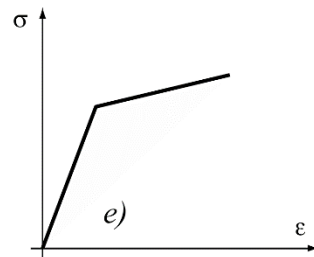
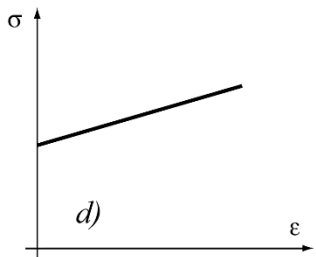
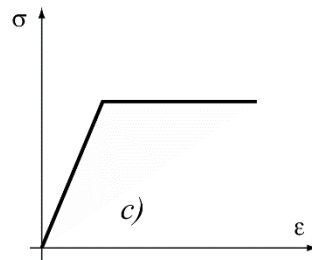
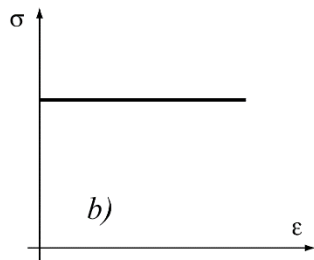
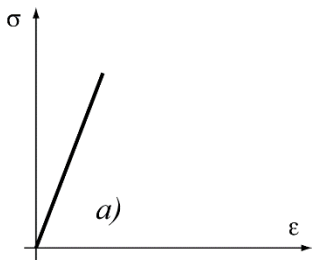


Teoretske osnove tehnologije plastičnog deformisanja

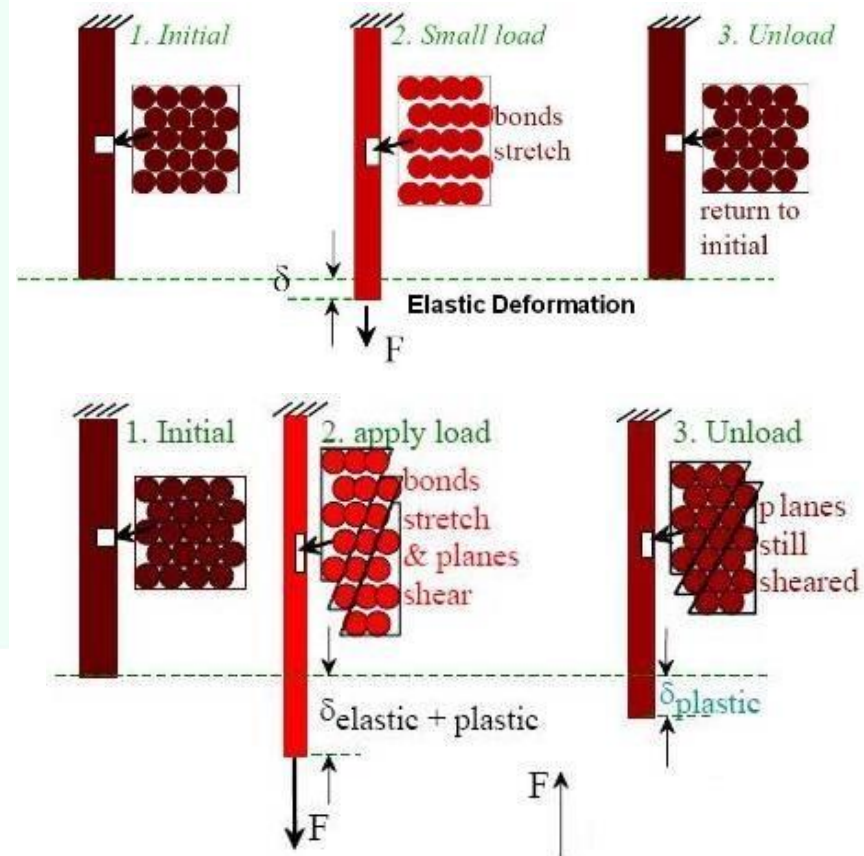
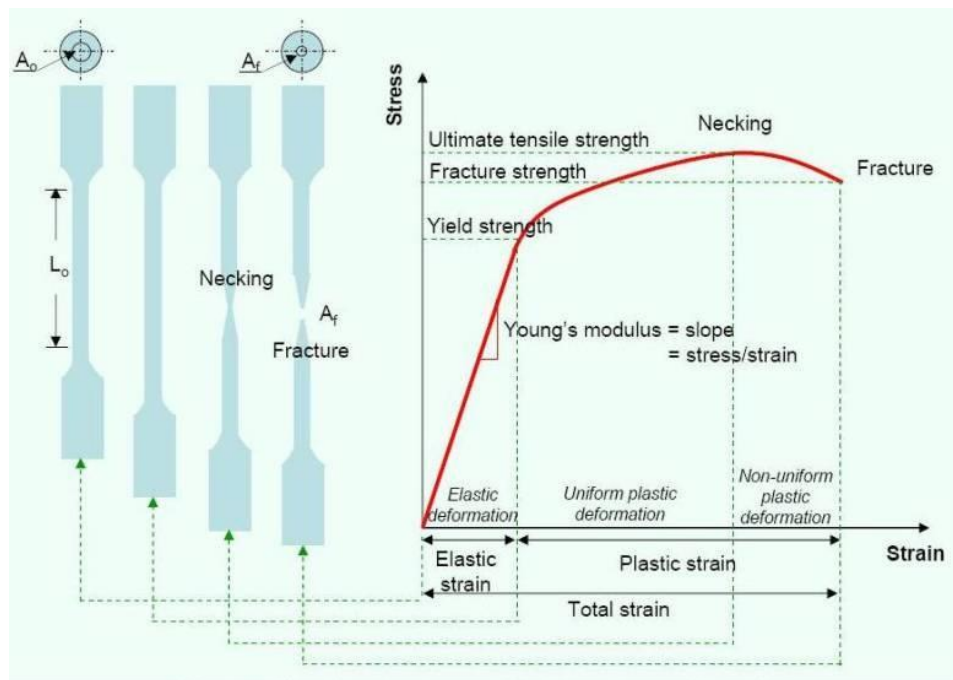
Parametri procesa deformisanja (naponi, deformacije, deformaciona sila i deformacioni rad)

Osnovne hipoteze TPD:

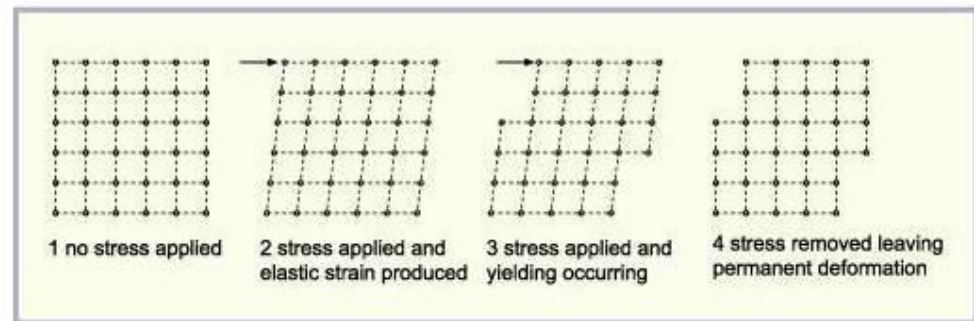
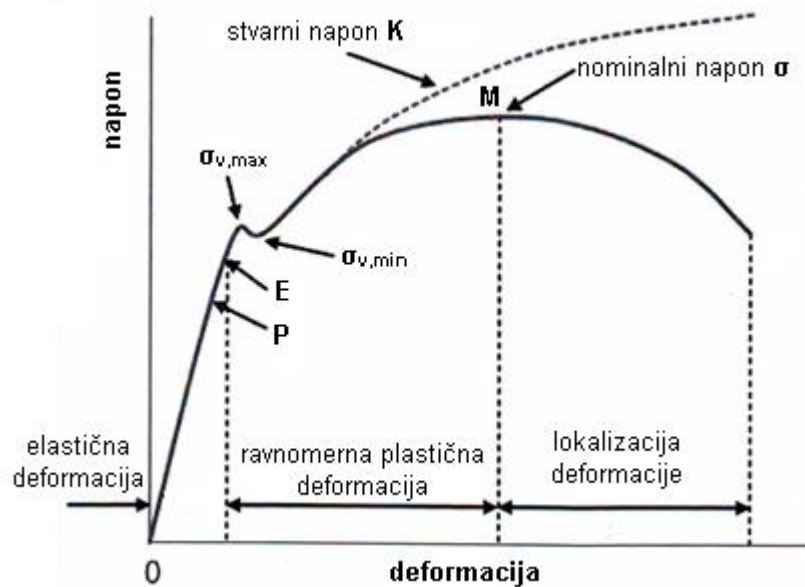
1. Hipoteza o homogenosti elastično-plastičnog tela
2. Hipoteza o prirodnom naponskom stanju
3. Hipoteza o izotropnosti strukture materijala
4. Hipoteza o idealizaciji elastičnih i plastičnih svojstava
5. Zanimarivanje elastičnih deformacija – kruta plastičnost
6. Konstantnost zapremine



- a) idealno elastičan materijal,
- b) idealno plastičan materijal
- c) idealno elastično-plastičan materijal
- d) materijal s linearnim ojačavanjem
- e) elastično-plastično telo s linearnim ojačavanjem



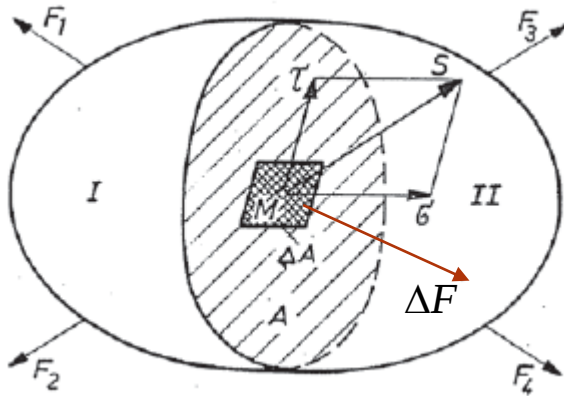
Schematic Representation of Plastic Deformation



Stages of Plastic Deformation

Pojam i definicija napona

Napon - mera prosečne sile (ΔF) po jedinici površine (ΔA)

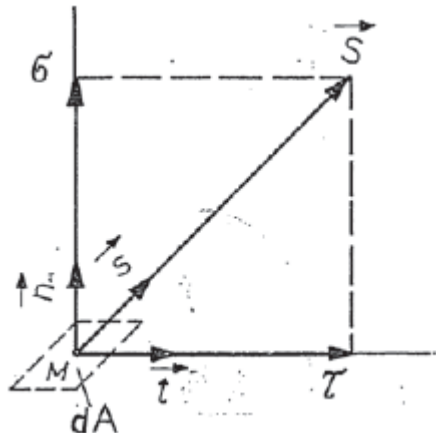


$$S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

$$S^2 = \sigma^2 + \tau^2$$

σ - normalni napon
 τ - tangencijalni napon

Napon je vektorska fizička veličina koja opisuje unutrašnje stanje napregnutog tela - **zavisi od lokacije u telu i orijentacije ravni na kojoj deluje sila.**



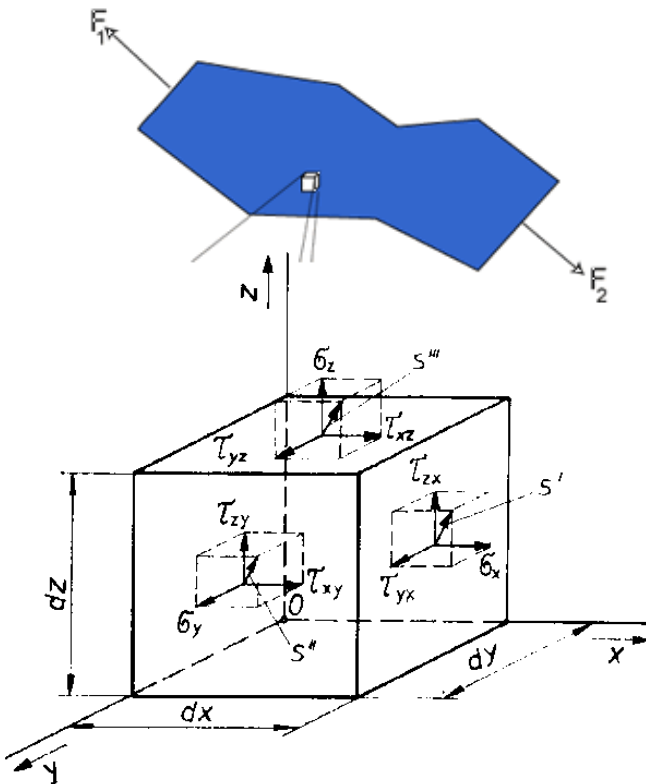
$$\vec{S} = \sigma \vec{n} + \tau \vec{i}$$

Naponsko stanje. Tenzor napona

Naponsko stanje - stanje tela izloženog dejstvu spoljašnjih sila (površinske i zapreminske) i u kome je uspostavljena unutrašnja ravnoteža elastičnih veza između čestica materijala.

- Naponsko stanje je poznato ako su poznati normalni i tangencijalni (smičući) napon u ma kom pravcu, odnosno za ma kako orijentisanu elementarnu površinu.
- Naponsko stanje je tenzorska veličina!!!!

Tenzor (grč. tensio što znači naprezanje) je vektor određenog vektorskog prostora i kao matematička struktura predstavlja uopštenje vektora. **Tenzorske veličine su fizičke veličine čija vrednost zavisi i od koordinate!!!! One se matematički predstavljaju matricom.**



σ_x	τ_{xy}	τ_{xz}	pravac ose x
τ_{yx}	σ_y	τ_{yz}	pravac ose y
τ_{zx}	τ_{zy}	σ_z	pravac ose z
ravan upravna na x	ravan upravna na y	ravan upravna na z	

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

$$T_{\sigma} = T_{\sigma}^s + D_{\sigma} = \sigma_{sr} \cdot T_1 + D_{\sigma}$$

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

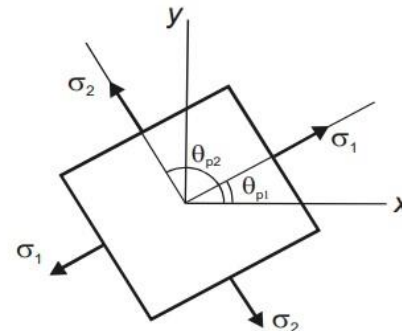
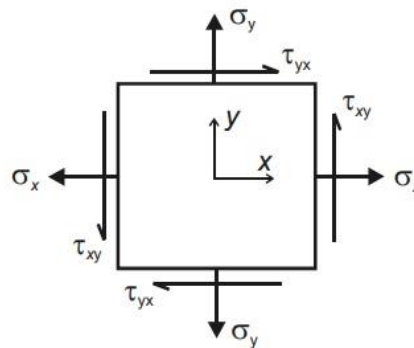
$$D_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_{sr} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{sr} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_{sr} \end{bmatrix}$$

Glavni normalni naponi

Glavni normalni naponi - Naponi u ravnima u kojima nema smičućih (tangencijalnih) napona ($\tau=0$)

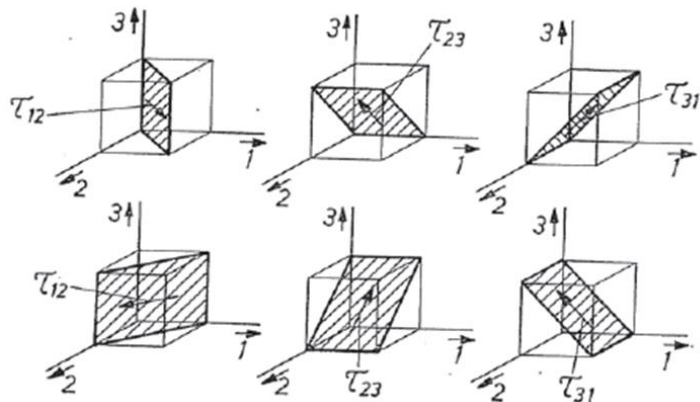
$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$



Glavni smičući (tangencijalni naponi)

Deluju u ravnima od kojih je svaka upravna na jednu glavnu koordinatnu ravan (osu) a sa ostale dve ravni (ose) zaklapa ugao od 45°!!!



$$\tau_{12} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = 0$$

$$\tau_{23} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) = 0$$

$$\tau_{31} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) = 0$$

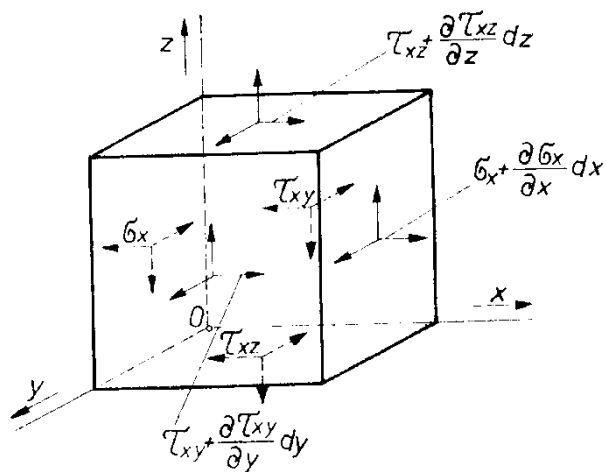
$$\tau_{12} + \tau_{23} + \tau_{31} = 0$$

Efektivni-ekvivalentni napon

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Jednačine ravnoteže napregnutog tela

Veličina napona u opštem slučaju menja se od tačke do tačke tela i predstavlja neprekidnu funkciju koordinata



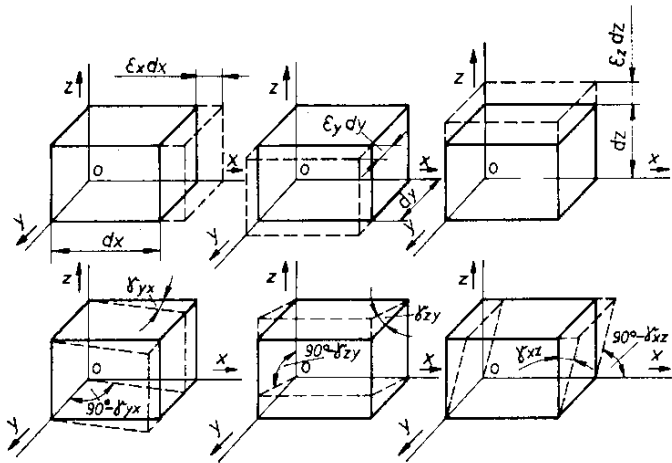
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0$$

Deformacije

Deformacija predstavlja meru promene oblika i dimenzija posmatrane elementarne zapremine ili tela u celini.



$$T_{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \epsilon_z \end{vmatrix} = D_{\epsilon}$$

$$T_{\epsilon} = T_{\epsilon}^s + D_{\epsilon} = \epsilon_{sr} T_1 + D_{\epsilon} = D_{\epsilon}$$

$$\epsilon_{sr} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z}{3} = 0$$

Efektivna deformacija

$$\begin{aligned} \epsilon_e &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left[(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_x)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right]} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \end{aligned}$$

Načini izražavanja deformacija u TPD

- apsolutna deformacija

$$\Delta l = l_0 - l$$

- jedinična (relativna) deformacija

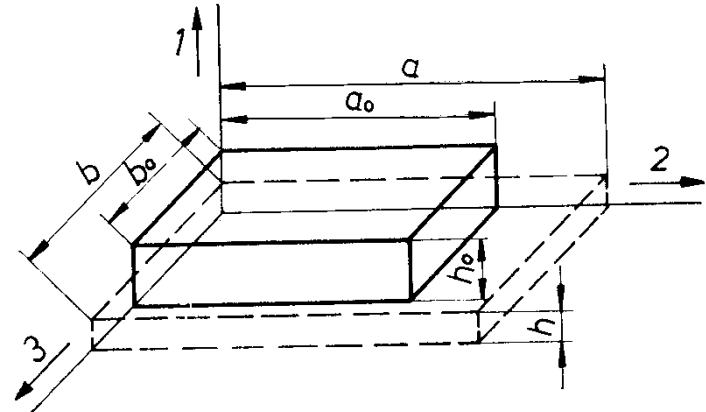
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- deformacija površine (poprečnog preseka)

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0}$$

- logaritamska deformacija

$$d\varphi = \frac{dl}{l} \Rightarrow \varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$



$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a_0} = \frac{a - a_0}{a_0} > 0$$

$$\varphi_a = \int_{a_0}^a d\varphi_a = \int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \ln \frac{a}{a_0} > 0$$

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} = \frac{b - b_0}{b_0} > 0$$

$$\varphi_b = \ln \frac{b}{b_0} > 0$$

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} < 0$$

$$\varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} < 0$$

Veza između pojedinih vrsta deformacija

$$\varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{h_0 + \Delta h}{h_0} = \ln(1 + \varepsilon_h)$$

$$\varphi = \varepsilon - \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{\varepsilon^3}{3} - \frac{\varepsilon^4}{4} + \dots \quad \varphi \approx \varepsilon$$

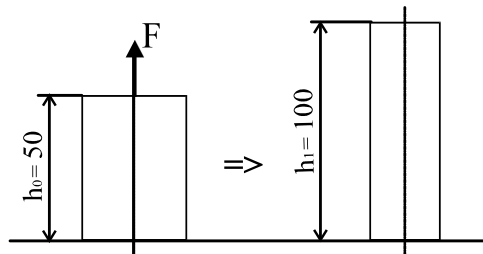
$$V_0 = V = \text{const.}$$

$$a_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = a \cdot b \cdot h \Rightarrow \frac{a}{a_0} \cdot \frac{b}{b_0} \cdot \frac{h}{h_0} = 1$$



$$\varphi_a + \varphi_b + \varphi_h = 0$$

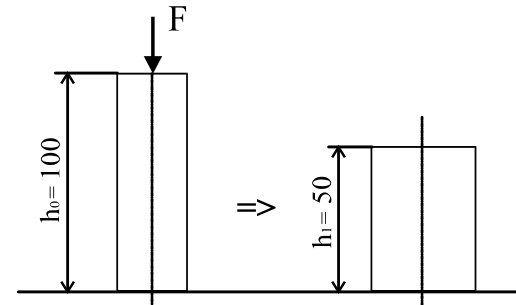
a) zatezanje



$$\varepsilon_{h(a)} = \frac{100}{50} - 1 = 1$$

$$\varphi_{h(a)} = \ln \frac{100}{50} = 0.693$$

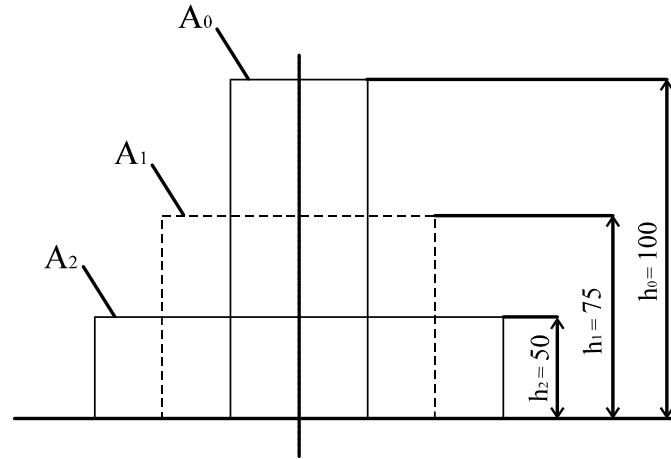
b) sabijanje



$$\varepsilon_{h(a)} = \frac{50}{100} - 1 = -0.5$$

$$\varphi_{h(a)} = \ln \frac{50}{100} = -0.693$$

Aditivnost logaritamskih deformacija



višefaznog sabijanje

$$h_0 \Rightarrow h_1; \quad \varepsilon_1 = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{75 - 100}{100} = -0.25$$

$$h_1 \Rightarrow h_2; \quad \varepsilon_2 = \frac{h_2 - h_1}{h_1} = \frac{50 - 75}{75} = -0.33$$

$$\Sigma \varepsilon_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -0.25 - 0.33 = -0.58$$

$$h_0 \Rightarrow h_1; \quad \varphi_1 = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{75}{100} = -0.228$$

$$h_1 \Rightarrow h_2; \quad \varphi_2 = \ln \frac{h_2}{h_1} = \ln \frac{50}{75} = -0.405$$

$$\Sigma \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 = -0.228 - 0.405 = -0.693$$

direktno sabijanje

$$h_0 \Rightarrow h_2; \quad \varepsilon_1 = \frac{h_2 - h_0}{h_0} = \frac{50 - 100}{100} = -0.5$$

$$h_0 \Rightarrow h_2; \quad \varphi_1 = \ln \frac{h_2}{h_0} = \ln \frac{50}{100} = -0.693$$

$$\Sigma \varepsilon_i \neq \varepsilon_{uk}$$

$$\Sigma \varphi_i = \varphi_{uk}$$

Veza napon -deformacija

- Područje elastičnih deformacija

$$\sigma = c_2 \cdot \varepsilon = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \mu (\sigma_z + \sigma_x) \right] \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

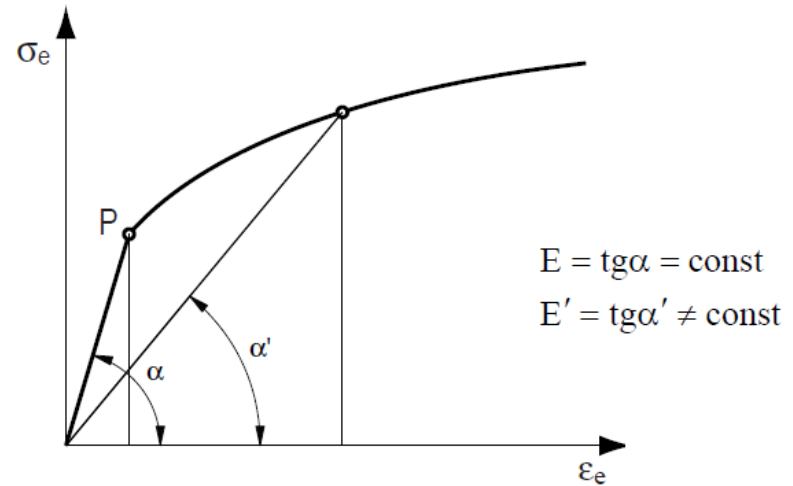
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

- Područje malih elasto-plastičnih deformacija

$$D_\varepsilon = \psi \cdot D_\sigma \quad \psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_e}{\sigma_e} = \frac{3}{2E'}$$

- Područje velikih plastičnih deformacija

$$D_{d\varepsilon} = d\lambda \cdot D_\sigma \quad d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_e}{\sigma_e}$$



Brzina deformisanja i brzina deformacije

- Brzina deformisanja (brzina pritiskivača mašine)

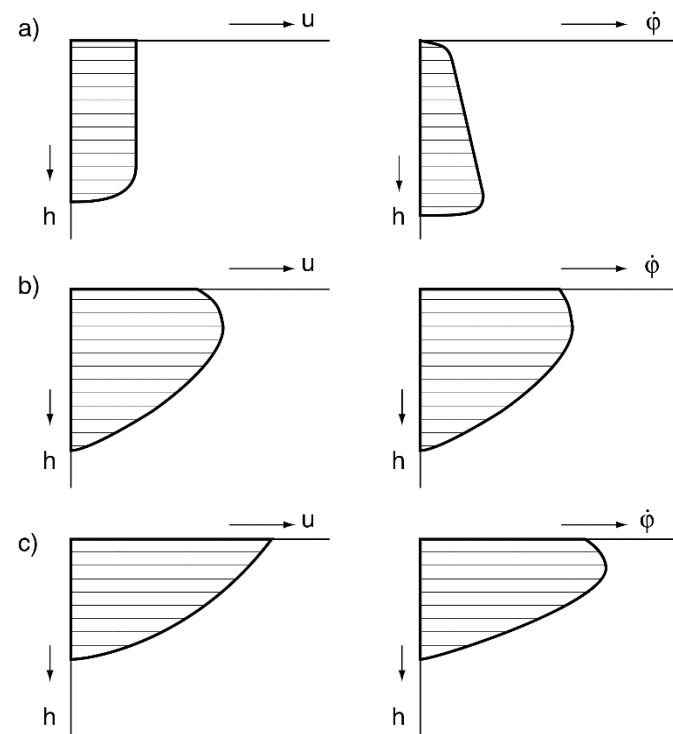
$$u = \frac{ds}{dt} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_0 - h_1}{t_0 - t_1} \text{ [m/s]}$$

- Brzina deformacije

(brzina relativnog pomeranja čestica materijala)

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh/h}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{h} \cdot u \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$\dot{\varphi}_{sr} = \frac{\varphi}{t_d} = \frac{\ln \frac{h_0}{h}}{t_d}$$

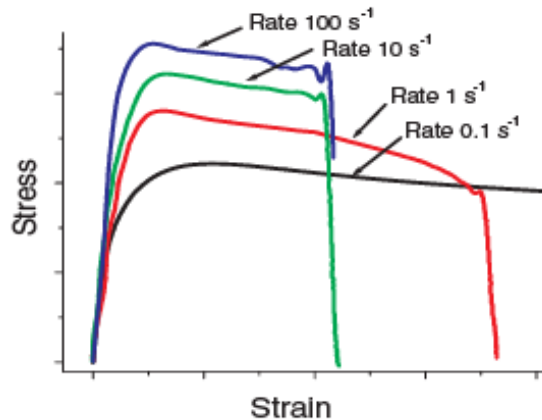


Vrsta mašine	Brzina deformisanja u [mm/s]	Brzina deformacije $\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]
Hidraulične prese	30 ÷ 500	0,01 ÷ 10
Mehaničke prese	400 ÷ 600	4 ÷ 25
Čekići	5000 ÷ 7000	40 ÷ 160

Brzina deformacije - nastavak

Prema **brzini deformisanja** postoje tri vrste deformisanja:

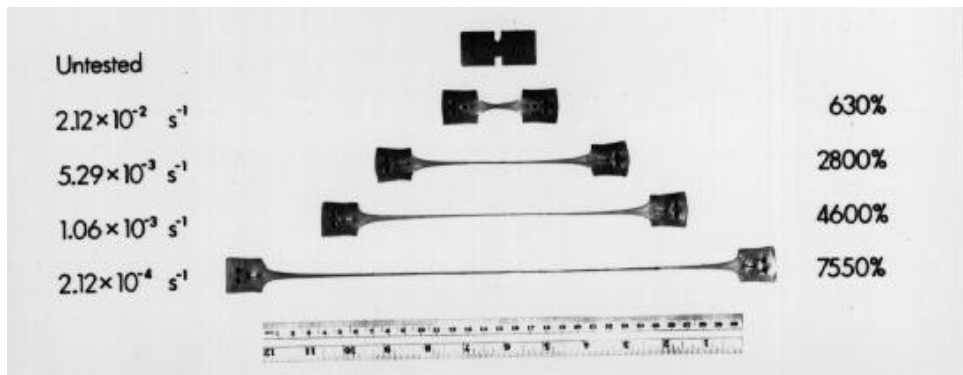
- Superplastično 10^{-5} i 10^{-2} sec^{-1}
- Kvazistatično 10^{-2} do 10^2 sec^{-1}
- Visokobrzinsko 10^2 sec^{-1} i više



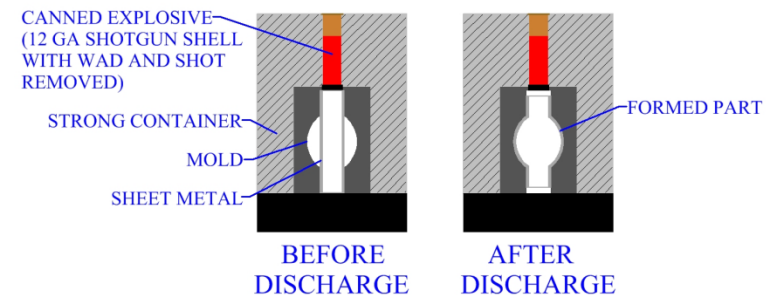
(b)



(d)



CONFINED EXPLOSIVE FORMING



Hladno i toplo deformisanje

- hladna obrada

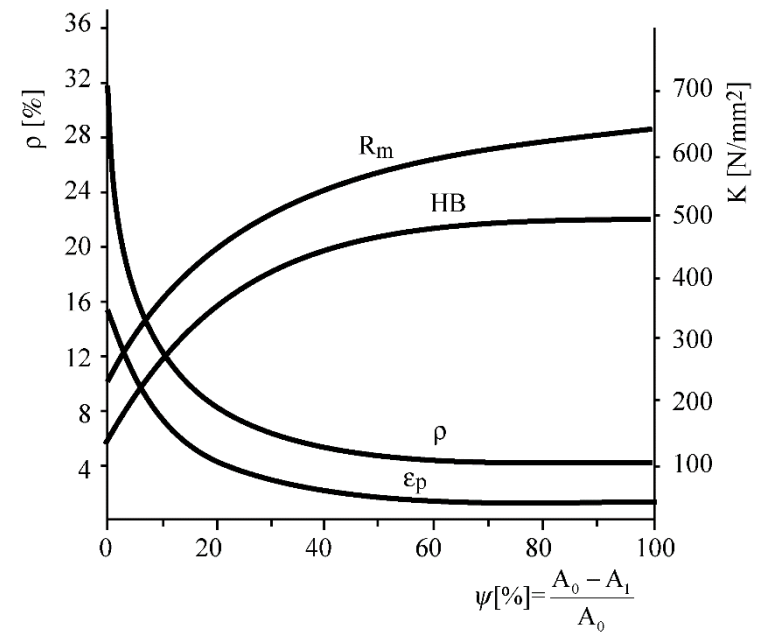
$$(T_{hl} < T_r)$$

- topla obrada

$$(T_{toplo} > T_r \text{ ili } T_{toplo} > 0,65 T_t)$$

- polutopla obrada

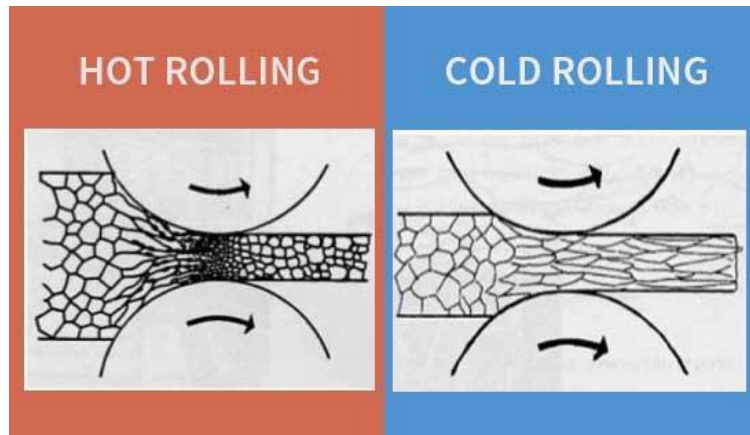
(za čelik 450 i 700°C)



	Tr [C]		Tr [C]
volftam	1200°C	aluminijum	150°C
gvožđe	450°C	kalaj	ispod 0°C
mesing	270°C	olovo	ispod 0°C

Hladno i toplo deformisanje

Criteria	Hot	Warm	Cold
Weight of the Workpiece	<60 kg	<10 kg	<2 kg
Steel Grade	Any	C desirable Other alloying elements < 10 %	Low alloyed steels (C<0.45%, other <3%)
Shape	Any without undercut	Rotationally-symmetrical without undercut	Rotationally-symmetrical without undercut
Normally achievable surface quality R	100 µm	50 µm	10 µm
Intermediate Treatments	Not necessary	Normally no surface treatment	Annealing and phosphating
Deformation Pressure	Low	Medium	High
Energy Costs	High	Medium	Low
Tolerances	Generous	Close	Closest
Tooling costs	Lowest	High	High
Tool life (pieces)	5 000 – 10 000	10 000 -20 000	20 000 – 50 000



PHYSICAL CHARACTERISTICS

HOT FINISH

- Scaled or uneven surface
- Somewhat rounded edges/corners
- Noticeable distortions or warping

COLD FINISH

- Finished, smooth (often oily) surface
- Distinct edges/corners
- Consistent uniformity throughout

Cold, Warm, & Hot Forging



COLD



WARM



HOT

ADVANTAGES

- precision process (tight tolerances)
- improved part strength
- better surface finish
- material conservation

- combines advantages of cold & hot forging
- better formability
- lower forming pressures
- higher deformation ratio
- no annealing required

- can forge complex shapes
- good formability
- low forming pressures
- can forge parts of higher weight and volume

DISADVANTAGES

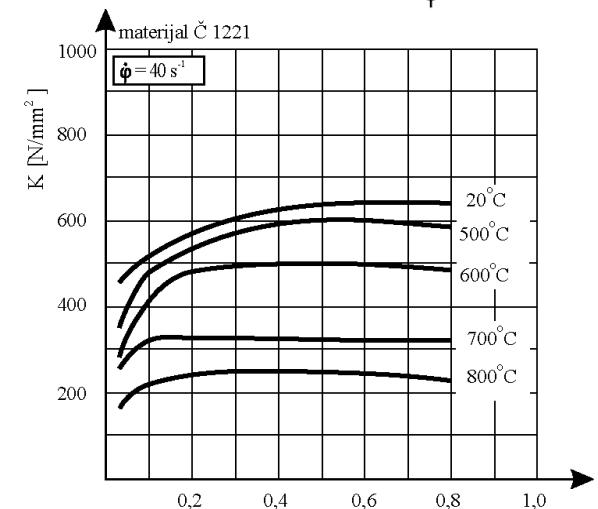
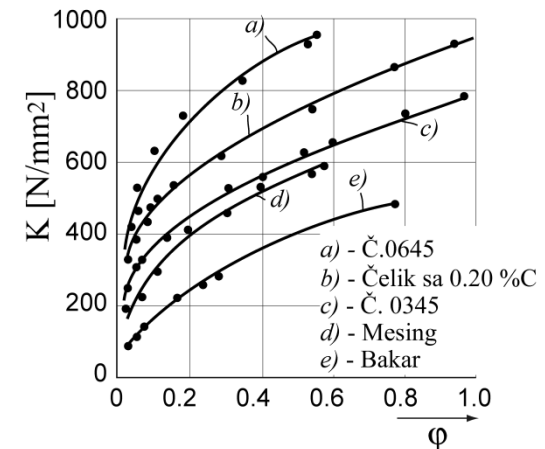
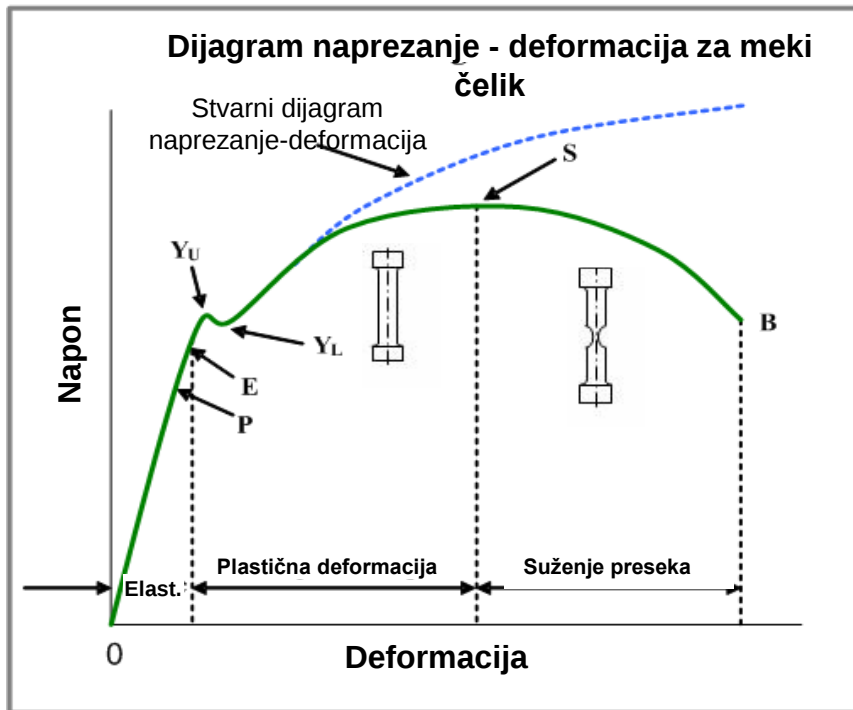
- high forming pressures
- several pre-forming steps needed
- annealing steps may be required during process
- low formability

- high tooling costs
- tooling must withstand forming pressures as well as high temperatures

- formation of scale
- decreased accuracy (larger tolerances)

Krive tečenja

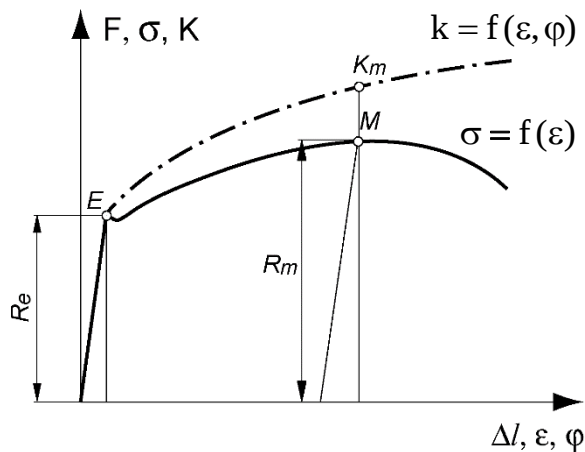
- Napon tečenja (**K**) predstavlja vrednost normalnog napona u trenutku pojave plastične deformacije.
- Kriva tečenja predstavlja funkcionalnu zavisnost napona tečenja (**K**) i stepena logaritamske deformacije (**ϕ**). Kriva tečenja zavisi od:
 - vrste materijala
 - polazne strukture
 - temperature obrade
 - brzine deformacije.



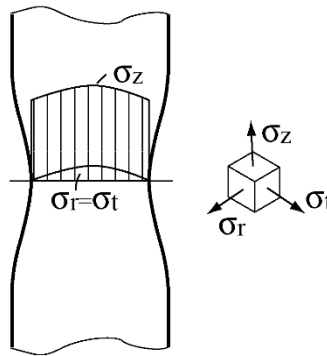
Metode određivanja krive tečenja

1. ispitivanje zatezanjem
2. ispitivanje na pritisak (sabijanje)
3. ispitivanje torzijom itd

Ispitivanje zatezanjem



$$\varphi_r = \varphi_m = \ln \frac{l_m}{l_0} = \varphi_e < 0,3$$



Nominalni napon

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$R_e = \frac{F_E}{A_0} ; \quad R_m = \frac{F_M}{A_0}$$

Stvarni napon

$$K = \frac{F}{A} = \sigma_e$$

$$K = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \frac{A_0}{A_0} = \sigma \frac{A_0}{A}$$

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}$$

$$\epsilon = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$K = \sigma(1 + \epsilon)$$

Metode određivanja krive tečenja - nastavak

Analitičko određivanje krive tečenja

$$K = C \cdot \varphi_e^n$$

C, n – konstante koje zavise od materijala

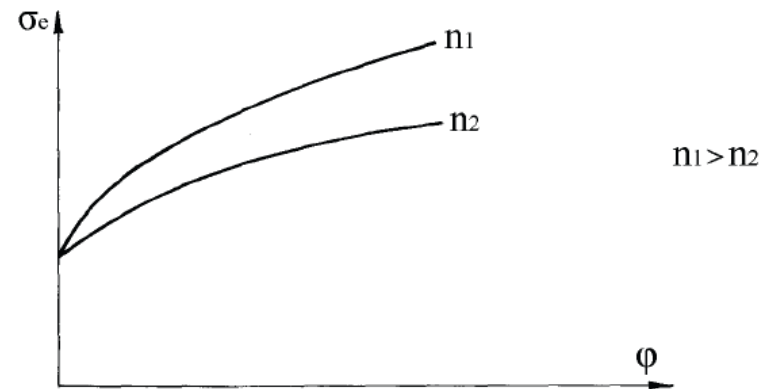
$$K = K_0 + C \cdot \varphi_e^n$$

$$K_0 = R_e$$

Konstanta - **C**

$$K_m = C \cdot \varphi_{em}^n \Rightarrow C = \frac{K_m}{\varphi_{em}^n}$$

Eksponent deformacionog ojačavanja - **n**



$$F = A \cdot K = A \cdot C \cdot \varphi_e^n = C \cdot \varphi_e^n A_0 \cdot e^{-\varphi_e} \quad \left(\varphi_e = \ln \frac{l}{l_0} \wedge l_0 \cdot A_0 = l \cdot A \Rightarrow A = A_0 \cdot e^{-\varphi_e} \right)$$

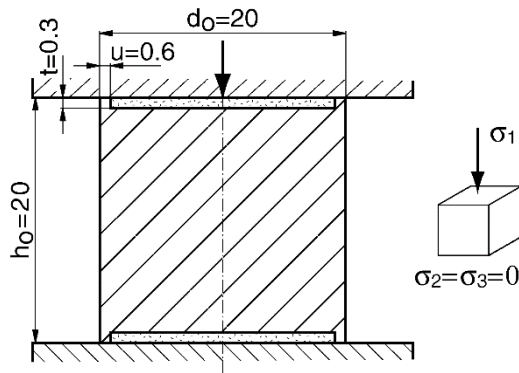
$$\frac{dF}{d\varphi_e} = C \cdot A_0 \left(n \cdot \varphi_e^{n-1} \cdot e^{-\varphi_e} - \varphi_e^n e^{-\varphi_e} \right)$$

$$\text{za } \varphi_e = \varphi_m \Rightarrow \frac{dF}{d\varphi_e} = 0$$

$$n \cdot \varphi_{em}^{n-1} - \varphi_{em}^n = 0 \Rightarrow n = \varphi_{em} = \varphi_r$$

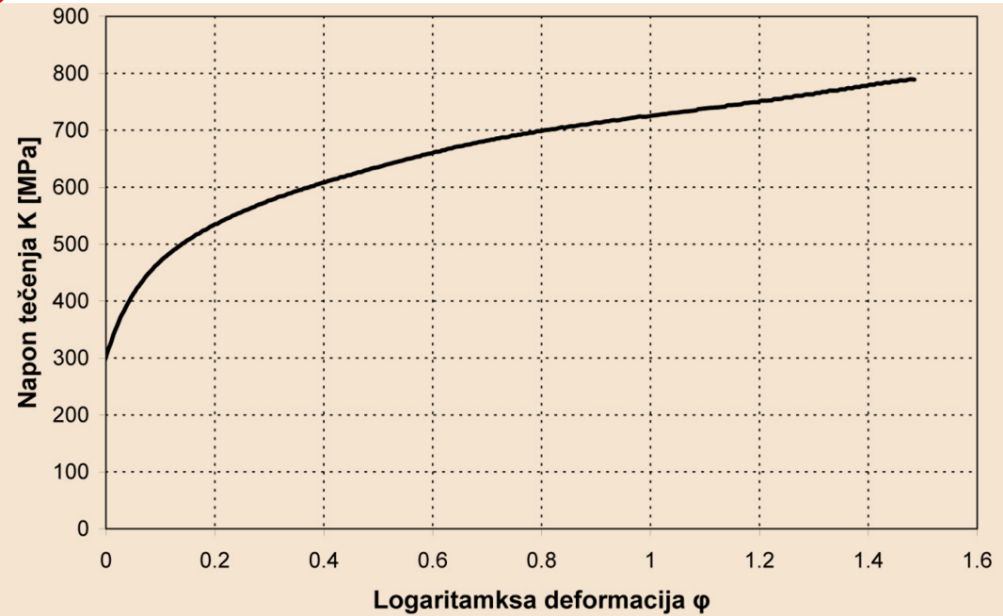
Metode određivanja krive tečenja - nastavak

Određivanje krive tečenja jednoosnim sabijanjem – metoda Rastegajeva ($\varphi > 1$)



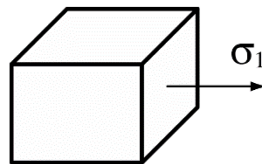
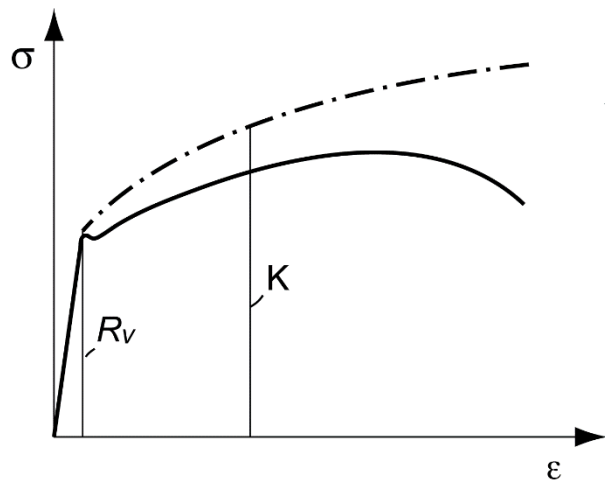
$$\sigma_1 = K = \frac{F}{A}$$

$$|\varphi_n| = \varphi_e = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{A}{A_0}$$



Uslov plastičnog tečenja

Jednoosno naponsko stanje



$$\sigma_1 = R_V$$

$$\sigma_1 = K$$

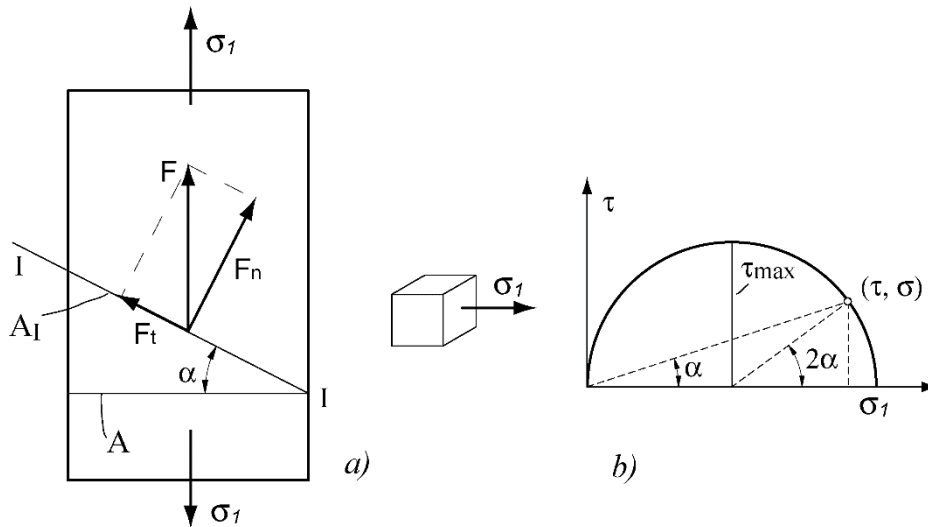
Dvoosno (ravansko), troosno (prostorno) naponsko stanje????

- **Hipoteza maksimalnog tangencijalnog napona**
- **Energetska hipoteza**

Hipoteza maksimalnog tangencijalnog napona (Tresca-in uslov plastičnog tečenja)

Prema ovoj hipotezi, plastično deformisanje nastaje onda kada maksimalni tangencijalni napon ($\tau_{\max.}$) dostigne određenu kritičnu vrednost.

• Jednoosno naponsko stanje



$$\tau = \frac{F_t}{A_I} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{\frac{A}{\cos \alpha}} = \frac{F}{A} \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha$$

$$\alpha = 45^\circ \Rightarrow \tau = \tau_{\max}$$

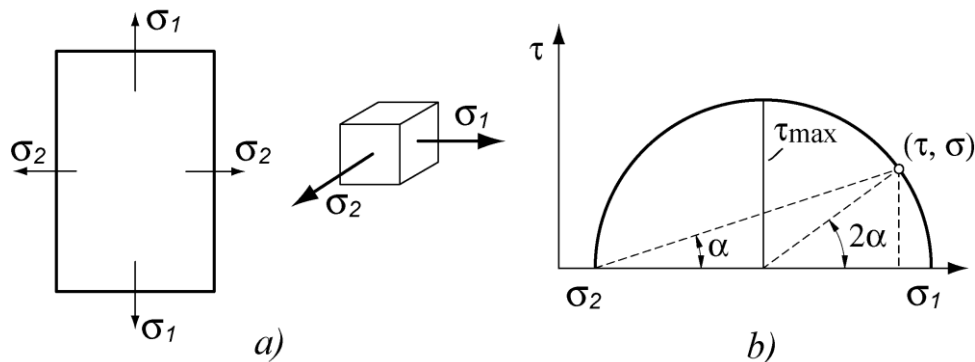
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2}$$

$$\sigma_1 = K$$

$$\tau_{\max} = \frac{K}{2}$$

Hipoteza maksimalnog tangencijalnog napona (Tresca-in uslov plastičnog tečenja)

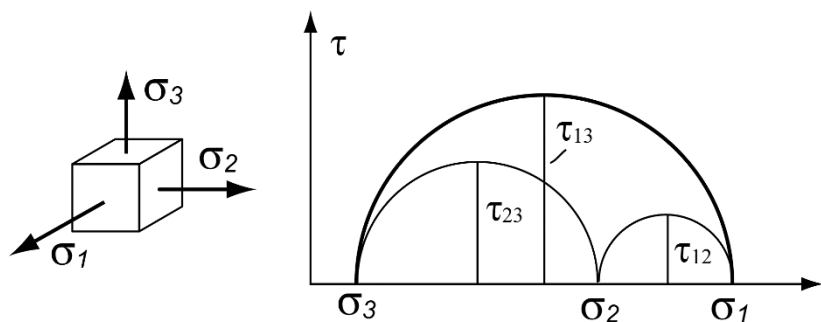
•Dvoosno naponsko stanje



$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \quad \left(\tau_{\max} = \frac{K}{2} \right)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = K$$

•Troosno naponsko stanje



$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = K$$

Energetska hipoteza – Missesov kriterijum

Prema energetske hipotezi, plastična deformacija nastaje kada energija promene oblika bilo kog naponskog stanja dostigne energiju promene oblika jednoosnog naponskog stanja.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2R_e^2 = 2\sigma_e^2 = 2K^2$$

$$\sigma_e = K = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

- Jednoosno naponsko stanje

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_e = \sigma_1 = K$$

- Troosno naponsko stanje

$$\sigma_1 = \sigma_2 \text{ ili } \sigma_2 = \sigma_3$$

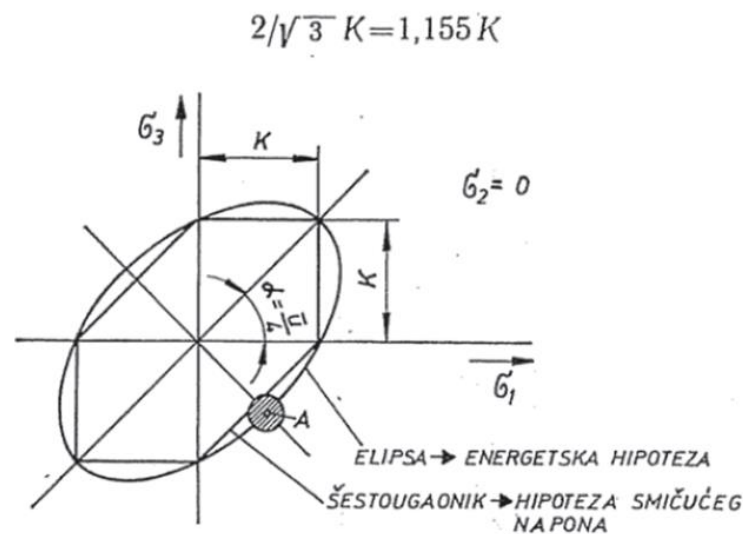
$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (\varepsilon_1 = -\varepsilon_3, \quad \varepsilon_2 = 0)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = K$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} K$$

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta \cdot K$$

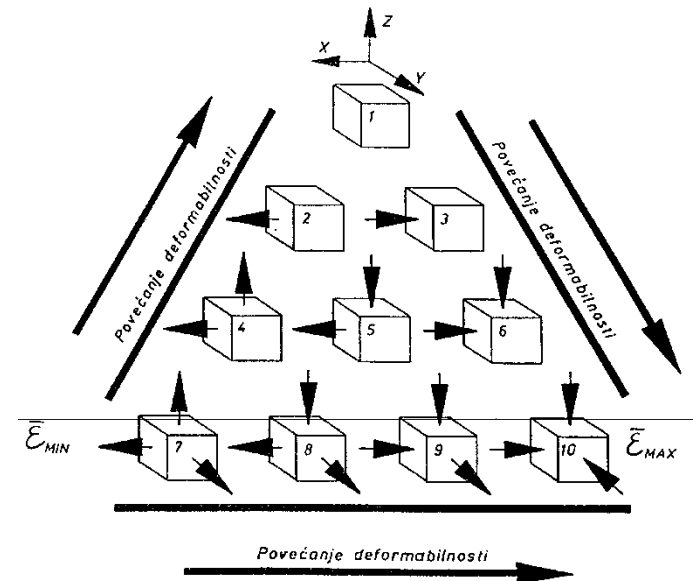
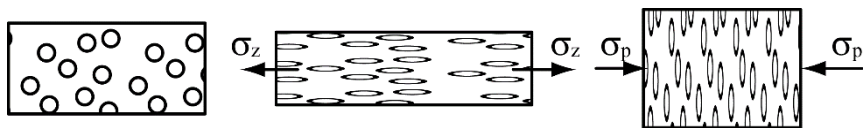
$$1 < \beta < \frac{2}{\sqrt{3}}$$



Deformabilnost materijala

Deformabilnost materijala je osobina materijala da se u određenim uslovima obrade trajno deformiše bez pojave razaranja ili nekog drugog oštećenja strukture.

$$D = f \left(H, S, T, \dot{\phi}, T_{\sigma}, \dots \right)$$



Čelični materijali – s obzirom na deformabilnost dele se na

- Ugljenične čelike – koji mogu biti niskougljenični i čelici s povećanim sadržajem ugljenika. Bolja plastična svojstva imaju niskougljenični čelici.
- Legirane čelike – koji se s obzirom na deformabilnost mogu podeliti u dve grupe:
 1. čelici legirani sa Si, Ni, Co, Cu, Al i Mn koji stvaraju čvrst rastvor u feritnoj osnovi, povećavaju deformacioni otpor ali bitnije ne umanjuju deformabilnost materijala
 2. čelici legirani elementima koji stvaraju karbide: Mn→Cr→W→Mo→V→Ti i C

Parametri plastičnosti

Odnos granice razvlačenja i čvrstoće

$$a_{\sigma} = \frac{R_e}{R_m} \leq 1$$

Eksponent deformacionog *ojačavanja* ($n = \varphi_r$)

Kontrakcija preseka pri ispitivanju na zatezanje ψ

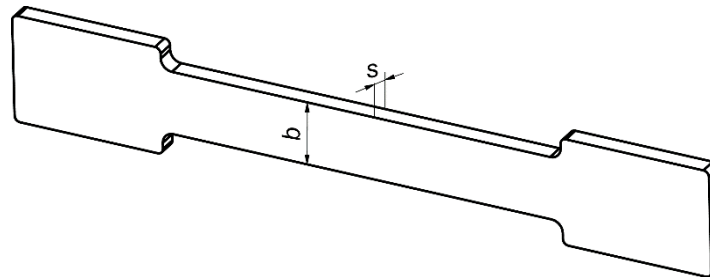
$\psi > 60\%$ – materijal ima visoka plastična svojstva

$\psi = 50\text{--}60\%$ – dobra plastična svojstva

$\psi < 50\%$ – niska plastičnost materijala

Koeficijent normalne anizotropije ili r faktor

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \gtrless 1$$

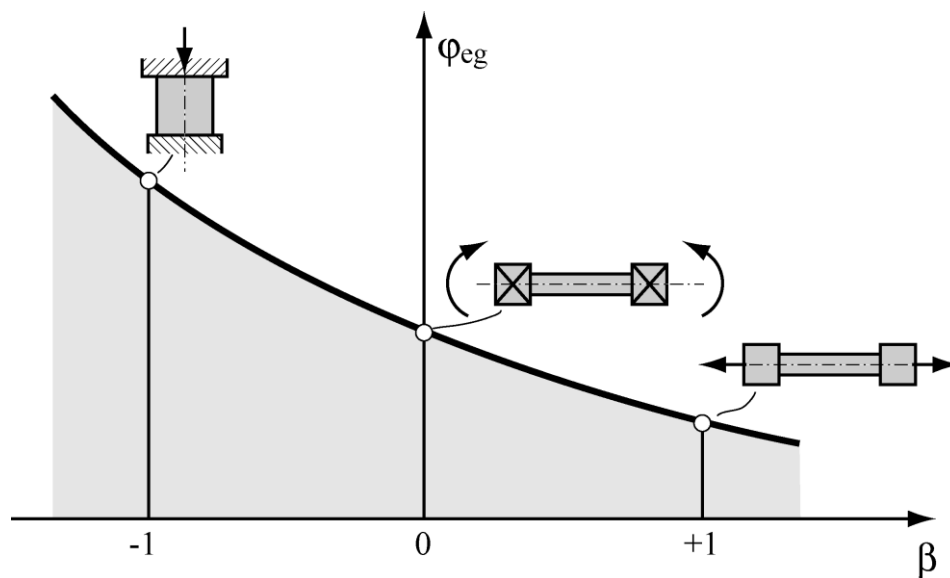


Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju

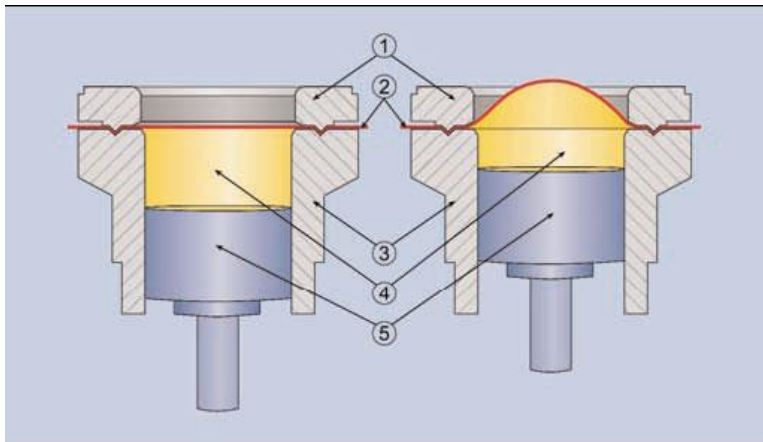
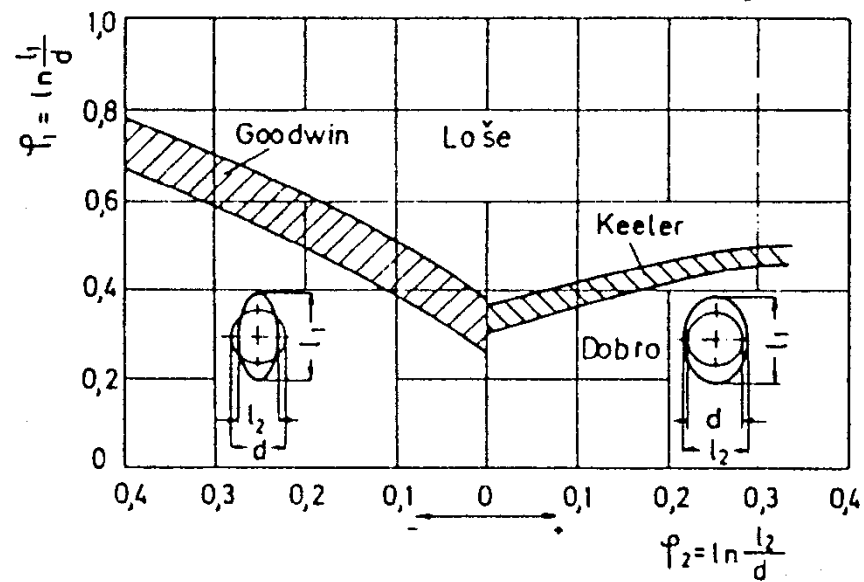
$$\varphi_{eg} = f(T_\sigma) = f(\beta)$$

$$\beta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{3\sigma_{sr}}{\sigma_e}$$

Pokazatelj naponskog stanja



Deformabilnost u obradi lima

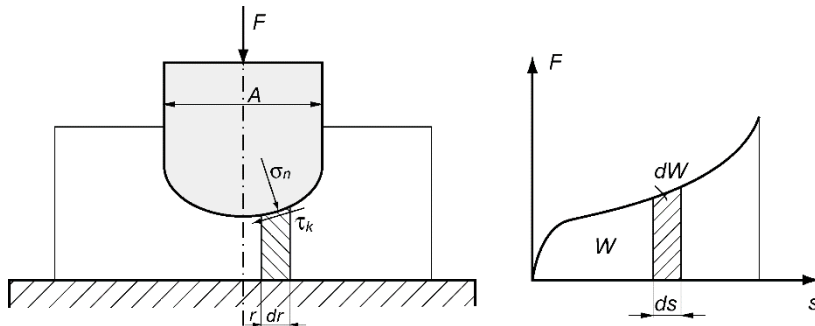


Parametri procesa

Osnovni parametri procesa u tehnologiji plastičnog deformisanja su:

1. *deformaciona sila*
2. *deformacioni rad*
3. *srednji površinski pritisak*

Deformaciona sila



$$F = \iint_A \sigma_n dA + \iint_A \tau_k dA$$

Srednji površinski pritisak

$$p = \frac{F}{A}$$

Deformacioni rad

$$W = \int F \cdot ds$$

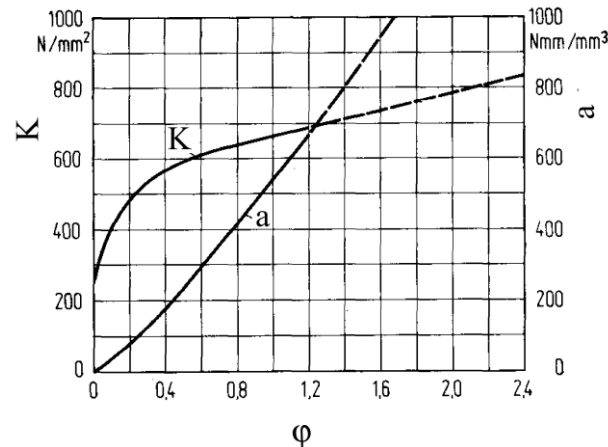
Idealna def. sila i def. rad ($\mu=0$)

$$F_i = K \cdot A; \quad W_i = \int F_i \cdot ds = \int K \cdot A \cdot dh$$

$$V = A \cdot h$$

$$W_i = \int K \cdot \frac{V}{h} \cdot dh = V \int K \frac{dh}{h} = \int_0^{\phi_1} K \cdot d\phi = V \cdot a$$

$$a = \int_0^{\phi_1} K \cdot d\phi \quad \left[\frac{\text{Nmm}}{\text{mm}^3} \right]$$



$$\eta = \frac{W_i}{W} < 1$$

$$\eta = 0,2 \div 0,95.$$

Kontaktno trenje

Kontaktno trenje predstavlja otpor relativnom kretanju dva tela u kontaktu između kojih deluje normalni napon.

Na veličinu kontaktnog trenja u TPD utiču:

a)Vrsta procesa: svaka vrsta obrade okarakterisana je određenim naponskim stanjem i veličinom kontaktne površine, a ti parametri utiču na veličinu trenja.

b)Vrsta materijala alata i obratka: uticaj vrste materijala je posebno izražen u slučaju deformisanja bez podmazivanja. Tada može doći do direktnog kontakta materijala alata i obratka i do međusobnog hladnog zavarivanja. Različiti materijali pokazuju različite tendencije ka hladnom zavarivanju.

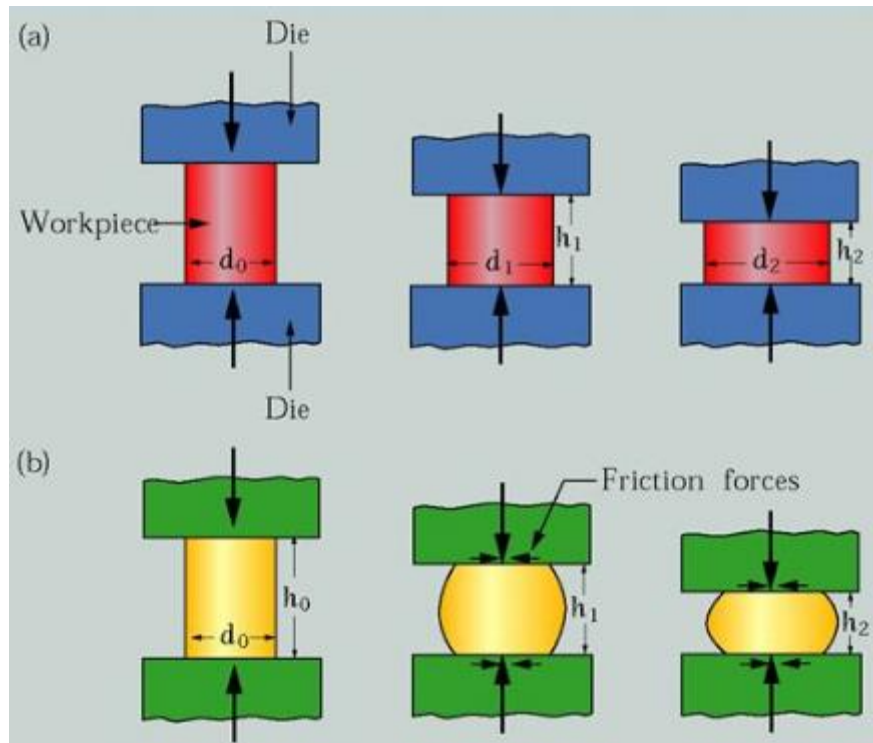
c)Temperatura obrade: povećanjem temperature trenje raste do određenog trenutka da bi nakon toga opadalo. Kod čelika maksimalno trenje pojavljuje se na temperaturi između 450° i 550°C .

d)Brzina deformacije: povećanjem brzine deformacije smanjuje se kontaktno trenje.

e)Podmazivanje: podmazivanjem se veoma značajno utiče na smanjenje veličine trenja.

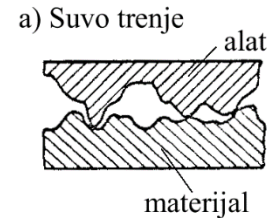
f)Stanje kontaktnih površina alat–materijal: što je površina alata kvalitetnija (manja hrapavost), trenje je manje. Zbog toga se alati za plastično deformisanje često poliraju.

Kontaktno trenje

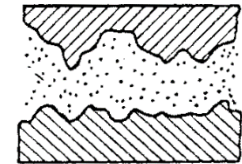


Vrste trenja

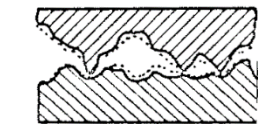
- **Suvo trenje** nastaje kada između dodirnih površina alata i materijala nema podmazivanja, tj. kada postoji direktan metalni kontakt.
- **Hidrodinamičko trenje** nastaje kada su dve kontaktne površine potpuno razdvojene mazivnim slojem. Ova vrsta trenja se ne javlja u obradama plastičnog deformisanja, sem u nekim specijalnim obradama.
- **Granično trenje** nastaje kada između alata i materijala postoji samo tanki sloj (film) maziva koji može – usled velikih lokalnih kontaktnih pritisaka – biti i prekinut, što dovodi do hladnog zavarivanja.
- **Mešovito trenje** je najčešći slučaj u praksi plastičnog deformisanja. To je trenje s elementima i graničnog i hidrodinamičkog trenja.



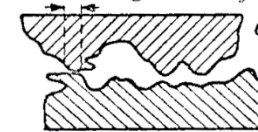
b) Hidrodinamičko trenje



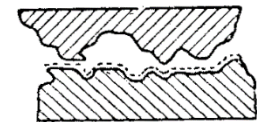
c) Granično trenje



zona hladnog zavarivanja



d) Mešovito trenje



Sredstva za podmazivanje

Osnovni zadatak maziva je da razdvoji površine alata i materijala tokom procesa deformisanja.

Osnovne vrste maziva za obradu deformisanjem:

- ulja (mineralna i organska)
- emulzije (npr. ulje rastvoreno u vodi u određenoj razmeri)
- čvrsta mazivna sredstva (razne vrste prašaka, grafit, molibden, olovni cink sulfidi, sapuni i polimeri)

Glavne karakteristike (zahtevi) maziva

- ☐ da je otporno na velike pritiske
- ☐ da dobro odvodi toplotu i hladi alate
- ☐ da ima dobru postojanost (toplotnu, hemijsku, korozivnu)

Mazivo mora ispunjavati i ekološke uslove:

- da se lako odstranjuje s površine posle deformisanja
- da je neškodljivo po zdravlje

Kvantitativno iskazivanje veličine trenja

- koeficijent trenja (μ)
- faktor trenja (m)

Postoje tri modela izražavanja tangencijalnog napona koji nastaje usled trenja:

a) $\tau_k = \mu \sigma_n$

b) $\tau_k = \mu \cdot K$

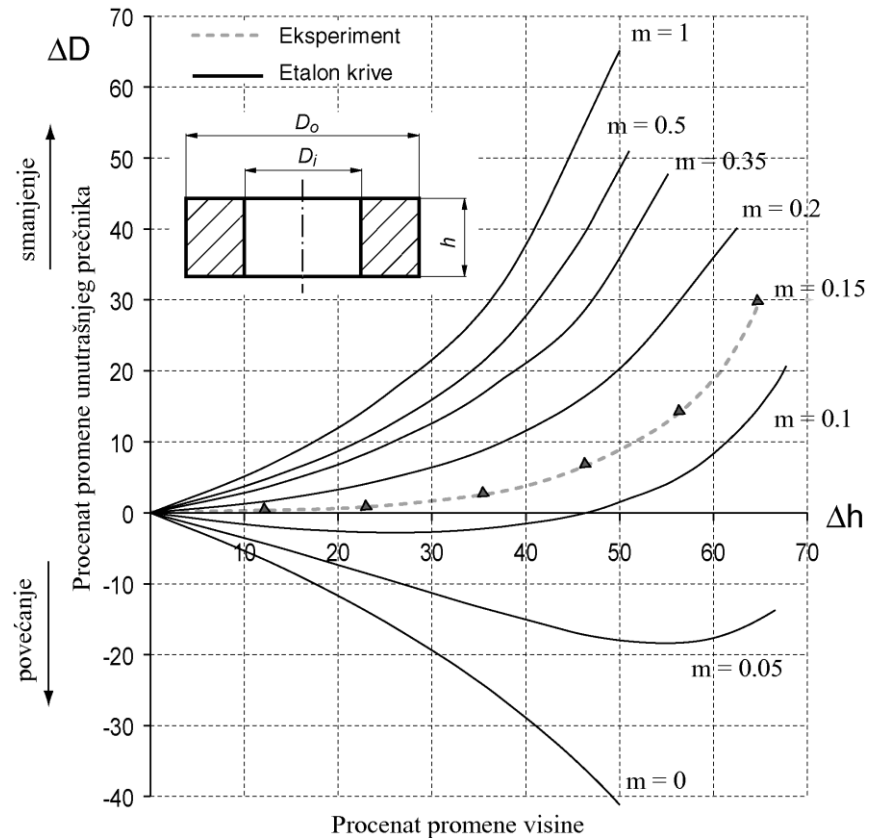
c) $\tau_k = m \tau_{\max} \quad 0 < m < 1 \quad 0 < \tau_k < \tau_{\max}$

$$\tau_k = m \tau_{\max} = m \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = m \frac{K}{2} \beta = \mu \cdot K \Rightarrow \mu = m \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{2} = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

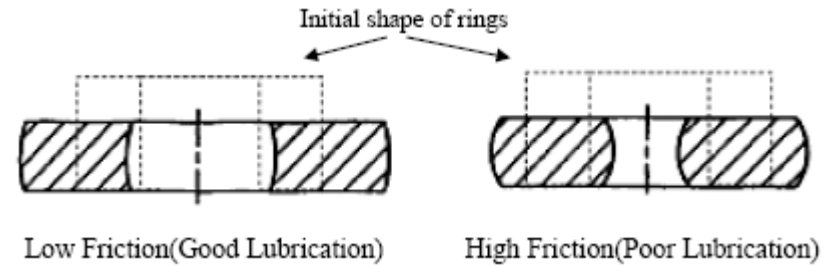
$$\mu_{\max} = \frac{m_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

- topla obrada $\mu = 0,4-0,5$
- hladna obrada bez podmazivanja $\mu = 0,2-0,3$
- hladna obrada sa podmazivanjem $\mu = 0,08-0,15$

Sabijanje prestena - Ring test



$$D_o : D_i : h = 6 : 3 : 2$$



Reduction
in height [%]

7.2%

22.2%

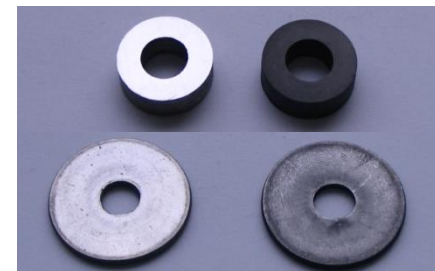
40.0%

Decrease
in I.D. [%]

-1.48%

-2.96%

-1.85%



$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_{tr}}{h_0}$$

$$\varepsilon_d = \frac{D_0 - d}{D_0}$$