

4.3. Deformabilitatea metalelor și aliajelor

Deformabilitatea metalelor și aliajelor caracterizează capacitatea acestora de a se deforma permanent fără ruperea legăturilor interioare.

Mărimea gradului de deformare posibil de aplicat unui material dat fără ca să apară fisuri sau ruperea acestuia în timpul deformării, în condiții de temperatură și viteză de deformare date, este în general, considerat ca fiind deformabilitatea acestuia.

Din această definiție decurg următoarele neajunsuri:

1. este dificil de precizat gradul de deformare la care apare prima fisură sau criteriul de rupere, respectiv mărimea critică a fisurii inițiale.

2. nu este încă acceptată o metodă de echivalare și transfer a datelor obținute din încercările de deformabilitate prin metode standardizate, la procesele industriale de deformare plastică a semifabricatelor.

1. modificarea condițiilor de deformare prezente la derularea procesului industrial, ca de exemplu temperatura și viteza de deformare, sunt dificil de luat în considerare pentru corectarea deformabilității stabilite prin încercări.

Ținând seama de aceste neajunsuri se utilizează următoarea definiție: **deformabilitatea reprezintă capacitatea unui material de a fi deformat plastic fără apariția unor condiții nedorite.**

Dintre condițiile nedorite fac parte: fisurarea sau ruperea materialului în timpul deformării plastice, condiții de calitate necorespunzătoare a suprafeței (macro asperități), cutarea sau ondularea tablelor ambutisate, structura grosolană, dificultăți de curgere a materialului la umplerea matritelor sau alte condiții impuse comercial.

Având în vedere că deformabilitatea unui material se exprimă prin gradul de deformare la care apar primele fisuri, respectiv ruperea acestuia rezultată dintr-o încercare mecanică standard sau una specifică procesului de deformare industrială, este necesar să se evidențieze procesul ruperii care, pentru toate procedeele industriale de deformare plastică ca și la materialele deformate plastic în aceste procese, apare sub forma ruperii ductile.

Mecanismul ruperii ductile, analizat pe baza încercării de tracțiune monoaxială, este dependent de temperatura și viteza de deformare, după cum se poate observa din figura 3.8, de unde rezultă că pentru temperaturi de deformare sub $0,5T_1$ (sub temperatura de deformare la cald), apare de obicei ruperea ductilă de tip con-cupă, iar la deformarea la cald (peste $0,5T_1$) este prezentă ruperea ductilă de forma dublu con.

Ruperea ductilă de tip con-cupă care determină mărimea deformabilității, prezintă trei stadii (fig. 3.9): a. germinarea (inițierea) porilor, b. creșterea porilor, c. coalescența porilor și formarea fisurilor.

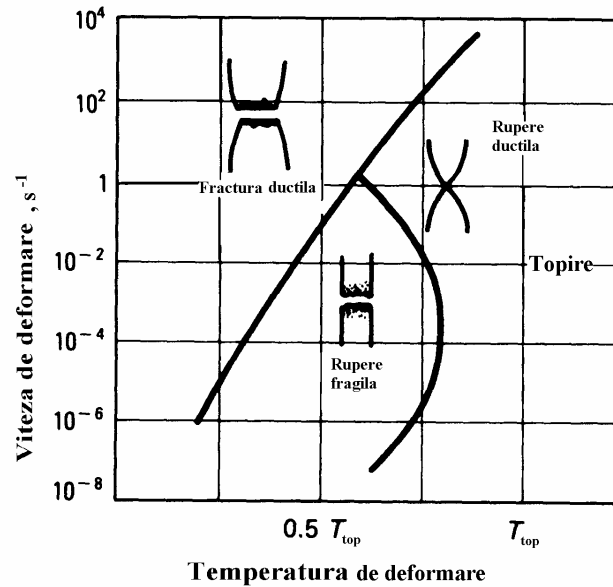


Fig.3.8

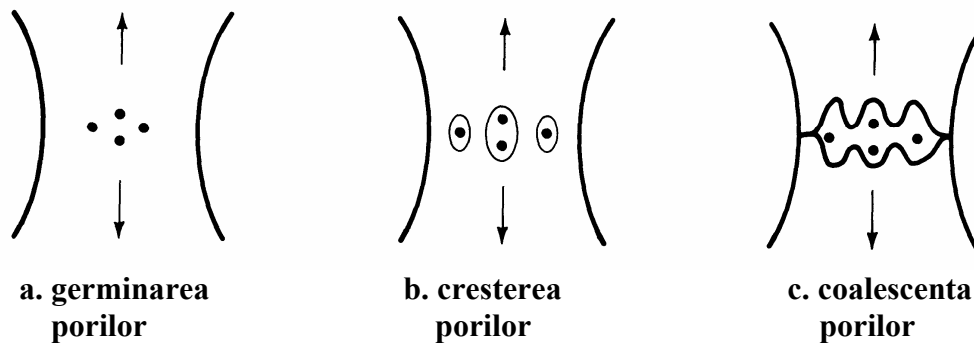


Fig.3.9

Germinarea porilor are loc de obicei la interfața dintre particulele fazei secundare și matricea metalică sau la incluziuni din cauza nedeformării particulelor, fapt ce forțează matricea metalică din jurul acestora să se deformeze peste limita normală cu o ecrusare accentuată și tensiuni mari care conduc la separarea interfeței matrice-particulă sau la fisurarea acesteia. Ca urmare deformabilitatea este pregnant dependentă de mărimea și densitatea particulelor fazelor secundare. Ruperea ductilă prin creșterea și coalescența porilor apare în două moduri: 1. prin smulgere determinată de creșterea porului în planul de rupere normal la axa tensiunii principale și 2. Prin creșterea porilor în benzi la unghiuri oblice față de planul de rupere, sub influența deformațiilor unghiulare, mod de rupere ductilă prezentă la procesele de deformare pentru care frecarea sau alte condiții de deformare produc deformații neomogene sub forma benzilor de alunecare prin care se localizează deformația, cu consecințe de înmuiere locală a materialului datorată creșterii adiabatice a temperaturii.

Pentru definirea ruperii au fost formulate diverse criterii printre care: Cockcroft-Latham, Hoffmann, McClintock.

3.4. Factorii de influență ai deformabilității

Principalii factori de influență ai deformabilității pot fi grupați în două categorii:

1. Factori aferenți materialului: compoziție, structură, puritate, evoluție metalurgică, localizarea deformației.

2. Factori aferenți procesului: temperatura deformării, viteza de deformare, starea de tensiuni și deformații, presiunea hidrostatică, frecarea sculă/semifabricat, geometria sculă/semifabricat.

Compoziția chimică a unui aliaj influențează deformabilitatea atât prin determinarea tipului rețelei de cristalizare cât și a punctelor caracteristice (solidus/lichidus, transformări de fază, recristalizare, separare/dizolvare precipitate, etc.). Astfel metalele și aliajele care cristalizează în sistemele cubic cu fețe centrate (CFC) și respectiv cubic cu volum centrat (CVC) au o deformabilitate mai ridicată decât cele care cristalizează în sistemul hexagonal compact (HC) datorită numărului sporit de sisteme de alunecare ale celor dintai.

Metalele pure în general, prezintă o deformabilitate sporită față de aliajele acestora. Aliajele metalelor având rețele de cristalizare diferite au o deformabilitate redusă față de cele formate din metale cu același tip de rețea, ca de exemplu aliajele Fe-Mn (CFC/CVC pentru Fe și tetragonal pentru Mn) au o deformabilitate mai mică decât aliajele Fe-Ni (CFC pentru Ni).

Structura influențează deformabilitatea prin tipul rețelei de cristalizare, numărul fazelor prezente în intervalul temperaturii de deformare, distribuția, forma și mărimea precipitatelor/fazei în exces, mărimea și forma granulației matricei metalice de bază, ponderea relativă recristalizare/ecruisare și omogenitatea structurală.

Metalele pure și aliajele cu structuri monofazice au o deformabilitate mărită față de cele bifazice pentru care comportarea diferită la deformare a celor două faze conduce la concentrarea deformațiilor microgranulare la faza cu rezistența la deformare mai mică și generarea microfisurilor la interfața celor două faze. Aliajele care conțin faze cu punct de topire scăzut, tind spre o deformabilitate scăzută fiind dificil de deformat plastic la cald. În general cu creșterea conținutului elementelor de aliere, posibilitatea formării unor faze cu punct de topire scăzut crește, în timp ce temperatura pentru precipitarea fazei secundare crește. Acest lucru conduce în final la diminuarea domeniului deformabilității (fig.3.10)

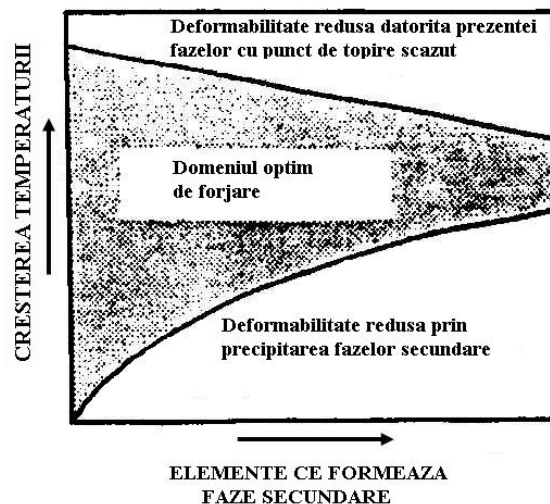


Fig.3.10

Prezența unei structuri bifazice într-un aliaj reduce deformabilitatea, lucru ce explică deformabilitatea scăzută a oțelurilor carbon hipoeutectoide deformate în domeniul α - γ .

Dacă coerența dintre cele două faze este bună, ruperea poate apărea în oricare dintre faze, în funcție de proporția acestora și deformarea lor relativă.

Dacă coerența fazelor este slabă datorită segregării preferențiale a impurităților, ruperea apare la interfața fazelor.

Puritatea

Puritatea influențează pozitiv deformabilitatea prin asigurarea unei deformări omogene, în timp ce impuritățile favorizează generarea fisurilor la interfața acestora cu matricea metalică.

Impuritățile în metale și aliaje au influență defavorabilă asupra deformabilității. La temperaturi ridicate influența dăunătoare asupra deformabilității are sulful și plumbul.

Mai dăunătoare este influența impurităților asupra deformabilității atunci când acestea se găsesc sub forma de incluziuni.

Incluziunile pot avea rezistența mai mare sau mai mică decât a metalului de bază, aceasta stare depinzând de temperatura la care are loc deformarea.

Incluziunile sunt surse de producere a fisurilor în metale, în timpul deformării lor.

Când rezistența incluziunilor este mai mică decât cea a metalului de bază, acestea constituie surse de fisuri mai ales dacă asupra lor acționează eforturi de forfecare și de întindere.

Temperatura la care urmează să se facă deformarea unui metal sau aliaj trebuie aleasă în funcție de natura incluziunilor, cautându-se acele domenii de temperatură la care incluziunile au o rezistență apropiată de cea a metalului de bază. De asemenea metalele și aliajele bogate în incluziuni trebuie deformate în condițiile unei stări de eforturi de compresiune pentru a se evita inițierea și creșterea fisurilor având ca sursă incluziunile existente.

Localizarea deformației

Localizarea deformației în timpul unui proces de deformare plastică influențează deformabilitatea prin modificarea caracteristicilor structurale și a proprietăților materialului din zona îngustă a deformației localizate, ceea ce conduce la apariția fisurilor în zona respectivă, fie în timpul operației de deformare plastică, fie pe durata utilizării piesei deformate.

Localizarea deformației sau a curgerii în timpul deformării este cauza comună a formării “zonei moarte” dintre semifabricatul deformat și scula de deformare.

Localizarea deformației poate fi cauzată de: o lubrifiere redusă la suprafața de contact sculă-semifabricat, distribuția neuniformă a temperaturii, neuniformitatea structurală, etc.

Figura 3.11 prezintă neuniformitatea deformației la refularea unui semifabricat cilindric între scule plane cu lubrifiere redusă, la care eforturile de frecare în zona de contact τ_1 , determină modificarea formei semifabricatului, o distribuție neuniformă a tensiunilor normale și localizarea “zonei moarte” la contactul cu scula, în timp ce în zona centrală este prezentă deformația maximă.

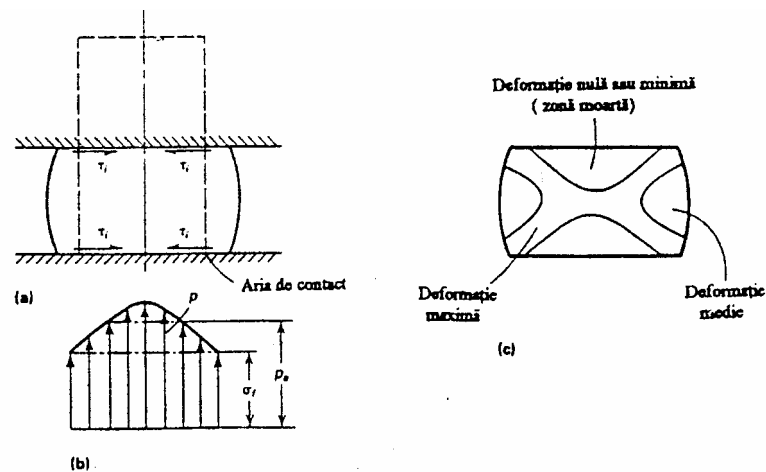


Fig.3.11

Temperatura de deformare

Cu creșterea temperaturii viteza de dezecruisare crește și deasemenea se mărește și viteza de înlăturare a microfisurilor care au apărut în timpul deformării.

Ca o consecință, odată cu creșterea temperaturii are loc și creșterea deformabilității metalelor și aliajelor.

Din cauza unor transformări care au loc la încălzire în unele metale și aliaje, precum și a modificărilor în mărimea grăunților, variația deformabilității cu temperatura poate să aibă loc într-un mod mai complex, adică, în anumite limite, prin creșterea temperaturii, deformabilitatea poate să scadă.

Au fost stabilite 8 scheme de variație a deformabilității cu temperatura(fig.3.12).

Metalele pure și aliajele care au o singură fază arată o creștere a deformabilității prin creșterea temperaturii(I).

La temperaturi ridicate însă, datorită creșterii grăunților, deformabilitatea acestor materiale poate scădea(II).

Aliajele conținând elemente care formează compuși insolubili au o deformabilitate scăzută, la acele temperaturi(III), dar dacă acești compuși se dizolvă prin creșterea temperaturii, deformabilitatea va crește(IV). Aliajele care formează faze secundare în timpul încălzirii sau răcirii își modifică deformabilitatea atunci când cea de a doua fază apare(tipurile V-VIII).

La anumite metale și aliaje se observă o variație bruscă a deformabilității la anumite temperaturi. Această variație se explică fie prin trecerea de la o fază la alta, fie prin creșterea numărului planelor de alunecare ale aceleiași faze, fie prin modificări apărute în comportarea la deformare a grăunților și a marginilor lor.

Astfel dacă se urmărește variația rezistenței la deformare a grăunților și a marginilor lor, la temperaturi la care rezistența marginilor grăunților este mai mică sau egală cu a grăunților în timpul deformării se poate produce o rotație a lor și aduce într-o poziție mai favorabilă deformării față de direcția forței.

Metalele pure și aliajele care au o singură fază arată o creștere a deformabilității prin creșterea temperaturii(I).

La temperaturi ridicate însă, datorită creșterii grăunților, deformabilitatea acestor materiale poate scădea(II).

Aliajele conținând elemente care formează compuși insolubili au o deformabilitate scăzută, la acele temperaturi(III), dar dacă acești compuși se dizolvă prin creșterea

temperaturii, deformabilitatea va crește(IV). Aliajele care formează faze secundare în timpul încălzirii sau răcirii își modifică deformabilitatea atunci când cea de a doua fază apare(tipurile V-VIII).

La anumite metale și aliaje se observă o variație bruscă a deformabilității la anumite temperaturi. Această variație se explică fie prin trecerea de la o fază la alta, fie prin creșterea numărului planelor de alunecare ale aceleiași faze, fie prin modificări apărute în comportarea la deformare a grăunților și a marginilor lor.

Astfel dacă se urmărește variația rezistenței la deformare a grăunților și a marginilor lor, la temperaturi la care rezistența marginilor graunților este mai mică sau egală cu a graunților în timpul deformării se poate produce o rotație a lor și aduce într-o poziție mai favorabilă deformării față de direcția forței.

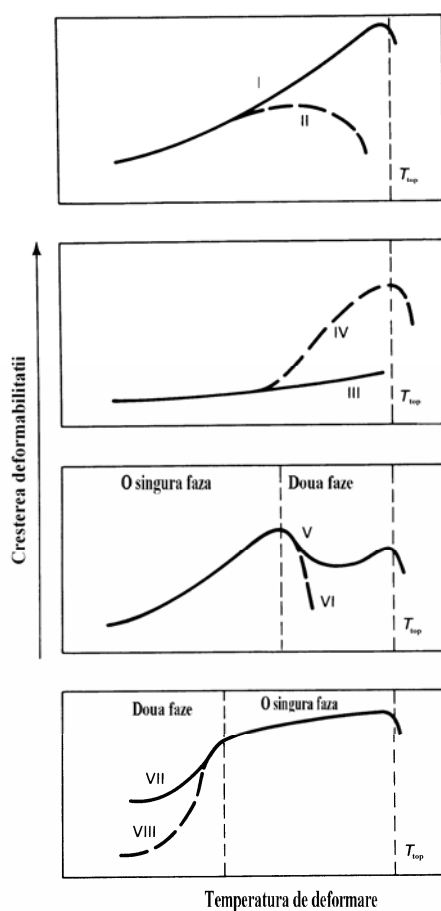


Fig.3.12

Interesant este de observat variația deformabilității cu temperatura la oțeluri cu conținut redus de carbon(fig.3.13).

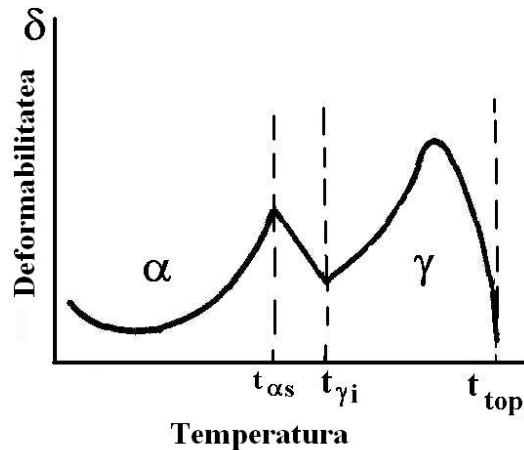


Fig.3.13

Minimul de deformabilitate în jurul temperaturii de 250...300 C se datorește formării precipitațiilor care favorizează procesul de “revenire la albastru”. Creșterea bruscă a deformabilității între 600...800 C se explică prin apariția deplasărilor intercrystaline și a prezenței recristalizării cu o viteză mai mare.

Scăderea în deformabilitate între 800...900C se datorește trecerii din sistemul α în sistemul γ .

Deformabilitatea maximă a oțelurilor carbon este în general cuprinsă între 1000...1200 C, la aceste temperaturi viteza de recristalizare este destul de mare fără însă a crește exagerat mărimea graunților.

La temperaturi mai ridicate deformabilitatea scade brusc datorită creșterii pronunțate a mărimii graunților pe de o parte și a diferenței între rezistența graunților și a marginilor lor pe de altă parte.

Datorită existenței unei deformabilități ridicate la temperaturi intermediare (cazul oțelurilor între 600...800C) pentru a se evita fenomenele de oxidare și decarburare, există tendința de a se deforma tot mai multe aliaje la aceste temperaturi (la semicald).

Viteza de deformare

Aceasta are o influență complexă asupra deformabilității, mai ales în domeniul deformării la cald, în funcție de material, temperatura de deformare și mărimea vitezei de deformare. Dacă materialul deformat este un metal pur sau un aliaj care nu prezintă modificări structurale la încălzire, deformabilitatea crește prin creșterea vitezei de deformare. Pentru metalele și aliajele care prezintă transformări structurale, creșterea vitezei de deformare poate conduce fie la creșterea fie la diminuarea deformabilității astfel:

- prin modificarea temperaturii reale de deformare rezultată prin transformarea energiei de deformare în caldură, care la viteze mari de deformare determină creșteri mai mari ale temperaturii reale de deformare. Dacă deformarea se face în domeniul termic caracterizat de influența favorabilă a temperaturii asupra deformabilității va rezulta creșterea acesteia cu creșterea vitezei de deformare. În caz contrar influența este negativă. Din acest punct de vedere se recomandă utilizarea unor viteze mici de deformare în domeniul termic, cu transformări structurale și în apropierea curbei solidus.
- prin influențarea echilibrului dintre ecrusare și recristalizare prezente simultan la deformarea la cald. Având în vedere că recristalizarea se derulează în timp, favorizând creșterea deformabilității, rezultă că prin creșterea vitezei de deformare va crește ponderea ecrusării și deci deformabilitatea va scădea.

- prin influențarea procesului de alunecare la limitele grăunților care este favorizat prin creșterea vitezei de deformare mai ales la temperaturi mici, apropiate de temperatura de recristalizare.

Starea de tensiuni și deformări

Aceasta influențează deformabilitatea prin mecanismul diferit al germinării și propagării fisurilor, dependent de sensul tensiunilor și modul deformării.

Astfel, pentru un material dat, deformat la o temperatură și viteză de deformare constante, deformabilitatea este mult mai mare pentru starea de eforturi de compresiune decât pentru starea de tensiune de întindere, stare care favorizează formarea și propagarea fisurilor, în timp ce eforturile de compresiune conduc la închiderea și sudarea microfisurilor.

Figura 3.14 prezintă o ordonare descrescătoare a schemelor de tensiuni după influența acestora asupra deformabilității.

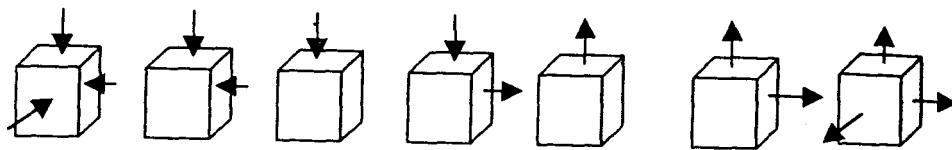


Fig.3.14

Influența stării de tensiuni, prezența într-un proces de deformare plastică, asupra deformabilității se evidențiază prin parametrul β definit sub forma:

$$\beta = 3\sigma_m / \sigma \tag{3.45}$$

în care: σ_m este tensiunea medie, $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$

σ - tensiunea efectivă

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

unde $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ sunt tensiunile principale.

Variația deformabilității cu parametrul β , pentru diferite încercări mecanice și procese de deformare plastică, este prezentată în figura 3.15 .

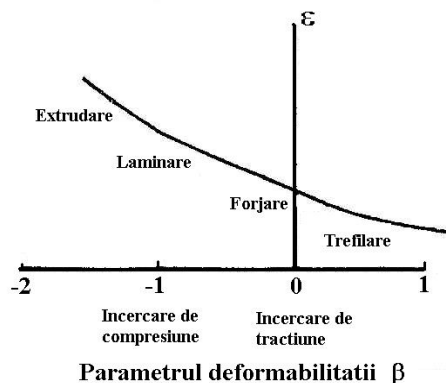


Fig.3.15

Curba de mai sus a fost stabilită pentru trei încercări de bază: tracțiune-pană la apariția gaturii($\beta=1$), răsucire, $(\beta=0)$ și compresiune($\beta=-1$) .

Presiunea hidrostatică

Influențează favorabil deformabilitatea atât prin intermediul parametrului β , menționat mai sus, cât și prin influența sa asupra dinamicii propagării microfisurilor și a închiderii acestora la presiuni mari. Pentru a caracteriza această influență Bridgman a propus relația:

$$\delta_p = \delta_0 + cp \quad (3.46)$$

unde: δ_p este deformabilitatea rezultată prin deformarea la presiunea p

δ_0 - deformabilitatea la presiunea $p=0$

c - coeficient dependent de material

Această creștere liniară a deformabilității cu presiunea hidrostatică este valabilă numai pentru unele materiale și domenii limitate ale presiunii.

Frecarea sculă-semifabricat

Aceasta influențează defavorabil deformabilitatea, atât prin creșterea eforturilor de deformare și accentuarea neuniformității deformațiilor locale favorizând ruperea, cât și prin griparea și apariția cutării materialului deformat în zona de contact cu scula, având ca rezultat formarea defectelor de suprafață.

Criterii de apreciere a deformabilității

După cum s-a definit anterior deformabilitatea reprezintă capacitatea unui material de a fi deformat plastic fără apariția unor condiții nedorite.

Dintre condițiile nedorite fac parte: fisurarea sau ruperea materialului în timpul deformării plastice, condiții de calitate necorespunzătoare a suprafeței, structura grosolană, dificultăți de curgere a materialului la umplerea matritelor, etc.

Deformabilitatea este o proprietate complexă a materialelor datorită multiplelor situații aferente diverselor procedee de deformare plastică, care conduc la condiții locale diferite privind starea de eforturi și deformații, viteza de deformare și temperatura în combinație cu rezistența materialului la ruperea ductilă.

Deformabilitatea fiind o proprietate complexă a materialelor, este dificil de apreciat deformabilitatea intrinsecă care este puternic influențată de starea de tensiune, dependentă la rândul ei de frecare și de geometria sculă/semifabricat. A fost arătată și influența altor factori ca temperatura, viteza de deformare, structura, etc.

Pentru aprecierea deformabilității în anumite condiții de deformare este necesară exprimarea acesteia printr-o mărime stabilită în condiții de control ai factorilor de influență.

Starea de tensiuni este bine controlată și definită prin încercările clasice de tracțiune, compresiune, răsucire, îndoire; de aceea aceste tipuri de încercări sunt uzual folosite pentru aprecierea deformabilității cu un accent mai mare pe încercarea de compresiune.

Deformabilitatea unui material poate fi stabilită utilizând diferite instalații:

1. Instalații convenționale de încercări mecanice
2. Instalații de încercare specializate
3. Instalații de laborator care copiază sau simulează procesele industriale la scară redusă, ca de exemplu laminoare, prese de extrudat, etc.

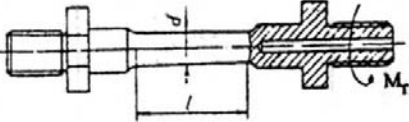
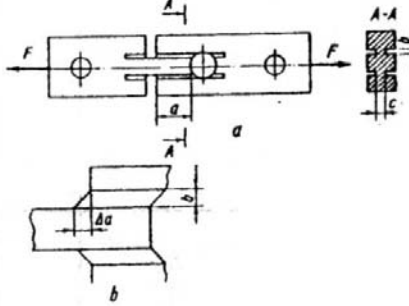
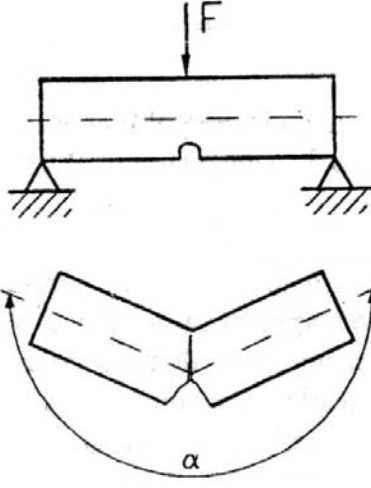
Majoritatea instalațiilor de încercat permit stabilirea deformabilității atât pentru deformarea la cald cât și pentru deformarea la rece, prin utilizarea unor adaptări adecvate.

Dintre criteriile de alegere a tipului mașinii de încercat se remarcă: tipul epruvetei și al încercării, constanța controlului vitezei de deformare și valoarea maximă a acesteia, controlul temperaturii, ușurința măsurării efortului de deformare, etc.

Principalele metode de încercare utilizate pentru aprecierea deformabilității și a rezistenței la deformare sunt date în tabelul de mai jos:

Metode de încercare

Metoda	Schița încercării	Deformabilitatea	Rezistența la deformare
1	2	3	4
Tracțiune		$e_l = \frac{l_u - l_0}{l_0}$ $e_d = \frac{d_0 - d_u}{d_0}$ $\psi = \frac{A_0 - A_u}{A_0}$ $\delta_l = \ln \frac{l_u}{l_0}$ $\ln(1 + e_l)$	$R_d = \frac{F_{max}}{A_0}$
Compresiune		$e_h = \frac{h_0 - h_n}{h_0}$ $e_{d_0} = \frac{d_{max} - d_0}{d_0}$ $\delta_h = \ln \frac{h_0}{h_n}$ $k = \frac{A_{max}}{A_0}$	$R_d = \frac{F_{max}}{m A_{max}}$ $R_d = \frac{L}{mV \ln \frac{h_0}{h_1}}$

1	2	3	4
Răsucire		$\varphi_0 = \pi d n_r / l$	$\tau_d = \frac{3 \cdot m}{2 \pi r^3} M_r$
Forfecare		$\gamma = \Delta a_u / b$	$\tau_d = F_{\max} / 2ac$
Încovoiere prin șoc		$\delta = ctg \alpha$	

Superplasticitatea

Superplasticitatea este o stare, creată într-un material în anumite condiții tehnologice, ce se caracterizează printr-o mare capacitate de deformare plastică fără distrugerea integrității.

Materialele superplastice pot fi deformate cu grade de deformare foarte mari (până la 2000%) fără să apară gatură locală și să se rupă. Aceasta se datorează faptului că deformarea are loc în întregul volum și nu doar local cum se întâmplă la materialele obișnuite.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească un material pentru a se comporta superplastic sunt:

1. Existența unei granulații extrem de fine și uniforme, cu dimensiunile graunților de ordinul micrometrilor ($< 10\mu\text{m}$, în general $1...2\mu\text{m}$). Materialul trebuie să prezinte transformări de fază și să nu se ecruiseze,
2. Deformarea la temperaturi în jur de $0,5T_{\text{top}}$, deoarece superplasticitatea este un proces realizat prin difuzie, favorizând recristalizarea.

Cele două condiții de mai sus sunt contradictorii și incompatibile, deoarece o temperatură ridicată (pentru producerea difuziei) duce la creșterea granulației. Aliajele optime pentru a fi aduse în stare superplastică sunt cele de tip eutectic sau eutectoid, la care cele două faze se incomodează reciproc, blocând creșterea granulației sau aliaje ce conțin faze fin dispersate.

Starea de superplasticitate poate fi caracterizată printr-un parametru m , numit sensibilitatea materialului la viteza de deformare.

Pornind de la relația de legătură dintre tensiunea de curgere și viteza de deformare se poate scrie:

$$\sigma_c = C \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (3.47)$$

Logaritmand relația () se obține:

$$m = \frac{\log \sigma_c - \log C}{\log \dot{\varepsilon}} \quad (3.48)$$

unde:

σ_c este limita de curgere a materialului,

C , constanta de material,

$\dot{\varepsilon}$, viteza de deformare.

Pentru a se putea vorbi despre comportarea superplastică trebuie ca $m > 0,3$ (în general $m = 0,3...0,8$).

Asigurarea condiției de mai sus se poate realiza dacă:

- granulația este foarte fină ($1...2\mu\text{m}$),

- temperatura de deformare este $> 0,5T_{\text{top}}$,

- viteza de deformare este foarte redusă, $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}...10^{-1} \text{ s}^{-1}$

3.5 Frecarea la deformarea plastică a metalelor și aliajelor

În procesele tehnologice de deformare plastică, frecarea exterioară are două roluri importante: primul este că influențează negativ desfășurarea deformării, măbind necesarul de energie pentru realizarea procesului și al doilea influențează pozitiv procesele de deformare. Din această ultimă categorie s-ar putea aminti cazul laminării

care nu s-ar putea desfășura dacă nu ar exista frecarea dintre cilindrii de laminare și material.

La deformarea plastică a materialelor metalice pe suprafețele de contact dintre corpul supus deformării și sculele de deformare apare de obicei frecarea de alunecare, care este mult deosebită de frecarea de alunecare ce apare la organele de mașini.

Datorită condițiilor specifice în care apare frecarea la deformarea plastică, forțele de frecare în acest caz sunt mult mai mari decât cele ce se produc la organele de mașini și ca urmare forțele necesare deformării se vor mări corespunzător pentru a se putea învinge și aceste forțe de frecare ce se opun deformării.

La randul său neuniformitatea deformațiilor generează structuri neuniforme, iar acestea conferă materialelor proprietăți neuniforme. Tot ca urmare a frecării apare și uzura sculelor de deformare, iar prin imprimarea pe suprafețele corpurilor deformate a defectelor de suprafață a sculelor se înrăutățește și calitatea produselor obținute prin deformare.

În funcție de condițiile în care are loc fenomenul de frecare la deformarea plastică se întâlnesc următoarele tipuri de frecare:

1. frecarea în condiții ideale, când pe suprafețele de contact dintre corp și sculele de deformare nu se găsesc nici oxizi nici substanțe lubrifiante
2. frecarea uscată, când pe suprafețele de contact se găsesc oxizi, dar nu există substanțe lubrifiante
3. frecarea semiuscată, când pe suprafețele de contact se găsesc anumite zone acoperite de pelicule rigide de substanțe lubrifiante, care izolează contactul direct dintre suprafața corpului și suprafața sculelor de deformare
4. frecarea semilichidă, când pe suprafața de contact se află o peliculă de lubrifiant, existând în același timp și zone de contact direct între scule și corpul deformat
5. frecarea lichidă, când pe suprafețele de contact se află un strat de lubrifiant care izolează complet contactul dintre corp și suprafețele sculelor de deformare
6. frecarea în film de lubrifiant, când pe suprafețele de contact dintre corp și sculele de deformare se află o peliculă foarte subțire de lubrifiant lichid în care nu apar proprietățile de volum specifice lubrifiantului

La deformarea plastică cel mai des sunt prezente frecarea uscată și semiuscată.

În aceste cazuri suprafața corpului metalic supus deformării ca și a sculelor de deformare prezintă proeminente și adancituri care se întrepătrund producându-se astfel o înțepenire a suprafețelor în contact. Prin acest fenomen de întrepătrundere a asperităților celor 2 suprafețe în contact, suprafața reală de contact a celor 2 corpuri se mărește.

Pentru deplasarea celor 2 suprafețe în contact va trebui aplicată o forță cel puțin egală cu forța de frecare, dar de sens contrar, care prin deformații elastice și plastice ale proeminențelor celor 2 suprafețe va asigura ieșirea acestora din adanciturile suprafețelor în contact. În această situație forța de frecare și forța specifică de frecare depind de proprietățile de rezistență și de plasticitate ale celor 2 corpuri în contact, de variația acestora pe parcursul procesului de deformare, de compoziția chimică a materialelor corpului supus deformării și sculelor de deformare și de condițiile de deformare plastică (temperatura, grad de deformare, viteza de deformare, etc.).

Neglijându-se prezenta punctelor de aderență dintre corpul deformat și sculele de deformare, aprecierea forței de frecare T , a forței specifice de frecare τ și a coeficientului de frecare μ se poate face în același mod ca și pentru cazul procesului de frecare de la organele de mașini, la care forța de frecare este direct proporțională cu forța normală N aplicată pe suprafața de contact:

$$T = \mu N$$

Coulomb a presupus existența unor forțe de acțiune intermoleculară A pe suprafața de contact dintre sculele de deformare și corpul supus deformării. În această situație forța de frecare se va exprima sub forma:

$$\mathbf{T} = \mu(\mathbf{N} + \mathbf{A}) \quad (3.49)$$

Ținând cont de faptul că forța de acțiune intermoleculară este foarte mică în comparație cu forța de frecare ($A \ll T$) se poate neglija și astfel forța de frecare se poate calcula tot cu formula inițială, cunoscută ca legea lui Coulomb.

Împărțind ambii termeni ai relației cu secțiunea suprafeței de contact S rezultă:

$$\frac{\mathbf{T}}{S} = \mu \frac{\mathbf{N}}{S} \quad (3.50)$$

$$\tau = \mu \sigma \quad (3.51)$$

Unde:

τ este forța specifică de frecare

σ - tensiunea normală pe suprafața de contact

Principalii factori de influență ai frecării sunt:

- gradul de prelucrare al suprafețelor în contact
- compoziția chimică a corpului deformat și a sculelor de deformare
- presiunea de deformare (gradul de deformare)
- temperatura de deformare
- viteza relativă de alunecare pe suprafața de contact

Factorii care influențează frecarea în procesele de deformare plastică.

Astfel cu cât **gradul de prelucrare al suprafețelor sculelor** de deformare este mai avansat, respectiv înălțimea asperităților și distanța dintre ele sunt mai mici, cu atât coeficientul și forța specifică de frecare sunt mai reduse.

În afară de starea suprafețelor sculelor de deformare, asupra valorii coeficientului de frecare influențează și **starea suprafeței corpului supus deformării**. Această influență este mai pregnantă în cazul deformării la cald, ca urmare a prezenței stratului de oxizi pe suprafața corpului supus deformării.

Influența compoziției chimice a materialului sculelor de deformare asupra coeficientului de frecare este legată de variația pe care o dă compoziția chimică, proprietăților mecanice și de elasticitate ale sculelor de deformare. Astfel cu cât compoziția sculelor asigură o duritate mai ridicată a suprafețelor active ale acestora, cu atât coeficienții de frecare pe aceste suprafețe vor fi mai mici. De exemplu la același grad de prelucrare a suprafețelor tăbliei cilindrilor de laminare, coeficienții de frecare la laminarea pe cilindrii din fontă care au durități superficiale mai mari, sunt cu circa 20% mai mici decât cei obținuți la laminarea pe cilindrii din oțel.

În ce privește **influența compoziției chimice a corpului supus deformării** asupra valorii coeficientului de frecare, s-a constatat că aceasta se manifestă prin intermediul compoziției chimice și a proprietăților oxizilor formați pe suprafața corpului. Astfel în cazul deformării unor metale sau aliaje moi (plumb, aluminiu, etc.) ca urmare a apariției fenomenului de aderență între suprafețele de contact, coeficienții de frecare au valori mai ridicate decât în cazul materialelor la care aderența lipsește.

Presiunea pe suprafața de contact, care în cazul frecării de la organele de mașini conduce la creșterea coeficientului de frecare, la procesele de deformare plastică produce micșorarea valorii coeficientului de frecare. Această dependență se explică prin faptul că pe măsură ce presiunea de deformare crește, se mărește și numărul zonelor de aderență între suprafața sculei și a corpului de format aflate în contact, iar valoarea forței specifice de frecare va rămâne constantă sau crește.

Influența temperaturii de deformare asupra valorii coeficientului de frecare de pe suprafața de contact dintre sculele de deformare și corpul supus deformării se manifestă prin intermediul variației pe care o dă temperatura compoziției și proprietăților stratului de oxizi ce se formează pe suprafața corpului supus deformării.

Astfel s-a constatat că valoarea coeficientului de frecare crește pe măsură ce temperatura este mai mare, iar după atingerea unui maxim coeficientul de frecare se micșorează prin creșterea în continuare a temperaturii (Fig. 3.16).

Acest mod de variație a fost explicat pentru cazul corpurilor din oțel astfel: creșterea temperaturii până la valori în jurul a 700-800°C conduce la creșterea coeficientului de frecare ca urmare a apariției oxizilor primari pe suprafața corpului, oxizi cu proprietăți abrazive. Creșterea temperaturii peste valorile de 700-800°C producând apariția oxizilor secundari mai moi și din ce în ce mai plastici pe măsură ce temperatura se mărește, având chiar rol de lubrifiere, produce micșorarea coeficientului de frecare.

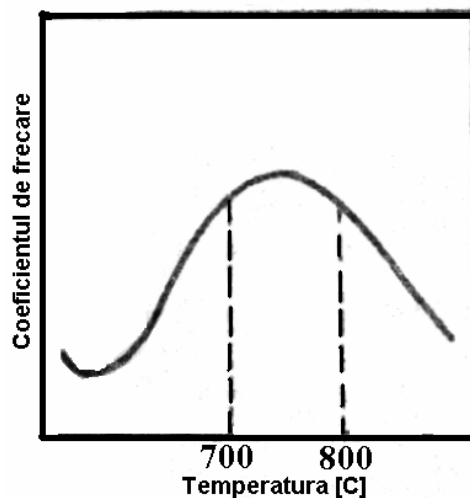


Fig.3.16

În funcție de intervalul de temperatură în care are loc creșterea și respectiv micșorarea valorilor coeficienților de frecare se poate admite, atât pentru oțel, cât și pentru metale și aliaje neferoase în general, că la deformarea la cald creșterea temperaturii conduce la micșorarea valorii coeficientului de frecare, iar la deformarea la rece creșterea temperaturii conduce la mărirea valorii coeficientului de frecare.

În cazul oțelului și a domeniului de temperaturi caracteristic deformării prin laminare la cald, Ekelund a obținut următoarea dependență între coeficientul de frecare și temperatura de deformare:

$$f = k(1,05 - 0,0005t) \quad (3.52)$$

unde k este un coeficient cu valoarea 0,8 pentru cilindrii din fontă și 0,1 pentru cilindrii din oțel.

În ce privește **influența vitezei de deformare** cât și a vitezei relative de alunecare care apare între cele două corpuri în contact în procesul de deformare, asupra valorii coeficientului de frecare, s-a constatat că pe măsură ce viteza de deformare crește, valoarea coeficientului de frecare scade.

Astfel în cazul laminării (atât la cald cât și la rece) s-a constatat că mărirea vitezei de laminare conduce la scăderea continuă a valorii coeficientului de frecare. Dacă în cazul laminării la cald pentru intervalul de viteze cuprins între 2-3 m/sec se constată o scădere bruscă a coeficientului de frecare (de circa 2 ori), în cazul laminării la rece micșorarea

coeficientului de frecare este mia intensă în intervalele de viteze de până la 25m/sec, după care influența vitezei asupra variației coeficientului de frecare este neglijabilă.

În ultimul timp se folosesc tot mai frecvent pentru micșorarea valorii coeficientului de frecare de pe suprafețele de contact ale corpurilor supuse deformării atât la cald, cât și la rece, diferite unsori tehnologice. Acestea formează un strat intermediar între suprafața corpului deformat și suprafața sculelor de deformare, creându-se astfel condițiile frecării lichide, semilichide sau în film de ulei.

Pentru ca unsoarea tehnologică, în condițiile specifice zonei de deformare să-și îndeplinească rolul său de lubrifiant, trebuie asigurați cei doi parametri, ce pot caracteriza o unsoare tehnologică, respectiv activitatea și vâscozitatea acesteia.

Prin activitatea unei unsori tehnologice, se înțelege proprietatea acesteia de a forma pe suprafața de contact un film continuu și rezistent la presiunile ce apar în timpul deformării. Vâscozitatea unsorii tehnologice asigură rezistența acesteia la fenomenul de îndepărtare a aei din zona de deformare sub acțiunea presiunilor ce apar în timpul deformării.

La deformarea plastică în funcție de starea lor de agregare se folosesc următoarele tipuri de unsori tehnologice:

- unsori lichide, cum sunt uleiurile minerale, vegetale și animale, cât și amestecuri de uleiuri, glicerină, acizi grași, etc.
- emulsii, care reprezintă un sistem compus din două faze lichide din care una se dispersează sub formă de picături fine în cealaltă. Astfel se folosesc emulsii de uleiuri în apă, sau ulei, la care pentru asigurarea stabilității în timp se introduc anumite substanțe numite emulgatori.
- unsori solide, cum sunt săpunuri, grafit, bisulfitul de emoliben, parafină, stearină, silicați, etc. Aceste materiale se pot folosi ca atare sau în unele cazuri sub formă de suspensii în uleiuri sau apă.
- unsori consistente produse în special din uleiuri minerale în care se adaugă diferite săpunuri pentru mărirea vâscozității și implicit pentru mărirea rezistenței peliculei de unsoare la presiunile de deformare.
- metale moi și plastice, cum ar fi plumbul sau cuprul cu care se acoperă corpul supus deformării.

În tabelul sunt prezentați lubrifianți recomandați pentru câteva procese de prelucrare prin deformare plastică.

Tipul operației	Materialul procesat	Lubrifianți recomandați
Laminare la rece	Otel	-emulsii(ulei în apă)
		-ulei mineral
		-ulei vegetal
	Otel inoxidabil	-uleiuri cu vâscozitate mare
	Aliaje de Cu	-ulei mineral -emulsii cu ulei mineral în apă
Aluminiu		-ulei mineral
		-emulsie
Laminare la cald	Otel și otel inox	-oxizii de pe suprafața semifabricatului
		-sticlă
		-grafit în apă
	Aliaje de Cu	-oxizii de pe suprafața

Elemente de teoria deformarii plastice

		semifabricatului
		- ulei mineral
	Aluminiu	-emulsii cu ulei mineral in apa
Tragere si trefilare uscata(pentru sarme cu diametre mai mici de 0,5 mm)	Otel	-pelicula de stearat de Na sau Ca pe CaO sau borax
		-sapun fosfat
		-depunere metalica de Cu,Zn
	Otel inox	-pelicula de stearati metalici pe CaO, borax sau oxalat
		-bisulfura de molibden(MoS_2)
		-acoperiri metalice(Cu)
Tragere si trefilare uscata(pentru sarme cu diametre mai mari de 0,5mm)	Otel	-emulsii cu sapun, acizi grasi, uleiuri grase si apa
	Otel inox	-uleiuri vegetale
		-uleiuri minerale grase
	Aliaje de Cu	-emulsii cu sapun, acizi grasi
	Aluminiu	-uleiuri minerale
Forjare si extrudare la rece	Otel	-ulei mineral cu aditivi
	Otel inox	-oxalat acoperit cu sapun si grafit
	Aliaje de Cu	-sapunuri(stearat de Zn), lanolina, ceara, seu
	Aluminiu	-sapunuri(stearat de Zn), lanolina, ceara, seu
Forjare si extrudare la cald	Otel si otel inox	-grafit in apa, ulei, emulsie sau vaselina
		- MoS_2 in ulei sau emulsie
		-sticla, rumegus
	Aliaje de Cu	-oxizi de pe semifabricat
		-grafit in ulei sau apa
	Aluminiu	-oxizi de pe semifabricat
-grafit in ulei sau apa		

Principalele metode experimentare de determinare a coeficientului de frecare pot fi impatite in doua grupe:

1. metode directe, care se bazeaza pe masurarea simultana a fortei de frecare si a celei normale, dupa care se determina valoarea coeficientului de frecare.
2. metode indirecte, se bazeaza pe influenta pe care o are frecarea asupra unor parametrii specifici procesului de deformare sau a modificarilor de forma pe care le sufera semifabricatul.

Neuniformitatea deformărilor la prelucrarea prin deformare plastică

În procesele de deformare plastică starea de tensiuni și deformări este neuniformă ceea ce produce o curgere neomogenă a materialului.

Prin neuniformitatea deformărilor plastice se înțelege diferența dintre valoarea maximă și minimă a deformării plastice locale de-a lungul unei axe.

Prezența unor defecte în produsele prelucrate, cum ar fi: fisurile interioare, suprapunerile de material, modificările de formă, etc., sunt strâns legate de modul de curgere al materialului prelucrat.

Principalele cauze care provoacă deformarea neuniformă sunt:

1. Frecarea pe suprafața de contact dintre scula și semifabricat, constituie cauza principală care provoacă deformarea neuniformă a materialului. Cu cât forțele de frecare sunt mai mari, cu atât crește și neuniformitatea deformărilor. Mărimea forțelor de frecare este dependentă de rugozitatea sculelor și de calitatea lubrifiantului folosit.

Într-un corp cilindric supus deformării prin refulare prezenta forțelor de frecare duce la apariția a 3 zone distincte, conform figurii 3.17.

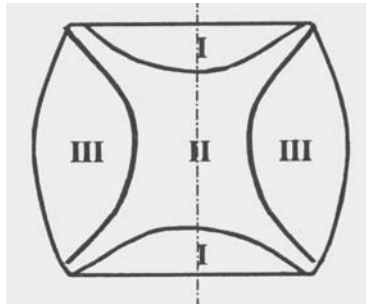


Fig.3.17 Zonele de deformare la refularea unui semifabricat cilindric

Zona I este domeniul cu deformare minimă datorită prezentei forțelor de frecare, zona II este domeniul cu deformare maximă, zona III este domeniul cu deformare medie.

2. neomogenitatea fizico-chimică și structurală a materialului supus deformării, are efecte asupra deformării materialului prin coexistența la nivelul grăunțelor a unor zone cu deformare omogenă și neomogenă.

3. neomogenitatea termică a semifabricatului, apare în cazul prelucrărilor la cald și se datorează transferului termic mai rapid de la semifabricat către sculele de deformare, astfel încât în vecinătatea suprafețelor de contact rezistența la deformare a materialului să crească datorită răcirii mai intense. Ca efect al acestui proces, deformarea zonelor de la suprafețele de contact va fi frântă accentuându-se neuniformitatea deformării produsă de forțele de frecare.

4. forma geometrică a sculelor, influențează într-o mare măsură neuniformitatea deformării. În figura 3.18 este prezentat un exemplu în acest sens.

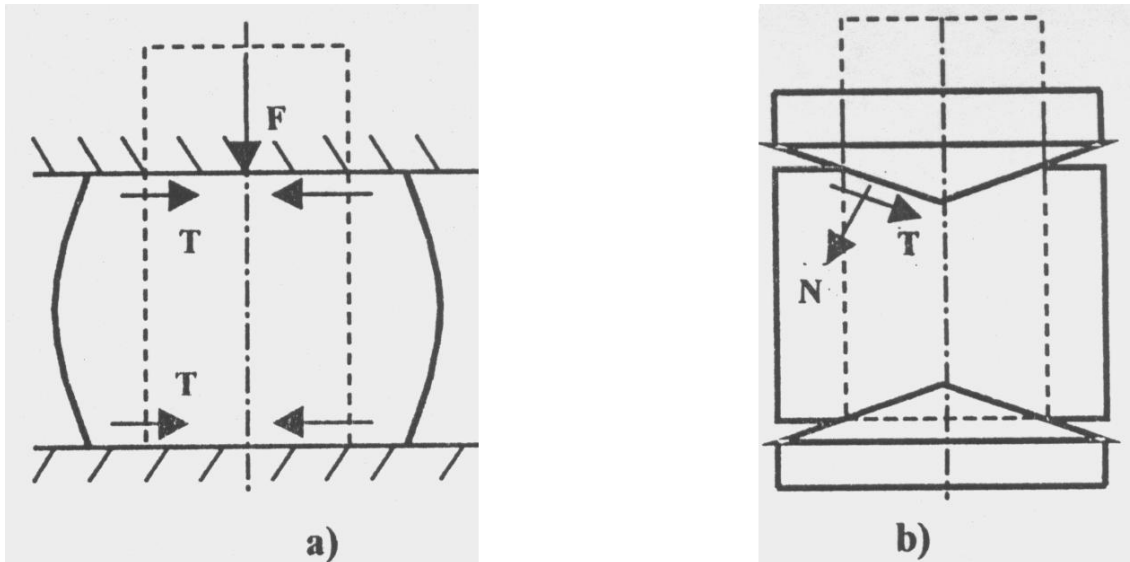


Fig. 3.18 Influența formei sculelor de deformare asupra neuniformității deformării la refularea unui semifabricat cilindric
a. între scule plan-paralele, b. între scule conice

Pentru punerea în evidență a neuniformității deformării se folosesc mai multe metode:

1. Metoda rețelelor rectangulare, care constă în sectionarea corpului înainte de deformare cu un plan axial și trasarea unei rețele rectangulare pe una dintre suprafețele plane rezultate. Se va reface apoi corpul inițial prin lipirea celor două jumătăți, după care se va deforma. În urma deformării se desface cele două jumătăți analizându-se modul în care s-a deformat rețeaua trasată inițial. Un astfel de exemplu este prezentat în Fig. 3.19.

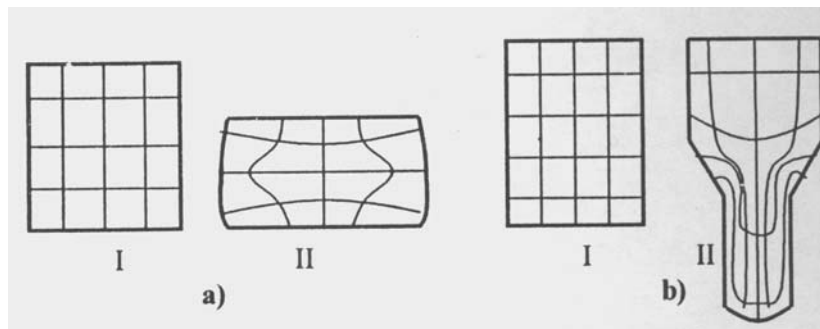


Fig. 3.19 Determinarea neuniformității deformării prin metoda rețelelor rectangulare
a. refulare; b. extrudare; I înainte de deformare; II după deformare

2. Metoda măsurării durității, se bazează pe dependența dintre gradul de deformare și intensitatea ecruisării. Metoda se aplică doar în deformările plastice la rece. Metoda constă în deformarea plastică a unui semifabricat, urmată de sectionarea axială și măsurarea durității în diverse puncte pe una din suprafețele plane rezultate prin tăiere. În punctele în care deformarea s-a produs mai intens, duritatea va fi mai mare datorită ecruisării mai puternice a materialului.

3. Metoda surubului introdus excentric, constă în introducerea unui surub într-o epruvetă nedeformată astfel încât filetul acestuia să treacă prin axa longitudinală a epruvetei (Fig. 3.20). Metoda permite determinarea cantitativă a neuniformității deformării. După deformarea prin refulare cu un anumit grad de deformare a epruvetei, aceasta se sectionează longitudinal astfel încât planul de sectionare să treacă prin axa surubului și a epruvetei.

Notând cu p_0 pasul inițial al surubului, după deformare acesta devine variabil pe înălțime, astfel ca se poate determina gradul efectiv de deformare ε_e pentru fiecare pas al surubului cu relația:

$$\varepsilon_e = \frac{p_0 - p_i}{p_0} \times 100 \quad (3.53)$$

Unde: p_0 este pasul inițial al surubului

p_i , pasul surubului la o înălțime dată.

Neuniformitatea absolută a deformării se poate calcula cu relația:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{e\max} - \varepsilon_{e\min} \quad (3.54)$$

Unde: $\varepsilon_{e\max}$ este gradul maxim de deformare (la mijlocul înălțimii epruvetei)

$\varepsilon_{e\min}$, gradul minim de deformare (la zonele de contact scula-semifabricat)

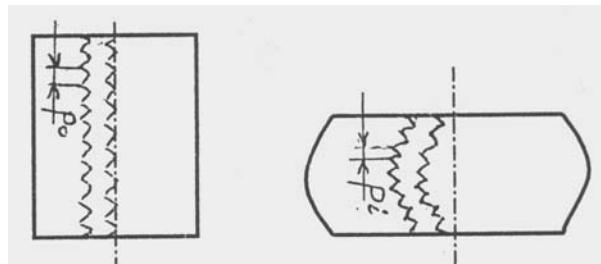


Fig. 3.20 Epruvetă cu surub introdus excentric înainte și după deformare

Cai de reducere a neuniformității deformării

Pentru reducerea forțelor de frecare este necesar ca suprafețele active ale sculelor să fie prelucrate prin procedee care să permită reducerea rugozității suprafețelor active ale acestora (operații de rectificare și superfinisare). De asemenea se recomandă ca suprafețele sculelor să fie unse cu lubrifianți. Pentru diminuarea neuniformității chimice și structurale, se poate aplica un tratament termic (recoacerea de omogenizare). Neomogenitatea termică poate fi redusă prin preincalzirea sculelor, pentru a diminua transferul de la semifabricat. Temperatura de preincalzire a sculelor este limitată de caracteristicile mecanice ale oțelurilor din care sunt executate și de pericolul formării aderentelor de material. De asemenea tot în scopul reducerii neomogenității termice se pot aplica și alte metode: folosirea unor lubrifianți care să aibă și proprietăți termoizolante (ex. sticlă solubilă) sau acoperirea suprafeței active a sculelor cu vopsele refractare.

O serie de cercetări au demonstrat că o reducere importantă a neuniformității deformării se poate obține și prin optimizarea formei geometrice a sculelor. Astfel, de exemplu, formele profilate (sigmoide, gausiene, etc.) ale matritelor pentru extrudare directă și tragere-trefilare sunt de preferat celor conice deoarece neuniformitatea deformării se reduce considerabil.

CAPITOLUL 5

ELEMENTE TEORETICE ALE MODELARII PROCESELOR DE DEFORMARE

5.1. Introducere

Prin modelare se intelege studierea cu ajutorul unui model a unui fenomen inaccesibil cercetarii directe. In cele mai multe cazuri modelarea este urmata de simularea procesului studiat urmarindu-se evolutia unor parametrii cu ajutorul modelului, in conditii cat mai apropiate de cele reale.

In ultima perioada datorita dezvoltarii calculatoarelor, au aparut pe piata programe specializate de simulare a proceselor de deformare, care permit determinarea unor parametrii esentiali: tensiunile si deformatiile din corpul deformat, modul de curgere a materialului, forma finala a produsului, distributia campului de temperatura, etc. Prin modelare si simulare numerica procesele de deformare pot fi vizualizate in orice moment al desfasurarii lor, ceea ce permite regandirea unor solutii pentru rezolvarea problemelor ce apar pe parcurs. De asemenea prin aceasta metoda pot fi optimizate din faza de proiectare procesele tehnologice si sculele.

Daca in domeniul comportarii elastice a unui material, adoptarea unui model matematic este relativ simpla, intre efortul unitar si deformatia specifica existand o relatie liniara, in cazul domeniului plastic de deformare problema este mult mai complicata deoarece relatia de dependenta σ - ε este foarte greu de descris printr-o relatie matematica.

Cateva dintre diagramele caracteristice σ - ε simplificate, folosite in modelarea materialelor metalice sunt prezentate in figura .

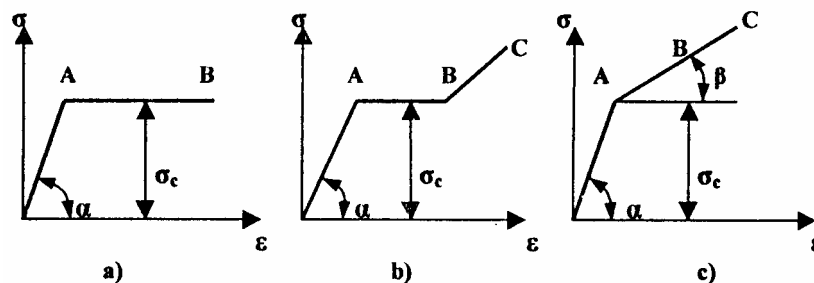


Fig.

a. comportare ideal-plastica; b. comportare plastica cu ecrusare; c. comportare elasto-plastica

Cand deformatiile plastice sunt mari in comparatie cu cele elastice, modelul poate fi si mai mult simplificat, neglijand complet deformatiile elastice. Se obtine astfel modelul corpului rigido-plastic (Fig.).

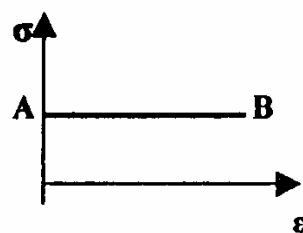


Fig.

Pentru a putea studia problemele specifice modelarii trebuie stabilite ecuatiile constitutive, care descriu relatiile neliniare care exista intre unele variabile de proces ca de exemplu; tensiuni, viteze de deformare, temperatura, grade de deformare. Ecuatiile constitutive sunt unice pentru fiecare material in conditii de deformare date si sunt determinate experimental. Pentru extinderea lor la situatii complexe se folosesc ipoteze simplificatoare. O conditie esentiala in stabilirea ecuatiilor constitutive de material este ca acestea sa fie exprimate intr-o forma compatibila cu programele de analiza cu element finit.

In general ecuatiile constitutive sunt de forma:

$$\bar{\sigma} = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, \sigma^*) \quad ($$

Unde: ε este gradul real de deformare,

E , viteza reala de deformare,

T -temperatura instantanee de deformare

σ^* - variabila care depinde de prelucrarile anterioare ale materialului si exprima starea materialului la un moment dat.

Solutiile analitice ale problemelor sunt expresii matematice care au meritul de a da valori necunoscute in oricare punct al corpului, dar astfel de solutii nu pot fi obtinute decât in anumite cazuri simple. În locul calculului analitic se va recurge la calculul numeric aproximativ (metoda diferentelor finite, metoda elementului finit), dar cu solutii acceptabile pentru valorile necunoscute, nu intr-o infinitate de puncte, ci intr-un numar limitat de puncte.

Evaluarea parametrilor procesului de deformare plastica consta in determinarea: deformatiilor, tensiunilor, temperaturii, vitezei de deformare.

Sub actiunea unor cauze externe: forte aplicate concentrat, presiuni, fluxuri de temperatura, etc., efectul general va fi deformarea corpului (parametrii procesului modificandu-se continuu pe toata durata deformarii). Natura si distributia efectelor intr-un corp solid depind de caracteristicile sistemului de forte si de forma geometrica a corpului.

Scopul este de a determina distributia acestor efecte. Exista doua tipuri de probleme intalnite la aplicarea metodei elementului finit la studiul procesului de deformare plastica clasificate dupa modul de alegere a functiilor simple de aproximare. Una dintre optiuni se bazeaza pe alegerea unui camp ipotetic al deplasarilor, iar cealalta, mai putin raspandita, se bazeaza pe alegerea unui camp ipotetic al tensiunilor.

Determinarea distributiei deplasarilor utilizand metode conventionale ar fi foarte dificila, uneori chiar imposibila, de aceea utilizarea metodei elementului finit (MEF) se in aceste cazuri, este absolut necesara.

Metoda elementului finit se aplica prin parcurgerea urmatoarelor etape:

1. discretizarea si alegerea configuratiei elementelor finite (Fig.)
2. definirea functiilor de interpolare sau modelare
3. alegerea formularii ecuatiei constitutive
4. stabilirea ecuatiilor elementare
5. asamblarea ecuatiilor elementare in sistemul de ecuatii al structurii si introducerea conditiilor la limita.
6. rezolvarea sistemului pentru determinarea necunoscutei primare
7. efectuarea de calcule suplimentare pentru determinarea necunoscutei aditionale
8. interpretarea rezultatelor

Fig.

Avantajele folosirii MEF pentru analiza deformarii metalelor sunt:

- pot fi luate in considerare forme complicate de semifabricate si scule;
- pot fi analizate stari de tensiuni si deformatii tridimensionale;
- pot fi obtinute valori precise ale tensiunilor si deformatiilor.

Esenta analizei cu elemente finite o constituie inlocuirea corpului deformabil, respectiv a continuumului real, printr-un sistem structural articulatale ale carui subregiuni sunt, de fapt, parti componente ale aceluasi corp. Metoda se bazeaza, deci, pe conceptul de discretizare, partile componente in care se imparte corpul se numesc elemente finite. O consecinta a acestei divizari este aceea ca se obtine si o impartire a distributiei deplasarilor u , distributie care este discretizata in subzone corespondente. Elementele finite sunt mai usor de examinat in comparatie cu corpul intreg.

Metoda elementului finit are si unele dezavantaje, din care, cele mai importante ar fi:

- datele de intrare sunt in general numeroase, astfel ca este necesar un efort relativ mare pentru pregatirea si introducerea lor. Pentru usurarea muncii de introducere a datelor au fost elaborate programe preprocesare;

- rezultatele se obtin sub forma unor ample colectii de valori numerice ale functiei sau functiilor studiate, intr-un numar relativ mare de noduri, incat analiza procesului impune studiul atent al acestei multimi de numere. Pentru facilitarea analizei rezultatelor au fost elaborate programe postprocesare, care in general, exploateaza facilitatile grafice ale sistemelor de calcul, furnizand rezultatele nu numai numeric ci si grafic.

- calitatea rezultatelor depinde de experienta si abilitatea analistului de a elabora un model cu elemente finite pentru problema studiată.

5.2. Programe comerciale de analiza cu elemente finite

Exista, la ora actuala, numeroase produse soft (programe) de analiza cu elemente finite a proceselor de deformare plastica, care sunt imbunatatite continuu. Un program de analiza cu elemente finite va avea intotdeauna doua parti distincte :

- programul de introducere a datelor (preprocesorul);
- programul de afisare a rezultatelor (postprocesorul).

La marea majoritate a programelor, preprocesorul are in componenta (la final) modulul de analiza propriu - zisa, astfel ca dupa introducerea completa a datelor se va trece la analiza cu elemente finite, rezultatele fiind salvate in fisiere specifice fiecarui program.

Cu cat programul este mai complex, cu atat modulul de preprocesare si cel de postprocesare este mai usor accesibil si mai complet. Pentru a avea un produs soft aplicabil general la cat mai multe procese de deformare plastica, este necesar un program master de legatura intre diferitele module, fiecare modul fiind proiectat pentru una sau mai multe etape din procesul de analiza cu elemente finite. Orice program de analiza cu elemente finite va avea un modul de desenare a semifabricatului care se deformeaza, a sculelor, si va avea, deasemenea, un modul complex de generare a retelei. Dupa realizarea retelei in intregul volum (sau pe intreaga suprafata, in cazul unei analize bidimensionale) se va trece la introducerea datelor necesare pentru analiza:

- datele coordonatelor, care exprima pozitia tuturor nodurilor definite anterior prin modulul de desenare si modulul de generare a rețelei;

- datele elementale: numerele nodurilor, elementelor, numerele de subdomeniu și de referință (care au rezultat la numerotarea din modulul de generare a rețelei);
- datele de material care vor conține un set de numere de material precum și informații alfanumerice despre marimile care vor fi postprocesate;
- datele la limita care conțin informații numerice legate de condițiile la limita (în general condiții geometrice);
- datele încărcărilor și deplasărilor nodale;
- datele temperaturilor nodale.

Nu toate aceste date vor fi urmărite în cursul tuturor analizelor cu elemente finite din domeniul deformărilor plastice. Fiecare element are proprietăți de material asociate, care trebuie să fie introduse în programul de analiză. Spre exemplu, pentru un material elastic, izotrop, liniar, modulul de elasticitate E și coeficientul lui Poisson descriu complet comportarea materialului într-o analiză izoterma. În general, mai multe elemente au aceleași proprietăți de material, astfel ca nu va fi necesară specificarea acestora pentru fiecare element individual, ci global (o singură dată pentru toate elementele cu aceleași proprietăți) în cazul în care soluția implică o dependență de temperatură, aceasta trebuie introdusă nodal.

MODELAREA PROCESULUI

Procesele de deformare plastică sunt în general complexe fiind imposibilă modelarea lor cu ajutorul unor relații simple cu unul sau doi parametri. Trebuie create modele, în acest caz, multiparametru, pentru utilizarea acestora în proiectarea, analiza și controlul proceselor. Pentru multe aproximații trebuie realizate modele matematice care să permită, spre exemplu predicția distribuției câmpului de curgere care apare în timpul deformării în funcție de proprietățile de material, geometria inițială și finală, forma sculelor, temperatura, transferul de căldură, viteza de deformare, frecare, etc. Pentru cele mai multe procese industriale descrierea și aproximarea lor matematică este deosebit de complexă, iar o soluție apropiată de realitate este dificil de obținut.

Variabilele importante în analiza proceselor de deformare plastică sunt:

Variabile de semifabricat

- Tensiunea de curgere ca funcție de viteza de deformare, temperatura și microstructura (ecuație constitutivă)
- Deformabilitatea ca funcție de viteza de deformare, temperatura și microstructura (curbele limită de deformare)
- Condițiile de suprafață
- Proprietățile fizice și termice ale materialului
- Condițiile inițiale (compoziția, temperatura, deformările anterioare)
- Efectul schimbărilor de microstructură și compoziție în funcție de tensiunea de curgere și deformabilitate

Scule

- Geometria sculelor
- Condițiile de suprafață
- Material, tratament termic, duritate
- Temperatura
- Rigiditate

Condițiile la interfața sculă-semifabricat

- Tipul lubrifiantului și temperatura

- Caracteristicile de racire ale stratului de lubrifiant
- Caracteristicile de aplicare si înlaturare a stratului de lubrifiant

Zona de deformare

- Modelul de deformare utilizat pentru analiza
- Curgerea materialului, viteza, viteza de deformare, deformatiile
- Tensiunile (variatiile acestora în cursul deformarii)
- Temperatura (generarea de caldura si transferul termic)

Echipamentele utilizate

- Viteza, productivitatea
- Forta, energia maxima
- Rigiditatea

Piesa finita

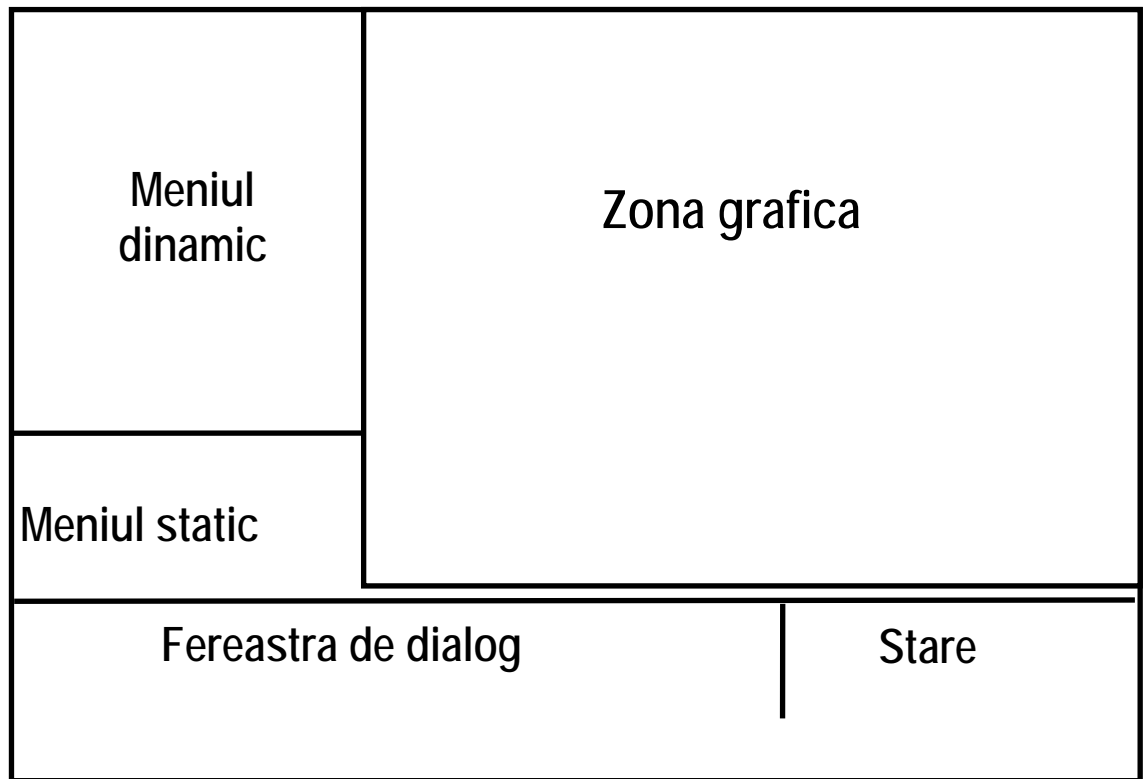
- Geometria
- Tolerantele
- Suprafata finala
- Microstructura, proprietati mecanice

PROGRAMUL MARC / Autoforge

Programul MARC / Autoforge este un produs soft de analiza cu elemente finite a proceselor de deformare plastica. Programul are 5 componente majore:

- Realizarea desenului semifabricatului si a matritelor. Aceasta va include si realizarea retelei de elemente finite a semifabricatului precum si definirea criteriilor de regenerare a retelei daca distorsiunile sunt puternice
- Simularea se va face utilizand modele de material elastoplastice inclusiv tinand cont de ecrusare, de efectul temperaturii si al vitezei de deformare. Un model mai simplu, care poate fi folosit cu bune rezultate, este cel rigidplastic care va neglija componentele elastice.
- Definirea cinematicii deformarii plastice. Analiza deformarii plastice cu deplasari ai rotatii mari.
- Incarcarile si constrangerile sunt introduse prin intermediul suprafetelor matritelor. Conditii de contact la interfata scula - semifabricat sunt foarte complexe
- Metoda cu elemente finite presupune introducerea unui numar însemnat de date, care trebuie interpretate pentru a se asigura o analiza corecta

Fereastra grafica, care apare la apelul programului MARC / Autoforge are urmatoarea forma:



Forma generala a ferestrei grafice la programul MARC / Autoforge

Se poate observa ca fereastra grafica este împartită în trei zone importante:

- zona grafica
- zona cu meniuri
- zona de dialog

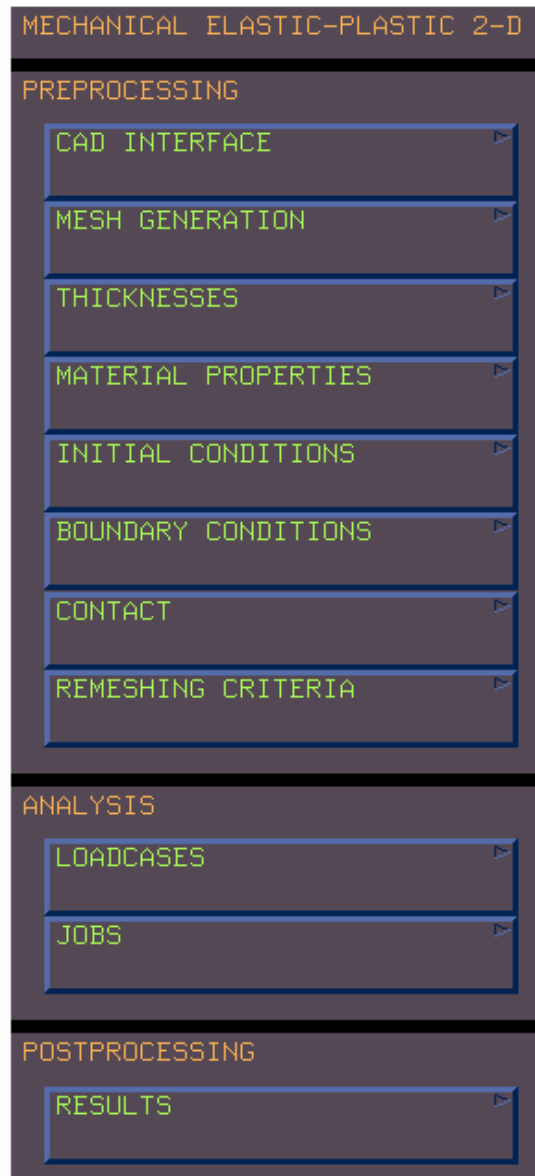
În zona grafica se va vizualiza desenul realizat, încărcările, deplasările, rețeaua de elemente finite, rezultatele obținute. Putem spune ca zona grafica este utilizată pentru afișarea stării curente a bazei de date.

Zonele cu meniuri sunt rezervate pentru a afișa meniurile selectabile, împartite în două tipuri: meniuri dinamice și meniuri statice. La meniurile dinamice zona cu meniuri se va schimba odată cu selectarea unei opțiuni în timp ce meniurile statice vor fi tot timpul prezente pe ecran, iar opțiunile lor pot fi selectate oricând în cursul analizei.

Zona de dialog este o zonă text cu 5 linii active în care apar comenzile selectate cu ajutorul meniurilor, de asemenea se vor afișa informații suplimentare și mesaje de eroare

MENIUL DINAMIC

Prima dată se va alege modelul care va fi analizat: plan, plan axial-simetric, spațial, elastoplastic, rigidplastic, cuplat elastoplastic și temperatura, rigidplastic și temperatura. După această alegere apare meniul principal care va avea următoarea formă generală:



CAD INTERFACE

Optiunea "CAD Interface" ne permite citirea geometriei semifabricatului si a matritelor dintr-un fisier extern creat cu ajutorul unui sistem CAD. Deasemenea cu aceasta optiune se pot salva datele geometriei semifabricatului si a matritelor într-un fisier extern fie cu format standard (IGES), fie cu format specific (DXF, VDA).

MESH GENERATION

Aici sunt continute toate comenzile utilizate la crearea sau editarea geometriei semifabricatului si a matritelor, precum si la crearea sau editarea retelei de elemente finite. Functional meniul "Mesh Generation" include comenzi care permit adaugarea, stergerea sau editarea nodurilor, elementelor, punctelor, curbelor, suprafetelor sau solidelor unui model nou, existent. Mai sunt incluse, deasemenea, comenzi de transformare, modificare a retelei de elemente finite sau a geometriei.

THICKNESSES

Este o optiune care apare numai în cazul analizei plane a deformarii plastice si defineste grosimea modelului (sunt cuprinse comenzi de setare a proprietatilor geometrice si de aplicarea ale acestora asupra elementelor modelului)

MATERIALS PROPRIETIES

Contine comenzile specifice pentru introducerea proprietatilor de material pentru modelul care va fi analizat:

- ◆ proprietati mecanice;
- ◆ proprietati termice.

Proprietatile tipice de material sunt: modulul lui Young, coeficientul lui Poisson, tensiunea de curgere, densitatea masica, conductivitatea, caldura specifica. Pentru o analiza corecta este necesar ca toate elementele sa aiba asociate si proprietatile de material.

INITIAL TEMPERATURES

Optiunea “Initial Temperatures” contine comenzile care permit definirea temperaturii initiale, date necesare atat în cazul unei analize termice, cat si în cazul unei analize mecanice, daca materialul a fost ales din baza de date.

BOUNDARY CONDITION

Aceasta optiune cuprinde toate comenzile care definesc conditiile la limita aplicate atat elementelor finite ale retelei cat si unor entitati geometrice. Conditile la limita vor include:

- deplasari fixate;
- temperaturi fixate;
- încarcari punctuale sau distribuite;
- fluxuri de caldura;

CONTACT

Contine comenzile care definesc corpurile care vin în contact, date necesare pentru analiza contactului. Corpurile care vin în contact vor fi definite ca: semifabricat, scula rigida, scula deformabila, scula rigida cu transfer de caldura, sau corp simetric (se va defini axa de simetrie)

REMESHING CRITERIA

Este o optiune care nu apare decat în cazul analizei plane sau plane axial-simetrice, si include comenzile care introduc parametrii de control a regenerarii retelei de elemente finite în cursul procesului deformarii plastice.

LOADCASES

Meniul “Loadcases” contine comenzile care specifica parametrii necesari pentru unul sau mai multi incrementi ai analizei cu elemente finite. Orice analiza poate fi facuta numai daca include selectarea încarcarilor, definirea distributiei acestora, introducand si criteriile de convergenta. Obiectivul principal al acestei optiuni este acela de a combina conditiile individuale la limita într-un ansamblu unitar de încarcari (“loadcase”).

JOBS

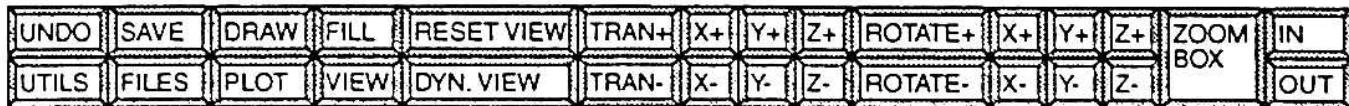
Este optiunea care contine comenzile de definire si rulare a analizei. Mai multe ansambluri unitare de încarcati ("loadcases") pot fi ansamblate într-o singura analiza.

RESULTS

Ultima optiune din meniul dinamic contine comenzile de afisare a rezultatelor: vor putea fi selectate si manipulate fisierele de rezultate, se va selecta variabila care se va afisa, se vor selecta stilul de reprezentare a acestor variabile si parametrii asociati (conturul deformat, conturul initial, pozitia initiala si finala a sculelor, etc.)

MENIUL STATIC

Este meniul utilizat în mod frecvent în programul MARC / Autoforge. Contine comenzile de lucru cu fisiere precum si comenzile de control a desenului din zona grafica (marime, vedere, modificare a planului de desenare, etc.). Cu ajutorul comenzilor din acest meniu este posibila translatia, rotatia, marirea sau micșorarea desenului. Este situat sub fereastra grafica si are urmatoarea forma:



Meniul static

CONSIDERATII TEORETICE

ECUATIA CONSTITUTIVA SI MATRICEA DE RIGIDITATE

Relatia forta - deplasare pentru o problema statica liniara poate fi scrisa sub forma :

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3.5)$$

unde: \mathbf{K} este matricea de rigiditate;
 \mathbf{u} este matricea deplasarilor nodale;
 \mathbf{f} este vectorul forta.

Daca ecuatia include conditii la limita prestabilite atat pentru deplasari cat si pentru forte ecuatia constitutiva devine:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

unde: \mathbf{u}_1 este vectorul deplasare necunoscut;
 \mathbf{f}_1 este vectorul forta prestabilit;
 \mathbf{u}_2 este vectorul deplasare prestabilit;
 \mathbf{f}_2 este vectorul forta necunoscut.

Dupa rezolvarea ecuatiei pentru determinarea vectorului deplasare necunoscut, deformatia fiecarui element poate fi calculata din relatia deformatie - deplasare, în termeni de deplasari nodale elementare:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{el} = \boldsymbol{\beta} \mathbf{u}_{el} \quad (3.7)$$

în timp ce tensiunile în fiecare element sunt obtinute din relatia tensiune - deformatie:

$$\boldsymbol{\sigma}_{el} = \mathbf{L} \boldsymbol{\varepsilon}_{el} \quad (3.8)$$

unde $\boldsymbol{\beta}$ si \mathbf{L} sunt factori de relatie deformatii - deplasari, respectiv tensiune - deformatie. Matricea de rigiditate a întregului sistem este :

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^N \mathbf{K}_i^{el} \quad (3.9)$$

Matricea de rigiditate elementara este data de relatia:

$$\mathbf{K}^{el} = \int_{V_{el}} \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{L} \boldsymbol{\beta} dV^{el} \quad (3.10)$$

VECTORUL DE ÎNCARCARE

Încarcarea nodala include contributia diferitelor tipuri de încarcari:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}^* \quad (3.11)$$

unde: \mathbf{f}_p este vectorul punctual de încarcare;

\mathbf{f}_s este vectorul de încarcare al suprafetei;

\mathbf{f}_c este vectorul de încarcare al corpului (încarcare volumetrica);

\mathbf{f}^* reprezinta toate celelalte tipuri de vectori de încarcare.

Încarcarea punctuala este asociata cu gradele de libertate nodale si poate fi adaugata direct la vectorul fortei nodale. Vectorul fortei echivalente nodale \mathbf{f}_s , \mathbf{f}_v se va calcula din distributia încarcarii si apoi se va adauga la vectorul încarcarii nodale. Programul MARC / Autoforge calculeaza încarcarea echivalenta nodala prin integrarea numerica a distributiei încarcarii pe aria sau volumul pe care aceasta se aplica.

Pentru rezolvarea problemelor neliniare, ecuatia constitutiva poate fi exprimata, în forma incrementală ca:

$$\mathbf{K} d\mathbf{u} = d\mathbf{f} \quad (3.12)$$

unde: $d\mathbf{u}$ si $d\mathbf{f}$ sunt vectorul deplasare si vectorul încarcare incrementală.

Exista trei posibilitati de determinare a solutiei unei ecuatii neliniare: metoda Newton - Raphson, metoda Newton - Raphson modificata si metoda corectiei deformatiilor. Cea mai folosita este metoda Newton - Raphson care da bune rezultate pentru cele mai multe probleme neliniare si care are avantajul unei convergente patratice (adica la iteratii succesive eroarea relativa scade patratice). Pentru problemele tridimensionale cu

deformații mari, este necesar foarte mult timp de calcul, dacă se utilizează un solver direct, problema fiind rezolvată prin utilizarea unui solver iterativ.

PROPRIETĂȚILE DE MATERIAL

Programul MARC / Autoforge permite definirea materialelor fie ca materiale elastoplastice, fie ca materiale rigidplastice. Pentru definirea proprietăților elastoplastice a unui material izotrop, este necesar un minim de trei puncte cu date de material: modulul lui Young, coeficientul lui Poisson și tensiunea de curgere inițială. Pentru un material rigidplastic este cerută numai tensiunea de curgere. În cazul analizei în care se ține cont de temperatura aceste date trebuie introduse pentru diferite temperaturi (cu ajutorul opțiunii TABLES). Tot cu această opțiune se va introduce și influența ecruisării asupra proprietăților de material.

Modelul liniar elastic presupune o relație liniară (legea lui Hooke) între tensiune și deformare. El poate fi definit simplu prin modulul de elasticitate al lui Young. Pentru a se exprima contracțiile laterale se definește coeficientul lui Poisson. Proprietățile de material sunt, deci, complet definite cu ajutorul a două constante: modulul lui Young și coeficientul lui Poisson.

Modelul inelastic independent de timp ține cont de următoarele observații:

- ◆ deformațiile plastice rămân permanente după înlăturarea tensiunii ;
- ◆ suma deformațiilor plastice remanente depinde de valoarea tensiunii la care începe descarcarea.

Câteva modele teoretice simplifică legea de variație reală a tensiunii în funcție de deformare. În general se acceptă modelele propuse de Shabaik), în plus aparând doar modelul de înmuiere prin deformare:

- rigid plastic;
- rigid vîscoplastic;
- elastoplastic;
- elastovîscoplastic;
- înmuiere prin deformare.

În cazul unui material inelastic independent de timp pe lângă modulul lui Young și coeficientul lui Poisson este esențial să fie definită ecruisarea. Aceasta va depinde de temperatura și de viteza de deformare.

MARC / Autoforge va utiliza pentru introducerea datelor legate de curgerea materialului, criteriul de curgere al lui von Mises. Programul permite introducerea dependenței de temperatura a tensiunii de curgere. Pentru a introduce tensiunea de curgere la o temperatură de referință se va alege opțiunea ISOTROPIC. Dacă se dorește introducerea variației tensiunii de curgere cu temperatura, vom utiliza opțiunea TEMPERATURE EFFECTS, pe care o vom repeta pentru fiecare material pentru care este necesar. Programul permite și introducerea unei tensiunii de curgere dependente de viteza de deformare. Pentru a folosi o tensiune de curgere care depinde de viteza de deformare se va introduce un timp fictiv cu opțiunea TIME STEP. Tensiunea de curgere la viteza de deformare inițială este dată cu opțiunea ISOTROPIC.

ÎNCARCĂRILE

Diferențele tipuri de analiză cer diferite tipuri de încărcări. Spre exemplu pentru analiza tensiunilor încărcările sunt forte, în timp ce pentru analiza temperaturilor încărcările sunt fluxuri de căldură. Putem clasifica încărcările după modul în care acționează în încărcări nodale (care acționează într-un singur nod) și încărcări distribuite (care

acionează pe o suprafață sau într-un volum). În cazul încărcărilor distribuite înainte de începerea analizei (la introducerea condițiilor la limită) programul MARC / Autoforge calculează încărcarea nodală echivalentă prin integrare numerică și o adaugă la încărcarea nodală existentă.

Încărcările mecanice sunt definite cu ajutorul opțiunilor: BOUNDARY CONDITION, POINT LOAD, EDGE LOAD, FACE LOAD, LOAD, GRAVITY LOAD sau CENTRIFUGAL LOAD. Încărcările termice sunt utilizate la analiza tensiunilor când se ține cont de temperatura și sunt introduse cu ajutorul opțiunii: BOUNDARY CONDITION pentru a defini câmpul final de temperaturi. Acesta va fi activat cu opțiunea LOADCASES.

CONCLUZII

Toate programele comerciale de analiză cu elemente finite au setate valorile implicite ale parametrilor de simulare în domeniul în care se obțin rezultatele cele mai precise în timpul cel mai scurt pentru marea majoritate a proceselor de deformare plastică.

Deci, în consecință, nu se vor modifica setările implicite decât în cazuri deosebite, în care dorim să mărim fie precizia, fie viteza de calcul.

Singurele valori pe care le va introduce utilizatorul programelor de analiză cu elemente finite sunt:

- datele legate de model;
- datele legate de caracteristicile contactului;
- datele de material;
- datele de utilaj.

Pentru procesele la care se face o analiză a proceselor de deformare plastică în care se ține cont și de temperatura mai trebuie introduse suplimentar și datele legate de câmpul de temperaturi.

O etapă importantă în analiza proceselor de deformare plastică prin simulare cu metoda elementelor finite o constituie interpretarea rezultatelor. În urma ei se pot trage atât concluzii care pot conduce la optimizarea procesului de deformare plastică, cât și concluzii legate de precizia simulării.