la refularea unui semifabricat cu sectiune transversala circulara intre suprafete plan-paralele**

Pentru calculul fortei de deformare se pleaca de la ecuatia de echilibru in coordonate cilindrice pe axa  $\rho$ :

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}) = 0 \quad (7.32)$$

Termenii ecuatiei (7.32) vor fi explicitati astfel:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} = \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho}$$

Pe baza primei ipoteze a plasticitatii, putem scrie:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} = \frac{d\sigma_z}{d\rho}$$

Datorita simetriei axiale :

$$\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = 0 \text{ deoarece } \varepsilon_{\theta} = 0$$

Presupunand ca efortul tangential variaza liniar pe inaltimea semifabricatului, din asemanarea triunghiurilor dreptunghice formate avem:

$$\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} = \frac{2\tau}{h}$$

La deformatii mici se poate admite ca  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\rho}$  deci  $\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = 0$

Dupa inlocuirea celor de mai sus in relatia (7.32) rezulta:

$$\frac{d\sigma_z}{d\rho} + \frac{2\tau}{h} = 0 \text{ de unde}$$

$$d\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} d\rho \quad (7.33)$$

Daca se adopta legea de variatie a lui  $\tau$  sub forma:  $\tau = \mu 2k$ , dupa integrarea ecuatiei (7.33)

rezulta:

$$\sigma_z = -\frac{4\mu k}{h}\rho + C \quad (7.34)$$

Determinarea constantei de integrare C se face din conditii initiale:

$$\text{La } \rho = \frac{d}{2} \quad \sigma_z = 2k, \text{ iar } C = 2k + \frac{4\mu k}{h} \frac{d}{2}$$

Inlocuind constanta C in relatia (7.34) se obtine:

$$\sigma_z = 2k \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \right] \quad (7.35)$$

Fora totala de deformare se determina din expresia:

$$F = \int_0^{d/2} \sigma_z 2\pi\rho d\rho \quad (7.36)$$

Prin rezolvarea integralei de mai sus rezulta:

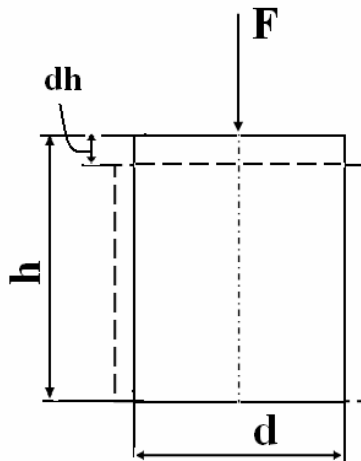
$$F = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right) \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.37)$$

Presiunea specifica de deformare va fi in acest caz:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d^2 / 4} = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right) \quad (7.38)$$

### Calculul energiei de deformare necesare la refulare

Se considera refularea unui semifabricat cilindric intre suprafete plan paralele (Fig.7.11).



**Fig. 7.11**

Energia elementară de deformare , la un moment dat al procesului refulării , corespunzător unei forțe de deformare F și a unei micșorări în înălțime cu dh este:

$$dE = Fdh$$

sau

$$dE = pAdh \quad (7.39)$$

unde:

p este presiunea de deformare

A, aria suprafetei de contact dintre semifabricat și sculele de deformare

Energia de deformare în acest caz va fi:

$$E = \int_{h_1}^{h_0} F dh = \int_{h_1}^{h_0} p A dh \quad (7.40)$$

În timpul deformării se modifică atât presiunea de deformare cât și aria suprafeței de contact.

Suprafața de contact poate fi scrisă și sub forma:

$$A = \frac{V}{h}$$

Deci relația 5.8 devine:

$$E = \int_{h_1}^{h_0} p \frac{V}{h} dh \quad (7.41)$$

Rezolvarea integralei 7.41 se poate face acceptându-se două situații:

1. dacă deformarea este relativ mică ( $\frac{h_0 - h_1}{h_0} < 0,1$ ) se poate considera că presiunea  $p$  nu variază mult în timpul deformării și se ia în calcul o presiune de deformare medie.

$$E = pV \ln \frac{h_0}{h_1} = \sigma_d \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h}\right) V \ln \frac{h_0}{h_1} = \sigma_d m V \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (7.42)$$

2. dacă deformarea este mare ( $\frac{h_0 - h_1}{h_0} > 0,1$ ) și presiunea  $p$  se modifică mult în timpul deformării, astfel că nu se mai considera o presiune medie de deformare. Rezultă astfel:

$$L = \int_{h_1}^{h_0} \sigma_d \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h}\right) V \frac{dh}{h} \quad (7.43)$$

Prin rezolvarea integralei de mai sus în condițiile constantei volumului ( $V = \frac{\pi d^2}{4} h$ ) se obține:

$$E = \sigma_d V \left[ \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{2}{9} \mu \left( \frac{d_1}{h_1} - \frac{d_0}{h_0} \right) \right] \quad (7.44)$$

Din relația 7.44 se poate observa că pentru  $\mu=0$  și  $p=\sigma_d$  energia de deformare este:

$$E = \sigma_d V \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (7.45)$$

### Studiul deformațiilor la refulare

În timpul refulării suprafața de contact poate să se mărească pe două căi:

1. prin trecerea materialului din interiorul semifabricatului spre suprafața de contact. În acest caz există alunecare la suprafața de contact semifabricat-sculă.
2. Prin trecerea materialului pe suprafața de contact de pe suprafața laterală a semifabricatului. În acest caz pe suprafața de contact semifabricat-scula alunecarea lipsește.

Pentru epruvete cu raportul  $d/h > 2$  suprafața de contact poate fi împărțită în trei zone (Fig. 7.12):

1. zona centrală a unde alunecarea practic lipsește, numită și zonă staționară.

2. Zona b unde este prezentă alunecarea și suprafața de contact se mărește prin trecerea materialului din interiorul epruvetei
3. Zona periferică c care se formează prin trecerea materialului de pe suprafața laterală a semifabricatului, unde alunecarea este prezentă, materialul fiind împins spre periferie de către zona b.

Raportul razelor acestor zone depinde de raportul  $d/h$  al epruvetei, de mărimea coeficientului de frecare  $\mu$  pe suprafața de contact și de mărimea gradului de deformare  $\epsilon$ .

Prezența zonelor staționare și de alunecare pe suprafața de contact, precum și a distribuției neuniforme a efortului tangential pe înălțimea semifabricatului supus deformării, fac ca starea de deformare să fie neuniformă în volumul acestuia.

În cazul refulării semifabricatelor cilindrice, neuniformitatea deformării se manifestă la exterior prin aceea că acestea primesc o formă de butoi. La aceleași dimensiuni ale epruvetelor și la același grad de deformare, forma de butoi este cu atât mai pronunțată cu cât coeficientul de frecare este mai mare (Fig. 7.13).

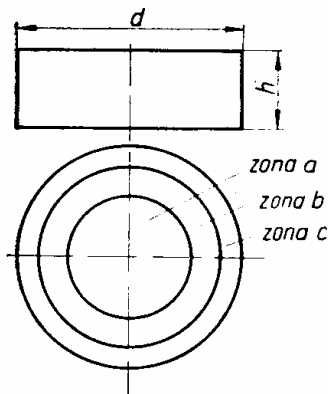
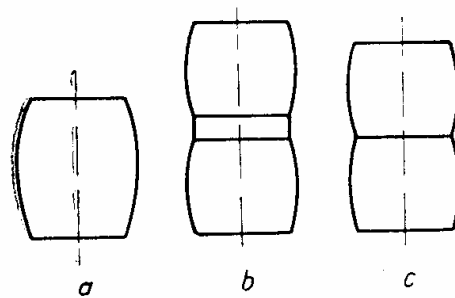


Fig. 7.12



$$a - \frac{d}{h} > \frac{1}{2}; \quad b - \frac{d}{h} < \frac{1}{2}; \quad c - \frac{d}{h} = \frac{1}{2}.$$

Fig. 7.13

### Calculul utilajului la refulare

În cazul în care refularea se realizează pe presă, forța de deformare se va calcula cu relația:

$$F_c = C_p A_s \tag{7.46}$$

unde:

C este un coeficient de siguranță  $C=1,1 \dots 1,2$

p-presiunea de deformare prin refulare

$A_s$ - secțiunea semifabricatului refulat în faza finală

Se va alege o presă a cărei forță de presare să îndeplinească condiția:

$$F > F_c \quad (7.47)$$

În cazul deformării pe ciocan, acesta se va alege pe baza lucrului mecanic necesar deformării la o lovitură.

$$L = pV_s \varepsilon_h \quad (7.48)$$

unde:

p este presiunea de deformare prin refulare

$V_s$ - volumul semifabricatului supus refulării

$\varepsilon_h$ - gradul de deformare prin refulare admis

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Cunoscându-se lucrul mecanic de refulare total ( $L_t$ ) și cel dat la o lovitură de ciocan ( $L_1$ ) se poate calcula numărul de lovituri ( $n$ ) necesare refulării semifabricatului de la înălțimea inițială  $h_0$  la înălțimea finală  $h_1$  folosindu-se relația:

$$n = \frac{L_t}{\eta L_1} \quad (7.49)$$

în care  $\eta$  este randamentul loviturii ( $\eta \approx 0,85$ )

### Cai de reducere a neuniformitatii deformațiilor la refulare

Reducerea neuniformitatii deformațiilor la refulare duce la îmbunătățirea caracteristicilor tehnologice și mecanice ale pieselor forjate. Dintre metodele utilizate în acest scop se pot aminti:

1. realizarea unor scule de forjare cu suprafața foarte finisată (cu rugozitate mică) și ungerea suprafețelor de lucru (ulei, grafit, rumegus) în vederea reducerii coeficientului de frecare.
2. utilizarea unor plăci sau inele intermediare așezate între sculele de lucru și semifabricat; materialul pieselor intermediare trebuie să aibă rezistența la deformare mai mică decât a materialului semifabricatului, astfel acestea jucând rolul unui lubrifian și reducând frecarea dintre scule și semifabricat.
3. refularea în pereche; se refulează împreună două piese suprapuse, obținându-se două semibutoaie, care apoi se rotesc cu  $180^\circ$  așezându-se din nou suprapuse însă cu baza mică în contact; ansamblul se va refula din nou, zona centrală mărindu-și diametrul mai mult, iar forma finală a ansamblului va fi aproximativ cilindrică (Fig. 7.14).

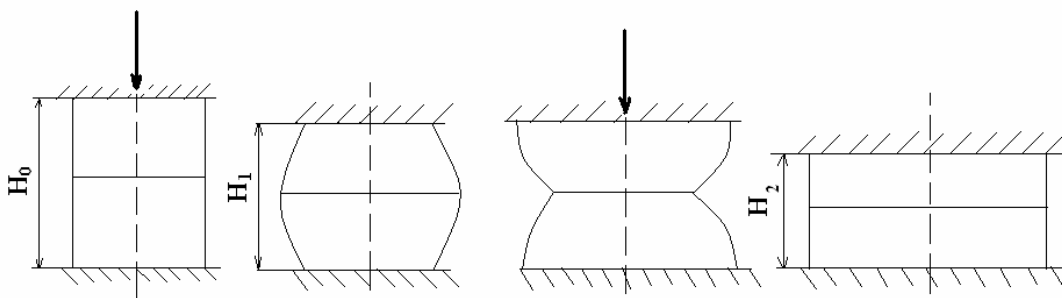


Fig. 7.14

**Stabilirea tehnologiei de forjare liberă prin refulare.**

Forma și dimensiunile piesei forjate prin refulare se stabilesc în funcție de forma și dimensiunile piesei finite la care se pun adaosuri de prelucrare și abateri limită. Mărimile adaosurilor de prelucrare și a abaterilor limită sunt date de STAS 2171.

La alegerea semifabricatului inițial trebuie să fie îndeplinite următoarele condiții:

1. gradul de deformare realizat prin refulare  $\varepsilon_d$  să fie mai mic decât un grad de deformare limită admis de material, în condițiile considerate  $\varepsilon_{da}$ :

$$\varepsilon_d = \frac{D-d}{d} \leq \varepsilon_{da} \quad (7.50)$$

Unde:  $d$  este diametrul semifabricatului înainte de refulare,

$D$  – diametrul semifabricatului după refulare.

Mărimea gradului de deformare limită admis se stabilește prin încercări pentru fiecare material în condițiile de deformare date.

Dacă se urmărește realizarea prin refulare a unor grade de deformare mai mari decât cel admis de material, atunci acesta se obține prin mai multe faze, cu operații intermediare de întindere, pentru înlăturarea din material a eforturilor de întindere, care pot provoca fisuri la partea laterală.

2. Raportul  $\psi$  dintre înălțimea  $h$  și diametrul  $d$  a semifabricatului trebuie să fie mai mic decât un raport limită admisibil pentru a se evita apariția flambajului în timpul refulării:

$$\psi = \frac{h}{d} \leq \psi_a \quad (7.51)$$

În general  $\psi_a = 2,2..2,5$

Pornindu-se de la volumul piesei forjate  $V_p$ , volumul semifabricatului inițial va fi:

$$V_{Si} = C_a V_p \quad (7.52)$$

unde:  $C_a$  este un coeficient care ține seama de pierderile prin ardere ( $C_a = 1,02 \dots 1,025$  în funcție de instalația de încălzire utilizată).

Considerand un semifabricat de secțiune circulară, din egalitatea:

$$V_{Si} = \frac{\pi d_{Si}^2}{4} h_{Si} = \frac{\pi d_{Si}^3}{4} \psi_a \quad (7.53)$$

rezultă că:

$$d_{Si} \geq \sqrt[3]{\frac{4V_{Si}}{\pi\psi_a}} \quad (7.54)$$

iar,

$$h_{Si} = \frac{4V_{Si}}{\pi d_{Si}^3} \quad (7.55)$$

În ce privește alegerea utilajului pe care se va executa operația de refulare, calculul acestuia se va face diferențiat dacă este vorba de presă sau de ciocan.

În cazul în care se lucrează pe prese hidraulice se va determina forța de deformare necesară refulării:

$$P = A \sigma_c \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d_{pf}}{h_{pf}}\right) \quad (7.56)$$

unde:  $A$  este aria semifabricatului refulat, [mm]

$\sigma_c$ , rezistența la curgere a materialului semifabricatului, [N/mm<sup>2</sup>]

$\mu$ , coeficient de frecare la deformare, uzual  $\mu = 0,3$

$d_{pf}, h_{pf}$ , dimensiunile semifabricatului refulat, [mm]

În cazul în care se lucrează pe un ciocan de forjare liberă se va determina lucrul mecanic necesar refulării, respective masa părții căzătoare a ciocanului.

$$L = V_{pf} p_m \ln \frac{h_0}{h_1} \approx V_{pf} p_m \varepsilon_1 \quad (7.57)$$

unde:  $p_m$  este presiunea medie de deformare  $p_m = \frac{2}{3}(p_f + \frac{1}{2}p_i)$  [N/mm<sup>2</sup>];  $p_f$  și  $p_i$  sunt presiunile de deformare la temperaturile de început și sfârșit ale deformării calculate cu relația lui Siebel:  $p = \sigma_c (1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h})$ ,

$h_0$  și  $h_1$  sunt înălțimile semifabricatului înainte și după o lovitură de ciocan,

$\varepsilon_1 \approx 0,1$ , gradul de deformare la o lovitură de ciocan

Energia de deformare la prelucrarea pe ciocane se obține din transformarea energiei cinetice de lovire a berbecului:

$$V_{pf} p_m \ln \frac{h_0}{h_1} = \frac{m_c v^2}{2} \eta \quad (7.58)$$

unde:  $m_c$  este masa părții căzătoare a ciocanului, [kg]

$v \approx 5 \dots 7$  m/s, viteza berbecului înainte de impact,

$\eta = 0,85 \dots 0,9$ , randamentul transformării energiei cinetice a berbecului în energie de deformare.

Din relația 7.58 se poate exprima masa părții căzătoare a ciocanului:

$$m_c = \frac{2 p_m V_{pf} \ln \frac{h_0}{h_1}}{v^2 \eta} \approx \frac{2 p_m V_{pf} \varepsilon_1}{v^2 \eta} \quad (7.59)$$

Se recomandă alegerea preseii hidraulice sau a ciocanului de forjare liberă necesare, cu caracteristici mai mari cu aproximativ 25% decât cele reieșite din calcul.

## 7.6.2 Întinderea

Întinderea este operația de prelucrare prin deformare care asigură mărirea lungimii semifabricatului și micșorarea secțiunii lui transversale. Fenomenele care apar la deformarea prin întindere sunt asemănătoare celor de la operația de deformare prin refulare. Deosebirile constau numai în următoarele :

- la întindere nu se deformează deodată toată masa materialului ci în mod treptat
- deformarea prin întindere are loc în general pe toate laturile semifabricatului, în mod succesiv și nu numai pe două laturi ca în cazul refulării.

Schema principală a procesului de întindere este prezentată în figura 7.15:

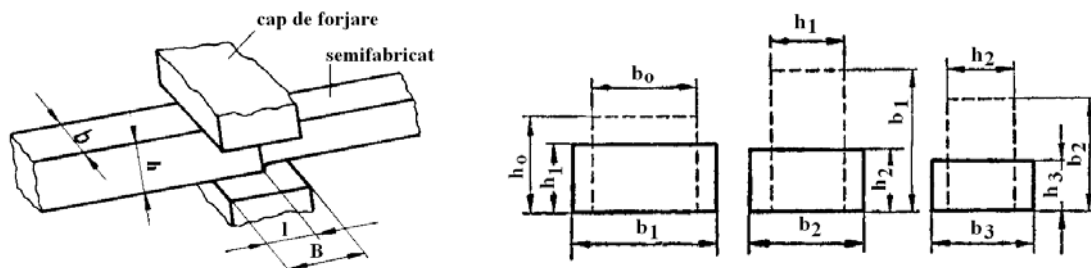


Fig.7.15



Elementele de bază ale procesului de întindere sunt:

### 1. Coroiajul

Este o mărime care reprezintă raportul dintre secțiunile semifabricatului înainte și după întindere.

$$y_1 = \frac{A_0}{A_1} = \frac{b_0 h_0}{b_1 h_1}$$

$$y_2 = \frac{A_1}{A_2} = \frac{b_1 h_1}{b_2 h_2}$$

$$y_n = \frac{A_{n-1}}{A_n}$$

Coroiajul total va fi:

$$y_T = \frac{A_0}{A_n} = \frac{b_0 h_0}{b_n h_n} = \frac{A_0}{A_1} \frac{A_1}{A_2} \frac{A_2}{A_3} \dots \frac{A_{n-1}}{A_n} = y_1 y_2 y_3 \dots y_n \quad (7.60)$$

### 2. Reducerea absolută totală:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (7.61)$$

### 3. Lățirea absolută

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (7.62)$$

### 4. Factorul de conversie

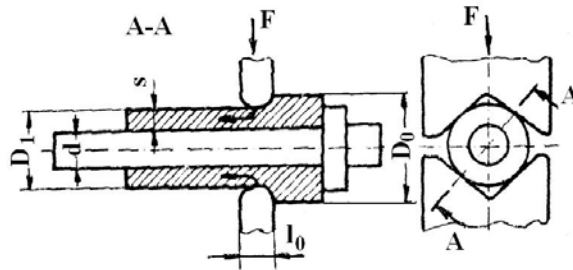
$$c = \frac{b_n}{h_n} \quad (7.63)$$

Condiția principală pentru ca prin întindere alungirea să fie cât mai mare este aceea ca lățimea B a nicovalei, în special a celei superioare, să fie mai mică decât înălțimea  $h_0$  sau latura a a semifabricatului. În acest sens, la întinderea semifabricatelor din oțel carbon sau aliate se recomandă utilizarea nicovalelor cu lățimea B de maximum 0,6...0,8 din latura secțiunii pătrate sau diametrul secțiunii rotunde a semifabricatului care se întinde.

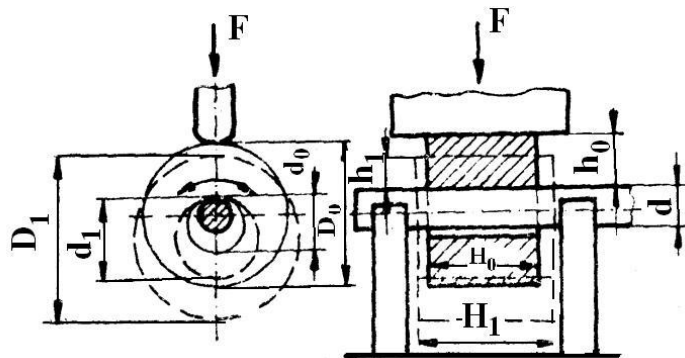
Reducerea  $\Delta h$  este în mod normal mai mică decât avansul l care de obicei se recomandă a fi în limitele (0,4...0,8)B.

Principalele variante ale întinderii sunt:

1. Întinderea simplă, are drept scop reducerea secțiunii semifabricatului cu valori constante pe toată lungimea sa.
2. Întinderea cu lățire, urmărește obținerea unei lățiri accentuate, prin aplicarea unui avans mare.
3. Întinderea profilată, se referă la forjarea semifabricatelor cu secțiune transversală variabilă, cu gaturii și proeminente.
4. Întinderea pe dorn a tuburilor (cu menținerea diametrului interior constant), se execută cu scopul de a mări lungimea semifabricatului și de a-i reduce diametrul exterior și grosimea peretelui.



5. Intinderea pe dorn a inelelor (cu modificarea diametrului interior), urmareste marirea diametrelor interior si exterior cu subtirea peretelui tubului.



Principalele reguli ale intinderii sunt:

1. In cazul intinderii lingourilor, la inceput trebuie aplicate grade mici de deformare pentru a evita aparitia fisurilor.
2. In cazul semifabricatelor dreptunghiulare raportul dimensiunilor transversale trebuie sa fie  $< 2$  pentru a evita flambarea, a avea o buna stabilitate la deformare si randament mare.
3. Avansul la intindere trebuie sa fie mai mic decat latimea nicovalei pentru ca la sfarsitul deformarii intrega cantitate de material supusa intinderii sa se gaseasca intre suprafetele sculelor.

### Calculul fortei si a presiunii de deformare la intindere

#### a. Intinderea intre suprafete plan paralele

Repartitia eforturilor la intinderea intre suprafete plan paralele pe sectiunea a-a difera in functie de marimea gradului de deformare. Cu cat gradul de deformare este mai mic, cu atat este mai mare efortul de intindere in partea centrala, dupa cum se poate observa in fig. 7.16.

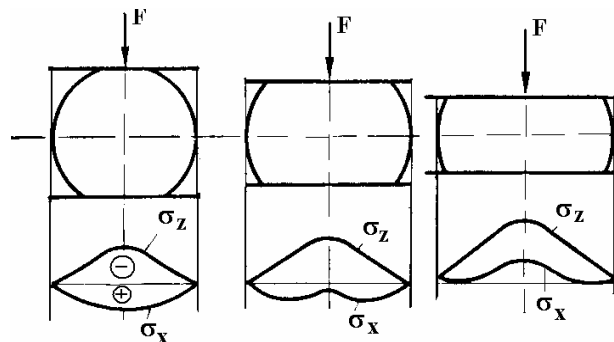


Fig.7.16

Cu cresterea gradului de deformare, respectiv a latirii suprafetei de contact, fortele de frecare cresc. Fortele de frecare avand sens contrar eforturilor de intindere, acestea se micsoreaza ajungand la grade de deformare mari sa se anuleze sau chiar sa devina eforturi de compresiune.

La întinderea semifabricatelor cu secțiunea transversală dreptunghiulară între suprafețe plan paralele, repartiția eforturilor unitare pe suprafața de contact și presiunea de deformare sunt similare cu cele de la refularea semifabricatelor cu secțiunea dreptunghiulară între suprafețe plan paralele.

Volumul de material aflat la un moment dat între nicovalele de întindere este  $hbl$  ( $l$  este avansul la întindere).

Pentru calculul presiunii de deformare în acest caz se folosesc relațiile:

$$p = 2k(1 + \mu \frac{3b-l}{6b} \frac{l}{h}) \quad \text{pentru } b > l \quad (7.64)$$

și

$$p = 2k(1 + \mu \frac{3l-b}{6l} \frac{b}{h}) \quad \text{pentru } b < l \quad (7.65)$$

Forța de deformare va fi dată de relația:

$$F = pbl$$

Lucrul mecanic de deformare la o lovitură de ciocan sau cursă a presei  $L_1$  va fi:

$$L_1 = p_1 V_1 \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (7.66)$$

unde:

$p_1$  este presiunea de deformare medie

$V_1$ - volumul de material supus deformării ( $V_1 = blh$ )

$h_0$  și  $h_1$ - înălțimea inițială și finală a semifabricatului

Lucrul mecanic de deformare calculat cu relația de mai sus corespunde deformării volumului  $V_1$  de la înălțimea  $h_0$  la  $h_1$ , fără întoarcerea semifabricatului deci la o cursă de lucru a utilajului.

După deformarea pe o direcție, înălțimea se micșorează de la  $h_0$  la  $h_1$ , iar lățimea se mărește de la  $b_0$  la  $b_1$ . După o întoarcere cu  $90^\circ$  (pentru a doua etapă a deformării)  $b_1$  devine înălțime și  $h_1$  devine lățime.

Pentru cea de a 2 a etapă a întinderii lucrul mecanic de deformare va fi:

$$L_2 = p_2 V_2 \ln \frac{b_1}{h_2} \quad (7.67)$$

Pentru următoarele etape vom avea:

$$L_n = p_n V_n \ln \frac{b_{n-1}}{h_n} \quad (7.68)$$

Lucrul mecanic de deformare total va fi :

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (7.69)$$

Considerand:

$V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$  și  $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$

Rezultă:

$$L = pV \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \frac{b_1}{h_2} \frac{b_2}{h_3} \dots \frac{b_{n-1}}{h_n} \right) \quad (7.70)$$

sau

$$L = pV \ln \left( \frac{h_0}{h_n} \frac{b_1}{h_1} \frac{b_2}{h_2} \dots \frac{b_{n-1}}{h_{n-1}} \right) \quad (7.71)$$

### b. Întinderea între suprafețe profilate

Întinderea se poate realiza și între suprafețe profilate. Câteva exemple sunt prezentate în figura 7.17.

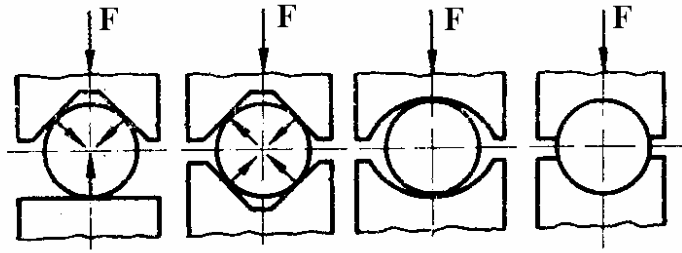


Fig. 7.17

Nicovalele profilate asigură o alungire mare în dauna lățirii, care se reduce și în plus creează o stare de tensiuni de compresiune care evită apariția fisurilor. De aceea acest tip de întindere se utilizează pentru deformarea lingourilor și a oțelurilor cu plasticitate redusă.

Suprafețele profilate nu creează de la început o stare de eforturi de compresiune pe toate laturile, însă efortul de întindere pe secțiunea a-a este mult mai mic decât în cazul deformării între suprafețe plan-paralele. Fig.7.18 prezintă modul de evoluție a tensiunilor pe secțiunea întinsă, observându-se reducerea eforturilor de întindere de la un unghi de contact de  $90^\circ$  până la unghiul de  $150^\circ$  unde pe toată secțiunea apar numai eforturi de compresiune.

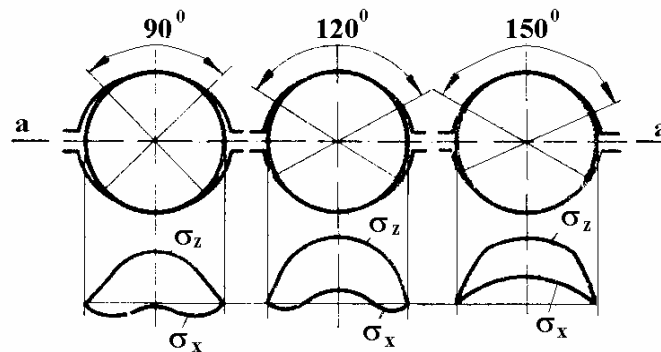


Fig.7.18

Pentru calculul forței de deformare se pornește de la ecuația diferențială de echilibru în coordonate cilindrice de forma:

$$\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{\rho z}}{\rho} = 0 \quad (7.72)$$

În practică  $l < 2d$ , unde  $l$  este lungimea de contact dintre semifabricat și suprafețele profilate, iar  $d$  este diametrul semifabricatului. Astfel în analogie cu operația de refulare se poate aproxima ca repartiția eforturilor este cea prezentată în fig. 7.19.

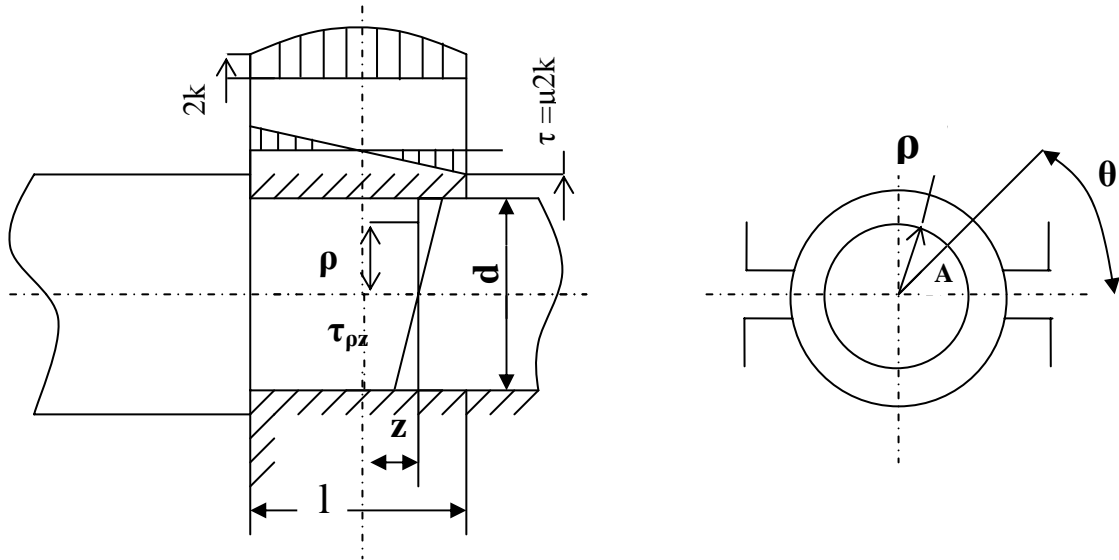


Fig. 7.19

In conditiile de deformare de mai sus se poate aproxima ca:

$$\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} = \frac{\tau_{\rho z}}{\rho} = \frac{2\tau_k}{d}; \quad \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{d\sigma_z}{dz}$$

Tinand seama de cele de mai sus ec. (7.72) devine:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{4\tau_k}{d} = 0 \quad (7.73)$$

Variatia efortului  $\tau_k$  cu variabila  $z$  este:

$$\frac{\tau_k}{z} = \frac{\tau_{\max}}{l/2} = \frac{4\mu k}{l},$$

De unde:

$$\tau_k = 4\mu k \frac{z}{l}$$

Pe baza ecuatiei diferentiale de plasticitate putem scrie:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{d\sigma_\rho}{dz} \quad (7.74)$$

Inlocuindu-se relatia (7.74) in (7.73) se obtine:

$$\frac{d\sigma_\rho}{dz} + \frac{16\mu k}{ld} z = 0$$

Sau

$$d\sigma_\rho = -\frac{16\mu k}{ld} z dz \quad (7.75)$$

Prin integrarea relatiei de mai sus se obtine:

$$\sigma_\rho = -8\mu k \frac{z^2}{ld} + C \quad (7.76)$$

Pentru determinarea constantei de integrare se pleaca de la conditiile limita: pentru

$$z=l/2, \quad \sigma_\rho = 2k, \quad \text{deci } C = 2k + 8\mu k \frac{l^2}{4ld}$$

Relatia (7.76) devine:

$$\sigma_{\rho} = 2k \left[ 1 + \frac{4\mu}{ld} \left( \frac{l^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad (7.77)$$

Forța de deformare va fi:

$$F = 2 \int_0^{l/2} \sigma_{\rho} dz = 4kd \int_0^{l/2} \left[ 1 + \frac{4\mu}{ld} \left( \frac{l^2}{4} - z^2 \right) \right] dz$$

Prin integrare rezulta:

$$F = 2k \left( 1 + \frac{2}{3} \mu \frac{l}{d} \right) ld \quad (7.78)$$

Presiunea de deformare va fi:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{ld} = 2k \left( 1 + \frac{2}{3} \mu \frac{l}{d} \right) \quad (7.79)$$

În calculul de mai sus s-a considerat unghiul de contact maxim adică  $\alpha = 180^\circ$ . Pentru  $\alpha < 180^\circ$ , relațiile (7.78), (7.79) vor fi:

$$F = 2k \left( 1 + \frac{2}{3} \mu \frac{\alpha}{\pi} \frac{l}{d} \right) ld \quad (7.80)$$

Și

$$p = 2k \left( 1 + \frac{2}{3} \mu \frac{\alpha}{\pi} \frac{l}{d} \right) \quad (7.81)$$

### Calculul utilajului de întindere

Întinderea se poate realiza pe ciocane sau pe prese.

Calculul forței de presare în cazul întinderii pe presă se calculează cu relația:

$$F_c = p_m A_c \quad (7.82)$$

unde:

$p_m$  este presiunea medie de deformare

$A_c$ - suprafața de contact sculă-semifabricat

$$A_c = bl$$

Deci:

$$F_c = p_m bl \quad (7.83)$$

Se va alege o presă a cărei forță de presare să fie superioară forței calculate:  $F > F_c$

Lucrul mecanic necesar deformării la o lovitură de ciocan este:

$$L = p_m V \varepsilon_h \quad (7.84)$$

unde:

$p_m$  este presiunea medie de deformare

$V$ -volumul de material supus deformării

$\varepsilon_h$ - gradul de deformare pe înălțime realizat la o lovitură de ciocan

### Stabilirea tehnologiei de forjare liberă prin întindere

Forma și dimensiunile pieselor forjate prin întindere se stabilesc în funcție de forma și dimensiunile piesei finite la care se pun adaosuri de prelucrare și abateri limită, care se găsesc în STAS 2171.

La întocmirea desenului piesei forjate liber în cazul unor arbori cu secțiuni variabile de-a lungul axei, în afară de adaosurile de prelucrare este uneori necesar a se pune și adaosuri suplimentare. Aceste adaosuri sunt necesare din următoarele motive:

- cand o anumită piesă nu se poate obține prin forjare liberă așa cum cere desenul piesei finite
- cand o anumită porțiune diferă puțin de altă porțiune învecinată și nu este economic a se obține prin forjare.

În aceste cazuri piesa forjată se simplifică față de piesa finită, urmând ca adaosurile suplimentare să fie înlăturate prin așchiere.

Mărimea de bază a semifabricatului inițial supus întinderii este secțiunea lui. Aceasta se calculează în funcție de mărimea secțiunii maxime a piesei ce urmează a se obține prin forjare, folosind relația:

$$A_{Si} = yA_p \quad (7.85)$$

unde;  $A_{Si}$  este secțiunea semifabricatului inițial

$A_p$ , secțiunea maximă a piesei ce urmează a se forja

$y$ , gradul de deformare a secțiunii.

Gradul de deformare  $y$  se stabilește în funcție de starea semifabricatului inițial. Dacă acesta este sub formă de lingou,  $y = 3..6$ ; dacă se pornește de la semifabricat laminat  $y \approx 1,5$ .

Valoarea secțiunii inițiale astfel calculată va fi standardizată la o valoare superioară celei rezultate din calcul.

Volumul semifabricatului inițial se determină pornind de la volumul piesei forjate la care se vor mai adăuga pierderile rezultate din încălzire și din căzături.

$$V_{Si} = V_p + V_c + V_a \quad (7.86)$$

unde  $V_p$  este volumul piesei forjate,

$V_c$ , volumul pierderilor prin căzături,

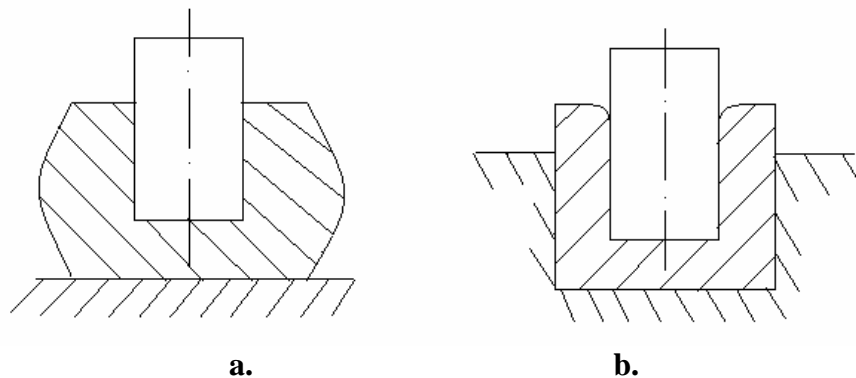
$V_a$ , volumul pierderilor prin arderi.

Cunoscând secțiunea și volumul semifabricatului inițial poate fi determinată lungimea acestuia:

$$l_{Si} = \frac{V_{Si}}{A_{SiSTAS}} \quad (7.87)$$

### 7.6.3. Găurirea

Găurirea este o operație de forjare liberă des întâlnită la execuția inelelor. Ea poate fi deschisă sau închisă(fig.7.20).



**Fig. 7.20**  
a. gaurirea deschisa; b. gaurirea inchisa

La găurirea deschisă partea laterală a semifabricatului este liberă, materialul dislocat de poanson deplasându-se mai ales lateral. În urma găuririi, înălțimea semifabricatului de obicei se micșorează. Gradul de micșorare a înălțimii depinde de raportul  $D/d$  ( $D$  fiind diametrul exterior al semifabricatului și  $d$ -diametrul dornului de găurire).

Cu cât este mai mic raportul  $D/d$  cu atât mai mare va fi reducerea în înălțime a semifabricatului în timpul găuririi.

Găurirea deschisă se aplică în cazul pieselor mijlocii și mari realizate în serie mică. Găurirea deschisă se poate realiza cu dorn plin sau cu dorn inelar. Dornurile pline se folosesc pentru găurirea semifabricatelor cu  $D < 500\text{mm}$ , iar cele tubulare pentru semifabricate cu  $D > 500\text{mm}$ .

La găurirea închisă curgerea materialului în timpul găuririi este limitată de o matriță (inel). Materialul dislocat de către dorn se deplasează pe lângă dorn, măbind înălțimea semifabricatului. Cu cât raportul  $D/d$  este mai mic, cu atât creșterea în înălțime a semifabricatului va fi mai mare. Găurirea închisă este aplicată pieselor mijlocii și mici realizate în serie mare.

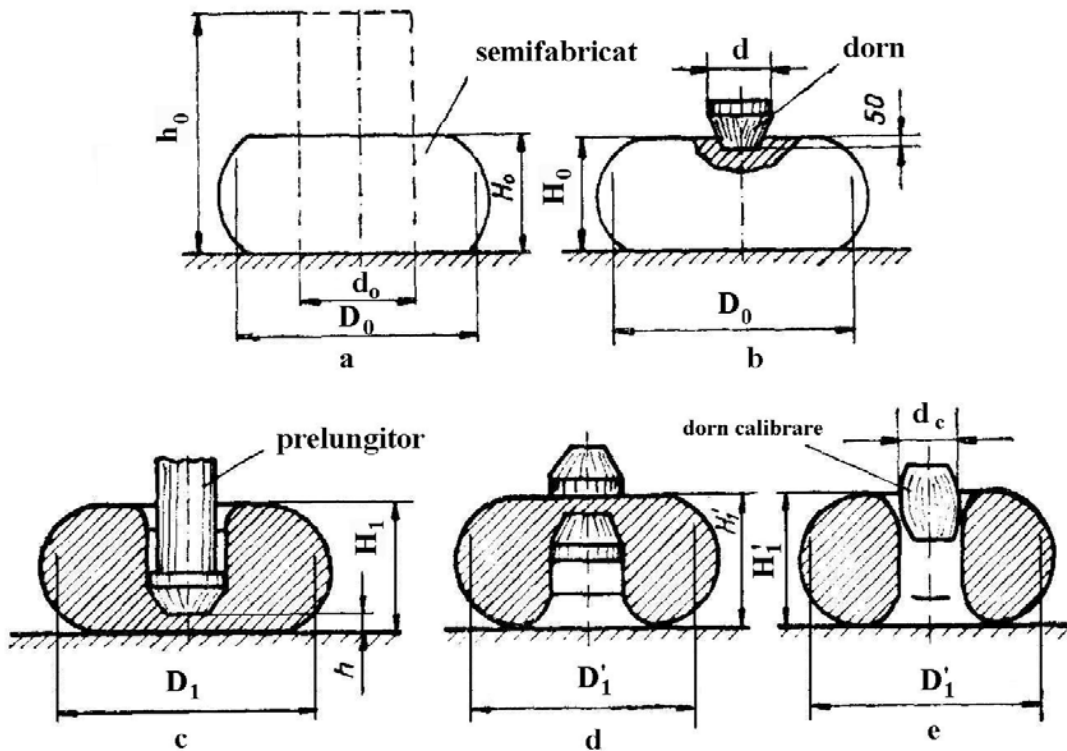
#### **a. Găurirea deschisă**

Tehnologia găuririi deschise cu dorn plin este prezentată în figura 7.21.

Etapele de găurire sunt:

1. semifabricatul este refulat la  $D_1 = (3 \dots 5)d$
2. se centrează dornul și se pătrunde în material pe o înălțime de aprox 50mm
3. se îndepărtează dornul și se introduce lubrifiant ,care are rolul să micșoreze frecarea dintre dorn și material
4. se execută apoi găurirea până la înălțimea  $h = (0,25 \dots 0,5)H_0$
5. se rotește materialul cu  $180^\circ$  și se elimină punțița de material
6. se execută calibrarea găurii cu un dorn care are diametrul maxim mai mare cu 5% față de dornul de străpungere.





a- refularea; b- realizarea cavitatii pentru lubrifiant; c- gaurirea; d- perforarea; e- calibrarea

Fig. 7.21

Pentru calculul forței de deformare la găurirea deschisă se consideră găurirea unui semifabricat cilindric de diametru  $D$  și înălțime  $H$  cu un dorn cilindric de diametru  $d$  cu suprafața frontală plată (fig. 7.22).

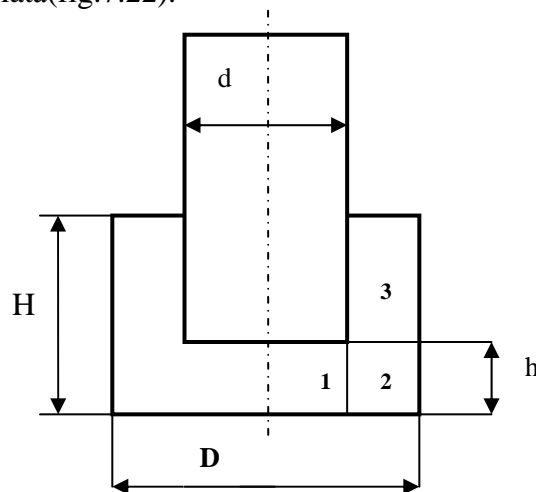


Fig. 7.22

Analizandu-se găurirea la un moment dat, semifabricatul se poate împărți în trei părți distincte:

- partea cilindrică centrală 1 de diametru  $d$  și înălțime  $h$ , care în timpul deformării este supusă la refulare.
- partea inelară 2 de înălțime  $h$  care franează deformarea porțiunii 1 și exercită asupra părții ei laterale ei o presiune interioară.
- partea inelară(găurită) 3 care în timpul găuririi nu mai necesită forță de deformare ci poate crea o forță de frecare asupra dornului.

### Calculul fortei si al presiunii de deformare la gaurirea deschisa

Pentru calculul fortei de deformare la gaurirea deschisa se pleaca de la zona 1, pentru care se considera starea de tensiuni de la refularea semifabricatelor cilindrice intre scule plan-paralele. Pentru aceasta se scrie ecuatia de echilibru a tensiunilor in coordonate cilindrice pe axa  $\rho$  de forma:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}) = 0 \quad (7.88)$$

Deformarea fiind uniforma in orice sectiune axiala se poate scrie:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} = \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho}; \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = 0; \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} = \frac{2\tau_{\max}}{h} = \frac{2k}{h}; \sigma_{\rho} = \sigma_{\theta} \quad (7.89)$$

De asemenea  $\sigma_z$  si  $\sigma_{\rho}$  se pot considera tensiuni principale si pe baza ipotezelor plasticitatii si a ecuatiei diferentiale a plasticitatii se poate scrie:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} = \frac{d\sigma_z}{d\rho}$$

Inlocuind cele de mai sus in relatia (7.88) se ajunge la:

$$\frac{d\sigma_z}{d\rho} + \frac{2k}{h} = 0 \quad (7.90)$$

Prin integrarea relatiei (7.90) se obtine:

$$\begin{aligned} d\sigma_z &= -\frac{2k}{h} d\rho \\ \sigma_z &= -\frac{2k}{h} \rho + C \end{aligned} \quad (7.91)$$

Determinarea constantei  $C$  se face din conditiile initiale :

la  $\rho = \frac{d}{2}$ ,  $\sigma_z = \sigma'_z$ ,  $\sigma'_z$  fiind tensiunea la nivelul zonei de interdependenta dintre zonele 1 si 2.

Pe baza conditiilor initiale de mai sus, constanta  $C$  devine:

$$C = \sigma'_z + \frac{2k}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \quad (7.92)$$

Pentru determinarea tensiunii  $\sigma'_z$  se face urmatorul rationament:

- la nivelul coordonatelor  $\rho = \frac{d}{2}$  si  $z = \frac{h}{2}$ , tensiunile  $\sigma'_z$  si  $\sigma'_\rho$  pot fi considerate principale si pe baza ecuatiei de plasticitate avem:

$$\begin{aligned} \sigma'_z - \sigma'_\rho &= 2k \\ \sigma'_z &= \sigma'_\rho + 2k \end{aligned} \quad (7.93)$$

- pentru determinarea tensiunii radiale  $\sigma'_\rho$ , pe baza metodei liniilor de alunecare la interfata dintre zonele 1 si 2 apare o solicitare identica cu actiunea unei presiuni interioare asupra unui inel, deci poate fi calculata cu relatia:

$$\sigma'_\rho = 2k \ln \frac{D}{d} \quad (7.94)$$

unde:  $k$  este tensiunea tangentiala maxima,  
 $D$ - diametrul exterior al semifabricatului supus gauririi,  
 $d$ - diametrul dornului.

Inlocuind cele de mai sus in relatia ( 7.93) obtinem:

$$\sigma'_z = 2k \left( 1 + \ln \frac{D}{d} \right)$$

$$\sigma_z = 2k \left[ 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \right] \quad (7.95)$$

Cunoscandu-se tensiunea  $\sigma_z$ , forta totala de gaurire se poate determina din integrala:

$$F = \int_0^{\frac{d}{2}} \sigma_z 2\pi\rho d\rho = 4\pi k \int_0^{\frac{d}{2}} \left[ 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \right] \rho d\rho \quad (7.96)$$

$$F = 2k \left( 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right) \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.97)$$

Presiunea specifica de deformare va fi:

$$p = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = 2k \left( 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right) \quad (7.98)$$

In relatiile de mai sus daca se tine cont si de frecarea poanson-material pentru zona 3, cazul cand poansonul este putin conic sau urmare a racirii apare contractia pe dorn, componenta suplimentara a fortei totale va fi:

$$F_f = \pi d(H - h)\tau = \pi d(H - h)\mu 2k$$

Rezulta astfel forta totala de deformare:

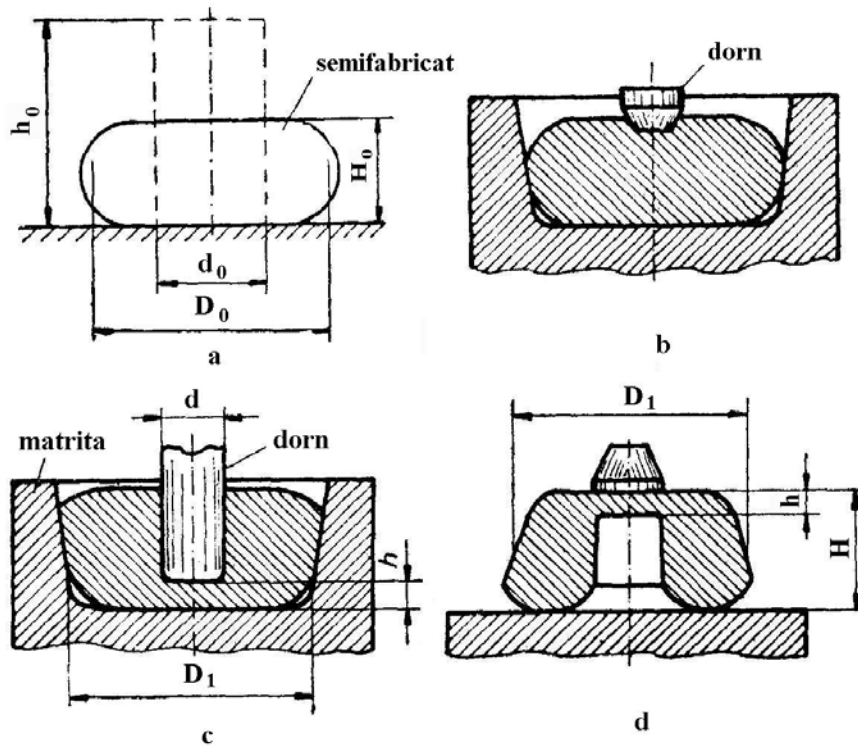
$$F = 2k \left( 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{6} \frac{d}{h} + 4\mu \frac{H - h}{d} \right) \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.99)$$

Presiunea specifica de deformare va avea expresia:

$$p = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = 2k \left( 1 + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{6} \frac{d}{h} + 4\mu \frac{H - h}{d} \right) \quad (7.100)$$

## b. Găurirea închisă

Tehnologia găuririi închise este prezentată în figura 7.23. Spre deosebire de găurirea deschisă descrisă mai sus, cea închisă se execută cu semifabricatul introdus într-o matriță. Această metodă se folosește în cazul găuririi materialelor care au plasticitate mai scăzută.



a- refularea; b- realizarea cavitatii pentru lubrifiant; c- gaurirea in matrita; d- perforarea

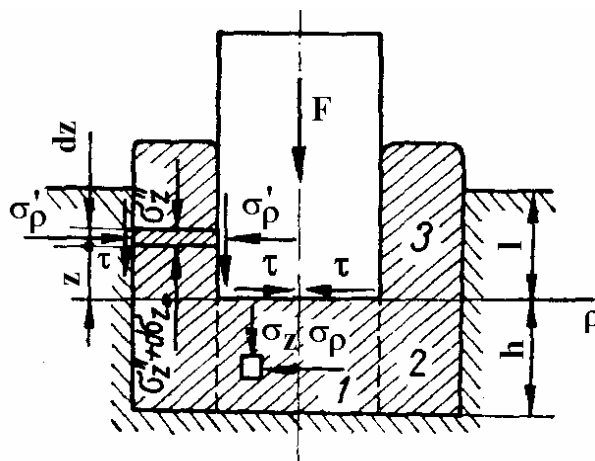
Fig. 7.23

Pentru calculul forței de deformare la găurirea închisă se consideră găurirea unui semifabricat într-o matriță de diametru D cu un dorn cilindric plin de diametru d (Fig.7.24).

Analizand găurirea închisă aceasta constă din refularea porțiunii cilindrice 1 de sub poanson(de diametru d și înălțime h) și împingerea materialului dislocat de poanson prin spațiul dintre matriță și poanson.

Abordarea calculului fortei se face plecand tot de la zona cilindrica 1, supua refularii, care este identica cu cea de la gaurirea deschisa, astfel relatia de calcul pentru  $\sigma_z$  este:

$$\sigma_z = \sigma'_z + \frac{2k}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \quad (7.101)$$



**Fig. 7.24 Schema tensiunilor la gaurirea inchisa**

$\sigma'_z$  si  $\sigma'_\rho$  fiind tensiuni principale, pe baza ecuatiei simplificate a plasticitatii avem:

$$\sigma'_z = \sigma'_\rho + 2k \quad (7.102)$$

Aplicand din nou ecuatiile plasticitatii pentru punctul  $z=0$ ,  $\rho = \frac{d}{2}$ , unde  $\sigma'_\rho$  si  $\sigma''_z$  sunt tensiuni principale avem:

$$\begin{aligned} \sigma'_\rho - \sigma''_z &= 2k \\ \sigma'_\rho &= 2k + \sigma''_z \end{aligned} \quad (7.103)$$

Pentru determinarea lui  $\sigma''_z$  se va scrie ecuatiile de echilibru pe axa  $z$  a tensiunilor care actioneaza asupra elementului de grosime  $dz$  din zona 3:

$$(\sigma''_z + d\sigma''_z) \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \sigma''_z \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \pi(D+d)\tau dz = 0$$

sau

$$d\sigma''_z = \frac{4\tau}{D-d} dz \quad (7.104)$$

Daca se considera  $\tau = \mu 2k$  rezulta:

$$d\sigma''_z = 8\mu k \frac{dz}{D-d} \quad (7.105)$$

Prin integrare rezulta:

$$\sigma''_z = 8\mu k \frac{z}{D-d} + C \quad (7.106)$$

Determinarea constantei de integrare  $C$  se face punand conditiile initiale cand la  $z=l$ ,  $\sigma''_z = 0$  deci:

$$C = -8\mu k \frac{l}{D-d}$$

iar

$$\sigma''_z = -8\mu k \frac{l-z}{D-d} \quad (7.107)$$

Se determina  $\sigma''_z$  la  $z=0$  deci:

$$\sigma''_z = -8\mu k \frac{l}{D-d}$$

Se inlocuieste  $\sigma''_z$  in relatia (7.103) rezultand:

$$\sigma'_\rho = 2k + 8\mu k \frac{l}{D-d} = 2k \left( 1 + 4\mu \frac{l}{D-d} \right) \quad (7.108)$$

Se inlocuieste  $\sigma'_\rho$  in relatia (7.102) si se obtine:

$$\sigma'_z = 2k \left( 2 + 4\mu \frac{l}{D-d} \right) \quad (7.109)$$

Pe baza celor de mai sus din relatia (7.101) rezulta:

$$\sigma_z = 2k \left[ 2 + 4\mu \frac{l}{D-d} + \frac{1}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \right] \quad (7.110)$$

Forța de deformare se determina din integrala:

$$F = \int_0^{\frac{d}{2}} \sigma_z 2\pi\rho d\rho = 4\pi k \int_0^{\frac{d}{2}} \left[ 2 + 4\mu \frac{l}{D-d} + \frac{1}{h} \left( \frac{d}{2} - \rho \right) \right] \rho d\rho \quad (7.111)$$

$$F = 2k \left( 2 + 4\mu \frac{l}{D-d} + \frac{d}{6h} \right) \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.112)$$

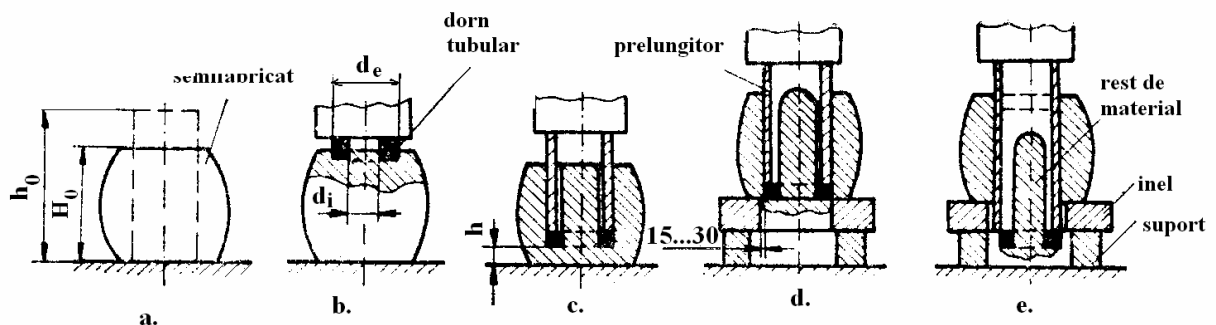
Presiunea de deformare devine:

$$p = \frac{F}{\pi d^2} = 2k \left( 2 + 4\mu \frac{l}{D-d} + \frac{d}{6h} \right) \quad (7.113)$$

Comparand relatiile (7.100) si (7.113) se observa ca presiunea de deformare, odata cu cresterea diametrului  $D$  al semifabricatului, creste la gaurirea deschisa si scade la gaurirea inchisa.

### c. Găurirea deschisa cu dornuri inelare

Găurirea cu dornuri inelare se practică numai pentru perforări pătrunse, cand se cer găuri cu diametrul mai mare de 500 mm și în cazurile cand se impune eliminarea din centul lingourilor a segregatiilor zonale (Fig.7.25) .



a. refularea   b. obtinerea cavitatii pentru lubrifiant   c. gaurirea   d si e perforarea cu sprijin pe inel

Fig. 7.25

Fora totala de deformare in acest caz include urmatoarele componente (Fig.7.26):

$$F = F_e + F_i + F_d \quad (7.114)$$

unde:  $F_e$  este forta de frecare pe partea exterioara a dornului,

$F_i$ , forta de frecare pe partea interioara a dornului,

$F_d$ , forta de deformare de sub dorn.

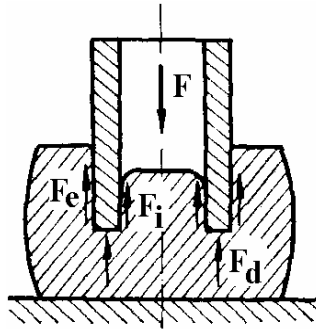


Fig. 7.26

Forțele de frecare se vor calcula considerand frecare coulombiana ( $\tau = \mu p$ ) astfel:

$$F_e = \pi d_e l \mu p_e \qquad F_i = \pi d_i l \mu p_i$$

unde:  $l$  este lungimea gaurii

$\mu$ , coeficientul de frecare dintre dorn si semifabricat,

$p_e, p_i$ , presiunile interioare si exterioare.

In cazul in care presiunea interioara si exterioara sunt identice, atunci la inceputul curgerii se admite:  $p_e = p_i = 2k$ .

Pe baza celor de mai sus forțele exterioare si interioare devin:

$$F_e = 2k\pi\mu d_e l \qquad F_i = 2k\pi\mu d_i l \qquad (7.115)$$

Pentru calculul componente  $F_d$ , se poate utiliza relatia dedusa la patrunderea unui poanson cu cap plat intr-un corp semiinfinit, dedusa prin metoda liniilor de alunecare.

Astfel presiunea de deformare se determina cu formula

$$p = 2k(1 + \pi) \qquad (7.116)$$

Forța de deformare se sub dorn devine:

$$F_d = p \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2)$$

$$F_d = 2k(1 + \pi) \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \qquad (7.117)$$

Tinand seama de expresiile de mai sus, forța de deformare la gaurirea deschisa cu dorn inelar devine:

$$F = 2k(1 + \pi + 4\mu \frac{l}{d_e - d_i}) \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \qquad (7.118)$$

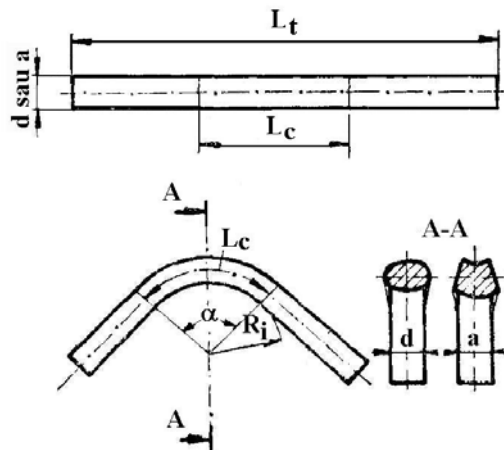
Presiunea de deformare se va determina cu relatia:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(d_e^2 - d_i^2)} = 2k(1 + \pi + 4\frac{l}{d_e - d_i}) \qquad (7.119)$$

#### 7.7.4. Indoirea

Este operatia prin care axa longitudinala si rectilinie a unui semifabricat se modifica dupa o traiectorie prestabilita.

La indoirea semifabricatelor partea exterioara a portiunii indoite este supusa tensiunilor de intindere, iar partea interioara tensiunilor de comprimare (Fig. 7.27).



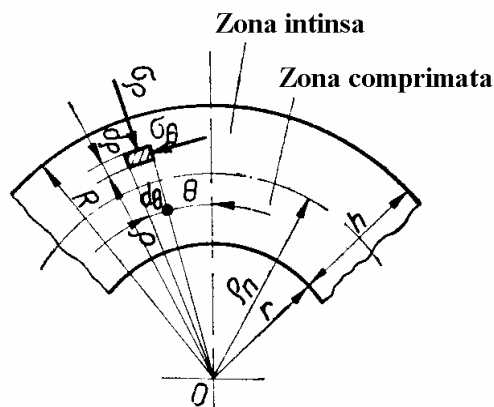
**Fig. 7.27**

Tensiunile de intindere si comprimare au in zona de curbura influente nefavorabile atat asupra formei geometrice a semifabricatelor cat si asupra integritatii materialului. Zona de curbura isi schimba forma trecand de la rotund la oval si de la patrat la trapez, transformari care sunt insotite si de aparitia unor ondulari pe partea interioara a zonei curbate. Aceste fenomene impun o pregătire tehnologică prealabilă a semifabricatelor. Pregătirea constă pe de o parte în încălzirea corespunzătoare a materialului, iar pe de altă parte în realizarea unor surplusuri de material în zona care se îndoaie , astfel încat după executarea îndoirii să rezulte secțiuni uniforme pe tot conturul.

### Starea de eforturi unitare la indoire

Presupunand ca in timpul indoirii nu are loc si latirea semifabricatului, se poate considera ca starea de eforturi unitare si de deformatii este plana(Fig.7.28). Pe aceasta baza, se poate scrie ecuatia diferentiala de echilibru in coordonate cilindrice in raport cu axa  $\rho$  sub forma:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}) = 0 \quad (7.120)$$



**Fig. 7.28**

Considerand ca:  $\tau_{\rho\theta} = \tau_{\rho z} = 0$ , ecuatia ( 7.120) se poate scrie:



$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{1}{\rho}(\sigma_\rho - \sigma_\theta) = 0 \quad (7.121)$$

Apreciind ca  $\sigma_\rho$  si  $\sigma_\theta$  sunt eforturi normale principale, se poate scrie ecuatia de plasticitate, pentru zona in care  $\sigma_\theta$  este tensiune de tractiune:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = 2k \quad (7.122)$$

Iar in zona in care  $\sigma_\theta$  este de compresiune:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = -2k \quad (7.123)$$

Variatia eforturilor unitare  $\sigma_\rho$  si  $\sigma_\theta$  pe sectiunea semifabricatului se determina prin rezolvarea sistemului de ecuatii (7.121), (7.122) si (7.123).

Inlocuindu-se in relatia (7.121), diferenta  $(\sigma_\rho - \sigma_\theta)$  din relatia (7.122) aceasta devine:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{2k}{\rho} = 0$$

Sau:

$$d\sigma_\rho = 2k \frac{d\rho}{\rho} \quad (7.124)$$

Constanta de integrare se determina din conditia ca pentru  $\rho = R, \sigma_\rho = 0$ :

$$C = -2k \ln R$$

Deci:

$$\sigma_\rho' = -2k \ln \frac{R}{\rho} \quad (7.125)$$

Daca valoarea lui  $\sigma_\rho'$  se introduce in ecuatia de plasticitate (7.122) rezulta:

$$\sigma_\theta' = 2k(1 - \ln \frac{R}{\rho}) \quad (7.126)$$

Similar pentru zona in care  $\sigma_\theta$  este tensiune de compresiune, se deduce:

$$\sigma_\rho'' = -2k \ln \frac{\rho}{r} \quad (7.127)$$

Si

$$\sigma_\theta'' = -2k(1 + \ln \frac{\rho}{r}) \quad (7.128)$$

Planul neutru care desparte zonele determinate de raza  $\rho_n$ , se stabileste din conditia ca in acest plan  $\sigma_\rho$ , corespunzator zonei de intindere, sa fie egal cu  $\sigma_\rho$ , corespunzator zonei de compresiune, astfel:

$$-2k \ln \frac{R}{\rho_n} = -2k \ln \frac{\rho_n}{r}$$

De unde rezulta:

$$\rho_n = \sqrt{Rr} \quad (7.129)$$

Din relatiile (7.125) si (7.127) rezulta ca efortul  $\sigma_\rho$  este maxim in planul neutru, cand

$$\rho = \rho_n.$$

Considerand ca planul neutru se gaseste pe axa piesei, deci  $\rho_n \approx \frac{R+r}{2}$ , se poate scrie

ca:

$$\frac{R}{\rho_n} = \frac{\rho_n + \frac{h}{2}}{\rho_n} = 1 + \frac{h}{2\rho_n} \quad \text{si} \quad \frac{\rho_n}{r} = \frac{r + \frac{h}{2}}{r} = 1 + \frac{h}{2r},$$

Deci efortul radial  $\sigma_\rho$  la axa neutra va avea valoarea:

$$\sigma_\rho = -2k \ln\left(1 + \frac{h}{2r}\right) \quad (7.130)$$

Se poate observa din rel. (7.130) ca efortul radial  $\sigma_\rho$  depinde de raportul  $h/r$ . Daca acest raport este mic ( $\frac{h}{r} < \frac{1}{5}$ ), atunci  $\ln\left(1 + \frac{h}{2r}\right) \approx \frac{h}{2r} < \frac{1}{10}$ . In acest caz  $\sigma_\rho$ , va avea o valoare relativ mica putandu-se neglija, de aceea se poate admite ca indoirea se face in conditiile unei stari de eforturi unitare liniara. In cazul in care raportul  $h/r$  are o valoare mai mare, aproximatia de mai sus nu se poate face si va trebui sa se tina seama de valoarea efortului  $\sigma_\rho$ .

### Calculul momentului de indoire

Daca asupra unui semifabricat se aplica un moment exterior  $M_{\text{ext}}$ , acesta este echilibrat de momentul dat de eforturile interioare  $M_{\text{int}}$  ce apar in corpul supus deformarii deci:

$$M_{\text{ext}} = M_{\text{int}} \quad (7.131)$$

Momentul dat de eforturile interioare este determinat de modul de distributie al efortului  $\sigma_\theta$  pe sectiunea semifabricatului indoit.

Daca se considera un raport  $\frac{h}{r}$  mic, deci stare de eforturi unitara liniara, atunci repartitia efortului  $\sigma_\theta$  pe sectiune, in functie de conditiile de deformare, poate avea loc ca in figura 7.30.

Repartitia efortului  $\sigma_\theta$  ca in fig.7.29 a reprezinta cazul incovoierii elastice, momentul de indoire  $M_{\text{ie}}$  fiind dat de relatia:

$$M_{\text{ie}} = W_e \sigma_c \quad (7.132)$$

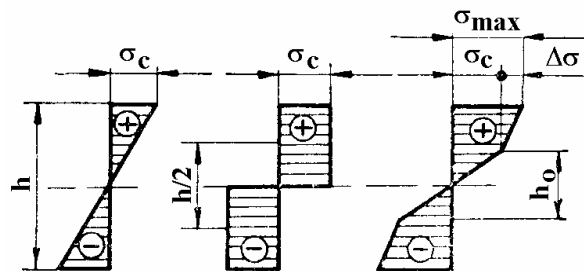


Fig. 7.29

Unde:  $W_e$  este modulul de rezistenta elastic,

$\sigma_c$ , limita de curgere a materialul indoit (considerand  $\sigma_{\text{max}} = \sigma_c$ )

Pentru un semifabricat cu sectiune dreptunghiulara, cu inaltimea  $h$  si latimea  $b$ ,

$$W_e = \frac{bh^2}{6} \text{ deci:}$$

$$M_{ie} = \frac{bh^2}{6} \sigma_c \quad (7.133)$$

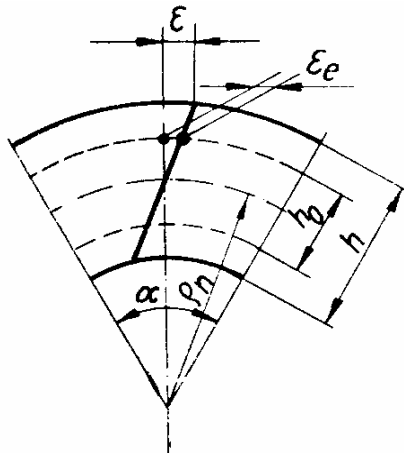
In cazul repartitiei efortului  $\sigma_\theta$  ca in fig.7.29 b care corespunde indoirii plastice fara ecruisare (fenomene care are loc la cald, cand indoirea se face cu viteza mica de deformare), pentru un semifabricat dreptunghiular, momentul de indoire este:

$$M_{ip} = \frac{bh^2}{4} \sigma_c \quad (7.134)$$

Pentru repartitia efortului  $\sigma_\theta$  ca in figura 7.29 c momentul de indoire va fi:

$$M_i = M_{ie}' + M_{ip}' + M_{id} \quad (7.135)$$

unde:  $M_{ie}'$  este mometul de indoire elastica pe portiunea  $h_0$ (fig. 7.30),



**Fig. 7.30**

$M_{ip}'$ , momentul de indoire plastica pe portiunea  $(h-h_0)$ ,

$M_{id}$ , momentul de indoire datorat ecruisarii materialului pe portiunea  $(h-h_0)$ .

Pentru a se calcula momentele de mai sus este necesar a se stabili inaltimea  $h_0$ , care delimiteaza zona deformata elastic, de zona deformata plastic. Pentru aceasta se foloseste legatura dintre eforturi si deformatii in domeniul elastic si in conditiile starii de eforturi unitare liniare:

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_c}{E} \quad (7.136)$$

unde:  $\epsilon_e$  este gradul de defomare al zonei in care  $\sigma_\theta$  atinge valoarea  $\sigma_c$ ;

$E$ , modulul de elasticitate

Considerand o portiune din semifabricatul supus indoirii( Fig.7.30) cu o deschidere  $\alpha$  si cu raza de indoire a axei neutre  $\rho_n$ , deformatia  $\epsilon$  este:

$$\epsilon = \frac{(\rho_n + \frac{h}{2})\alpha - \rho_n \alpha}{\rho_n \alpha} = \frac{h}{2\rho_n} \quad (7.137)$$

de unde:

$$h = 2\rho_n \epsilon \quad (7.138)$$

sau, daca introducem valoarea lui  $\epsilon_e$  din relatia :

$$h_0 = 2\rho_n \frac{\sigma_c}{E} \quad (7.139)$$

Daca deformarea are loc in prezenta ecrusarii atunci trebuie deteminata si marimea efortului  $\sigma_{\max}$  existent la fibra exterioara. Marimea efortului  $\sigma_{\max}$  poate fi scrisa:

$$\sigma_{\max} = \sigma_c + \Delta\sigma \quad (7.140)$$

unde:

$$\Delta\sigma = (\varepsilon - \varepsilon_c)\mathbf{D}$$

$\mathbf{D}$ , fiind modulul de ecrusare.

Daca se foloseste relatia pentru exprimarea lui  $\varepsilon$  si  $\varepsilon_c$ , atunci  $\Delta\sigma$  va putea fi scris:

$$\Delta\sigma = \frac{\mathbf{h} - \mathbf{h}_0}{2\rho_n} \mathbf{D} \quad (7.141)$$

Cunoscandu-se elementele de mai sus se poate scrie valoarea momentelor  $M_e'$ ,  $M_p'$ ,  $M_D$ :

$$\mathbf{M}_{ie}' = \frac{\mathbf{b}\mathbf{h}_0^2}{6} \sigma_c \quad (7.142)$$

$$\mathbf{M}_{ip}' = \frac{\mathbf{b}}{4} (\mathbf{h}^2 - \mathbf{h}_0^2) \sigma_c \quad (7.143)$$

$$\mathbf{M}_{iD} = \mathbf{b} \frac{\mathbf{h} - \mathbf{h}_0}{2} \left[ \mathbf{h}_0 + \frac{2}{3} (\mathbf{h} - \mathbf{h}_0) \right] \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\mathbf{b}(\mathbf{h} - \mathbf{h}_0)(2\mathbf{h} + \mathbf{h}_0)}{12} \Delta\sigma \quad (7.144)$$

Insumand momentele partiale de mai sus se obtine momentul total sub forma:

$$\mathbf{M}_i = \frac{\mathbf{b}}{12} \left[ (3\mathbf{h}^2 - \mathbf{h}_0^2) \sigma_c + (2\mathbf{h}^2 - \mathbf{h}\mathbf{h}_0 - \mathbf{h}_0^2) \Delta\sigma \right] \quad (7.145)$$

Pentru cazul in care  $\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{r}} > \frac{1}{5}$ , cand nu se poate aprecia starea de eforturi unitare liniara, momentul de indoire (in lipsa zonei elastice si a celei de ecrusare) va fi :

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{b} \int_{\rho_n}^{\mathbf{R}} \sigma_{\theta} \rho d\rho + \mathbf{b} \int_{\mathbf{r}}^{\rho_n} \sigma_{\theta}'' \rho d\rho \quad (7.146)$$

Inlocuind in rel. (7.146) valorile  $\sigma_{\theta}'$  si  $\sigma_{\theta}''$  exprimate de relatiile (7.126), (7.127) se obtine:

$$\mathbf{M}_i = 2\mathbf{k}\mathbf{b} \int_{\rho_n}^{\mathbf{R}} \left( 1 - \ln \frac{\mathbf{R}}{\rho} \right) \rho d\rho - 2\mathbf{k}\mathbf{b} \int_{\mathbf{r}}^{\rho_n} \left( 1 + \ln \frac{\rho}{\mathbf{r}} \right) \rho d\rho \quad (7.147)$$

respectiv:

$$\mathbf{M}_i = 2\mathbf{k}\mathbf{b} \left( \frac{\rho_n^2}{2} \ln \frac{\mathbf{R}\mathbf{r}}{\rho_n^2} + \frac{\mathbf{R}^2 - 2\rho_n^2 + \mathbf{r}^2}{4} \right) \quad (7.148)$$

Comparand relatia (7.148) cu relatia (7.129) se observa ca:

$$\frac{\rho_n^2}{2} \ln \frac{\mathbf{R}\mathbf{r}}{\rho_n^2} = 0 \quad \text{si} \quad 2\rho_n^2 = 2\mathbf{R}\mathbf{r}$$

Deci:

$$\mathbf{M}_i = 2\mathbf{k}\mathbf{b} \frac{(\mathbf{R} - \mathbf{r})^2}{4} \approx \frac{\mathbf{b}\mathbf{h}^2}{4} \sigma_c \quad (7.149)$$

Din cele de mai sus rezulta ca raportul  $\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{r}}$  nu influenteaza sensibil momentul de indoire, deci nici efortul  $\sigma_p$ . Rezulta ca atat relatia (7.134) cat si relatia (7.145) pot fi luate ca baza, cu o suficienta aproximatie, pentru calculul momentului de indoire.

Pentru semifabricate cu sectiune rotunde situatia se prezinta asemanator, mometul de indoire in acest caz se va calcula cu relatia:

$$M_i = \frac{d^3}{6} \sigma_c \quad (7.150)$$

### Calculul fortei de indoire

Pentru calculul fortei de îndoire trebuie să se ia în considerare momentul de îndoire necesar învingerii eforturilor unitare, care apar în secțiunea semifabricatului.

În cazul unui semifabricat supus îndoirii după un șablon (Fig.7.31) de rază  $r$  având lungimea brațului de acționare a forței  $l_x$  momentul de îndoire exterior este:

$$M_{iext} = F_i l_x \quad (7.151)$$

unde  $F_i$  este forța de îndoire

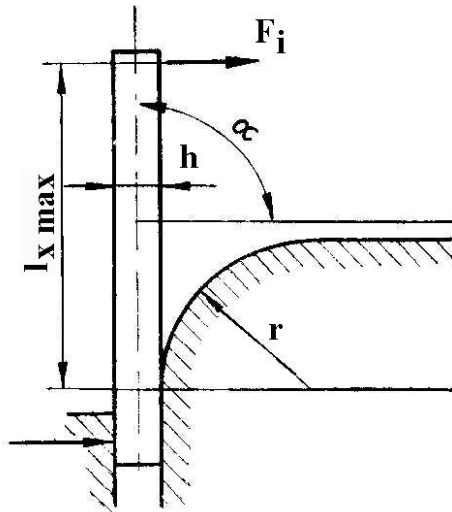


Fig.7.31

Egalizând momentul de îndoire exterior dat de relația de mai sus cu cel interior, considerând îndoirea unui semifabricat cu secțiune dreptunghiulară rezultă:

$$F_i l_x = \frac{bh^2}{4} \sigma_c \quad (7.152)$$

Din relația 7.152 rezultă expresia forței de îndoire:

$$F_i = \frac{bh^2}{4l_x} \sigma_c \quad (7.153)$$

Forța de îndoire este maximă la sfârșitul operației, deci când  $l_x$  are valoare minimă:

$$l_{x \min} = l_{x \max} - \alpha \left( r + \frac{h}{2} \right) \quad (7.154)$$

unde  $\alpha$  este unghiul de îndoire.

Rezultă astfel expresia forței de îndoire:

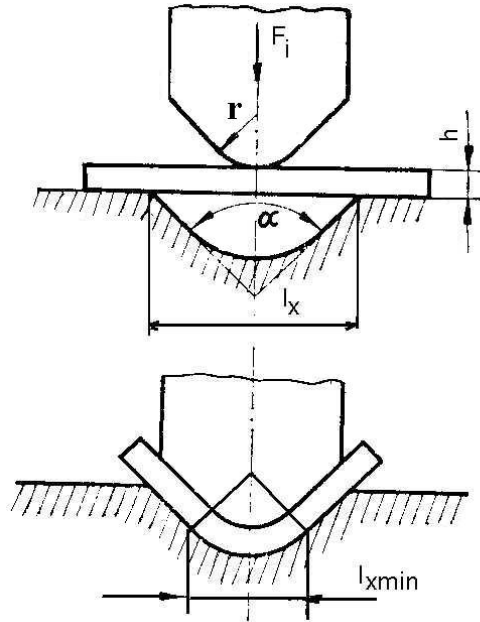
$$F_i = \frac{bh^2}{4[l_{x \max} - \alpha(r + \frac{h}{2})]} \sigma_c \quad (7.155)$$

În cazul semifabricatelor de secțiune circulară, cu diametrul  $d$ , expresia forței de îndoire este:

$$F_i = \frac{d^3}{6[l_{x \max} - \alpha(r + \frac{d}{2})]} \sigma_c \quad (7.156)$$

In cazul îndoirii pe o matriță (Fig.7.32), momentul de îndoire exterior este:

$$M_i = \frac{F_i l_x}{4} \quad (7.157)$$



**Fig.7.32**

Considerand îndoirea unui semifabricat de secțiune dreptunghiulară și egaland momentul de îndoire exterior cu cel interior se obține:

$$\frac{F_i l_x}{4} = \frac{bh^2}{4} \sigma_c \quad (7.158)$$

de unde rezultă expresia forței de îndoire:

$$F_i = \frac{bh^2}{l_x} \sigma_c \quad (7.159)$$

Forța de îndoire astfel calculată este valabilă pentru începutul îndoirii, deoarece la sfârșitul procesului lungimea reală de sprijin a semifabricatului cu matrița se micșorează având valoarea:

$$l_{x \max} = 2(r + h) \sin \frac{\alpha}{2} \quad (7.160)$$

Către sfârșitul operației de îndoire apare în plus o forța de frecare între semifabricat și matriță care este aproximativ  $0,3F_i$ .

In acest caz forța de îndoire devine:

$$F_i = 1,3 \frac{bh^2}{2(r + h) \sin \frac{\alpha}{2}} \sigma_c \quad (7.161)$$

Pentru semifabricate de secțiune circulară forța de îndoire are expresia:

$$F_i = 1,3 \frac{d^3}{3(r + d) \sin \frac{\alpha}{2}} \sigma_c \quad (7.162)$$

## 7.5. Răsucirea

Răsucirea este operația prin care o parte a semifabricatului se rotește față de altă parte în vederea obținerii unei decalări unghiulare. Se utilizează cel mai frecvent pentru decalarea manetelor arborilor cotiți.

La răsucirea prin forjare o parte a piesei forjate se prinde între nicovale sau fălcile unei menghine, iar cea de a doua se răsucește cu ajutorul unei scule numită furcă (Fig.7.33).

În vederea realizării acestui scop, materialul trebuie încălzit cât mai uniform în întregul volum, iar suprafața tronsonului care se răsucește trebuie să fie cât mai netedă posibil. Prin aplicarea operației de decalare a manetelor arborilor cotiți, valoarea unghiurilor de răsucire nu trebuie să fie mai mari de  $60..90^{\circ}$  pentru ca lungimea și diametrul tronsonului răsucit să rămână în limitele de toleranță prevăzute la adaosurile de prelucrare.

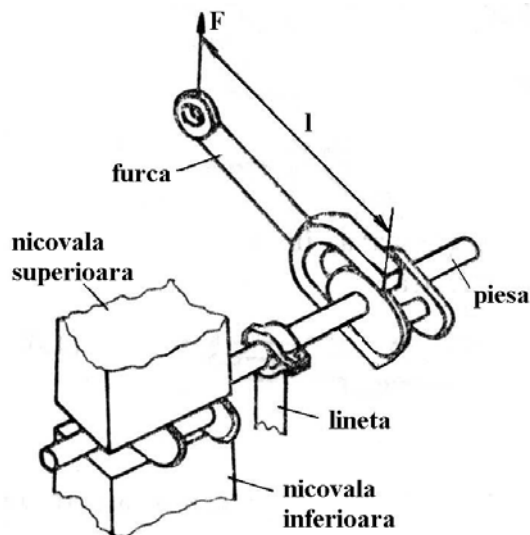


Fig.7.33

Momentul de răsucire poate fi exprimat cu relația:

$$M_r = \tau W \quad (7.163)$$

unde  $\tau$  reprezintă tensiunea tangențială maximă,

$W$  - modulul de rezistență.

Dacă tensiunea tangențială maximă este tensiunea corespunzătoare curgerii plastice, atunci momentul de răsucire poate fi considerat momentul stării plastice:

$$M_{rp} = \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} W \quad (7.164)$$

Prin înlocuirea lui  $\sigma_c$  cu rezistența medie la deformare  $\sigma_d$  corespunzătoare temperaturii și vitezei de deformare la care are loc procesul, relația de mai sus poate fi utilizată pentru calculele practice.

Modulul de rezistență  $W$  are diferite expresii în funcție de secțiunea semifabricatului.

Din figura 7.34, momentul de răsucire poate fi exprimat cu relația:

$$M_{rp} = Fl \quad (7.165)$$

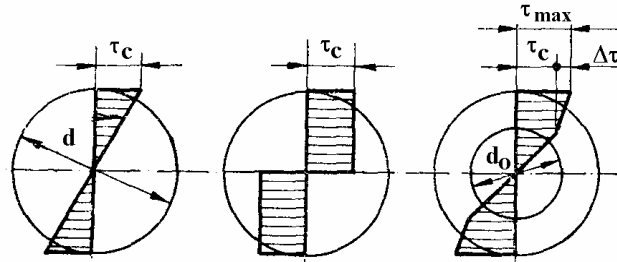
unde  $F$  este forța aplicată la capătul furcii,

l, lungimea brațului cu care se acționează în vederea răsucirii.  
Prin egalarea relațiilor 7.164 și 7.165 rezultă forța de răsucire:

$$F = \frac{\sigma_d W}{1} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (7.166)$$

### Calculul momentului de răsucire

Repartitia efortului unitar tangential pe secțiunea unui semifabricat de secțiune circulară supus răsucirii, este prezentată în fig 7.34.



**Fig. 7.34**

Repartitia efortului tangential ca în figura 7.34 a, reprezintă cazul răsucirii elastice, momentul de răsucire maxim fiind dat în acest caz de relația:

$$M_{re} = \int_0^r \tau 2\pi \rho^2 d\rho \quad (7.167)$$

Deoarece  $\tau = \frac{\rho}{r} k$ , rezulta:

$$M_{re} = \frac{2\pi k}{r} \int_0^r \rho^3 d\rho$$

Prin integrare și înlocuind pe r cu  $\frac{d}{2}$  se obține:

$$M_{re} = \frac{\pi d^3}{16} k \quad (7.168)$$

Unde:  $M_{re}$  este momentul de răsucire elastic,

D, diametrul semifabricatului,

K, efortul tangential maxim al materialului (considerând  $\tau_{max} = k$ )

Repartitia efortului tangential ca în fig.7.34 b, reprezintă deformarea plastică a întregii secțiuni fără ecruisare (în situația răsucirii la cald cu viteză mică), iar momentul de răsucire este:

$$M_{rp} = \int_0^r k 2\pi \rho^2 d\rho \quad (7.169)$$

Care prin integrare și înlocuind pe r cu  $\frac{d}{2}$  rezulta:

$$M_{rp} = \frac{\pi d^3}{12} k \quad (7.170)$$



Cazul prezentat in fig.7.34 c se intalneste la rasucirea la rece sau semicald cand este prezenta atat deformarea elastica(la miez), cat si deformarea plastica cu ecrusare (la margine), astfel ca momentul de rasucire va fi dat de relatia:

$$M_r = M_{re}' + M_{rp}' + M_{rD}' \quad (7.171)$$

Unde:  $M_{re}'$  este momentul de rasucire elastica pe portiunea  $r_0$

$M_{rp}'$ , momentul de rasucire plastica pe portinea  $(r-r_0)$ ,

$M_{rD}'$ , momentul de rasucire datorat ecrusarii materialului pe portiunea  $(r-r_0)$ .

Pentru a se calcula momentele specificate mai sus va trebui stabilita marimea  $r_0$ , care delimiteaza zona deformata elastic, de zona deformata plastic. In acest scop se va folosi legatura dintre eforturi si deformatii in domeniul elastic, care in cazul rasucirii este:

$$\gamma = \frac{k}{G} \quad (7.172)$$

Unde:  $\gamma$  este deformatia unghiulara,

$k$ , efortul tangential maxim,

$G$ , modulul de elasticitate transversal.

Deasemenea valoarea geometrica a deformatiei  $\gamma$  este data de :

$$\gamma = \rho \frac{d\alpha}{dl} \quad (7.173)$$

Unde:  $\rho$  este raza punctului considerat,

$\alpha$ , unghiul de rasucire atins,

$l$ , lungimea portiunii rasucite.

Din relatiile (7.172) si (7.173) se poate determina  $r_0$  in conditiile in care  $\tau = k$  :

$$r_0 = \frac{k}{G} \frac{dl}{d\alpha} \quad (7.174)$$

Cand deformarea are loc in prezenta ecrusarii atunci trebuie determinata si marimea efortului tangential maxim ( $\tau_{max}$ ) existent in fibra exterioara. Marimea efortului  $\tau_{max}$  se poate scrie:

$$\tau_{max} = k + \Delta\tau \quad (7.175)$$

Unde  $\Delta\tau$  este cresterea efortului tangential ca urmare a ecrusarii si care poate fi exprimat sub forma:

$$\Delta\tau = (\gamma - \gamma_c) D' \quad (7.176)$$

Unde care  $D'$  este modulul de ecrusare.

Folosind relatiile (7.172) si (7.174), relatia (7.176) se poate scrie astfel:

$$\Delta\tau = (r - r_0) \frac{\alpha}{l} D' \quad (7.177)$$

Cunoscandu-se elementele de mai sus se pot scrie momentele de rasucire  $M_{re}'$ ,  $M_{rp}'$ ,  $M_{rD}'$  astfel:

$$M_{re}' = \frac{\pi d_0^3}{16} k; \quad (7.178)$$

$$M_{rp}' = \frac{\pi}{12} (d^3 - d_0^3) k; \quad (7.179)$$

$$M_{rD}' = \int_{r_0}^2 2\pi\rho^2 \Delta\tau_\rho d\rho \quad (7.180)$$

Valoarea  $\Delta\tau_\rho$  se poate scrie in functie de  $\Delta\tau$  folosindu-se egalitatea:

$$\frac{\Delta\tau_\rho}{\rho - r_0} = \frac{\Delta\tau}{r - r_0}$$

De unde:

$$\Delta\tau_\rho = \frac{\rho - r_0}{r - r_0} \Delta\tau$$

Inlocuind valoarea  $\Delta\tau_\rho$  in integrala de mai sus aceasta devine:

$$M'_{rD} = \int_{r_0}^r 2\pi\rho^2 d\rho \frac{\rho - r_0}{r - r_0} \Delta\tau \quad (7.181)$$

Rezolvand integrala si inlocuind pe  $r = \frac{d}{2}$  si  $r_0 = \frac{d_0}{2}$  se obtine:

$$M'_{rD} = \frac{\pi d^4}{48(d - d_0)} \left( 3 - 4 \frac{d_0}{d} + \frac{d_0^4}{d^4} \right) \Delta\tau \quad (7.182)$$

Insumand momentele partiale se obtine:

$$M_r = \frac{\pi d^3}{12} k \left[ 1 - \frac{d_0^3}{4d^3} + \frac{d}{4(d - d_0)} \left( 3 - 4 \frac{d_0}{d} + \frac{d_0^4}{d^4} \right) \frac{\Delta\tau}{k} \right] \quad (7.183)$$

Deoarece la rasucirea la cald atat  $\frac{d_0}{d}$  cat si  $\frac{\Delta\tau}{k}$  au valori relativ mici , cu o suficienta aproximatie se poate folosi pentru calculul momentului de rasucire relatia simplificata, astfel:

$$M_r \approx \frac{\pi d^3}{12} k \quad (7.184)$$

Care este identica cu relatia (7.170).

In cazul rasucirii semifabricatelor de sectiune patrata, in mod analog se poate deduce momentul de rasucire sub forma:

$$M_r = \frac{a^3}{3} k \quad (7.185)$$

Unde a este latura patratului semifabricatului supus rasucirii.

Relatia de legatura intre efortul tangential si mometul de rasucire a fost propusa de Nadai sub forma:

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} \left( \alpha \frac{dM_r}{d\alpha} + 3M_r \right) \quad (7.186)$$

Unde:  $\tau$  este efortul tangential maxim,  
 $\alpha$  , unghiul de rasucire,  
 $r$ , raza semifabricatului rasucit.

Facand notatia:

$$\alpha \frac{dM_r}{d\alpha} = nM_r$$

Si introducand-o in relatia (7.186) aceasta devine:

$$\tau = \frac{3+n}{2\pi r^3} M_r \quad (7.187)$$

Sau

$$M_r = \frac{2\pi r^3}{3+n} \tau \quad (7.188)$$

Inlocuind in relatia de mai sus pe  $r = \frac{d}{2}$  se obtine:

$$M_r = \frac{\pi d^3}{4(3+n)} \tau \quad (7.189)$$

Din incercarile experimentale se poate deduce ca  $n \leq 0,1 \dots 0,3$ . Deci cu o eroare mai mica de 4...6%, relatia (7.189) se poate inlocui cu relatia (7.184), mai simpla pentru calculul momentului. Relatia (7.187) este indicata a se folosi cand se stabileste, prin incercari, efortul tangential maxim din mometul de rasucire care se inregistreaza la anumit einstalatii de incercare in conditii de laborator.

### Calculul unghiului maxim de rasucire

Pe baza relatiei (7.173), valoarea deformatiei unghiulare  $\gamma$  este:

$$\gamma = \rho \frac{d\alpha}{dl} \quad (7.190)$$

Considerand o deformare uniforma de-a lungul portiunii supusa rasucirii si luand pe  $\rho = r$  se poate scrie:

$$\gamma = r \frac{\alpha}{l} \quad (7.191)$$

De unde:

$$\alpha \leq \frac{l}{r} \gamma_a \quad (7.192)$$

Folosind egalitatea:

$$\frac{\gamma}{\tau} \approx \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{E}{G} \quad (7.193)$$

Rezulta ca:

$$\gamma_a \approx \frac{\tau}{\sigma} \frac{E}{G} \varepsilon_a$$

Deoarece  $\frac{\tau}{\sigma} \approx \frac{1}{2}$  si  $\frac{E}{G} \approx 2,6$  rezulta:

$$\gamma_a \approx 1,3 \varepsilon_a \quad (7.194)$$

Introducand (7.194) in relatia (7.192) aceasta devine:

$$\alpha \leq \frac{2,6l}{d} \varepsilon_a \quad (7.195)$$

Unde:  $\varepsilon_a$  este alungirea relativa admisa de materialul supus rasucirii,

$l$ , lungimea si  $d$ , diametrul portiunii rasucite.

La temperaturi ridicate rasucirea se poate face cu un unghi mai mare decat ar rezulta din relatia (7.195) mai ales daca viteza de deformare este mica, fara sa apara fisuri pe suprafata semifabricatului.

