

TPD 2020 - Uvod, naponi, deformacije

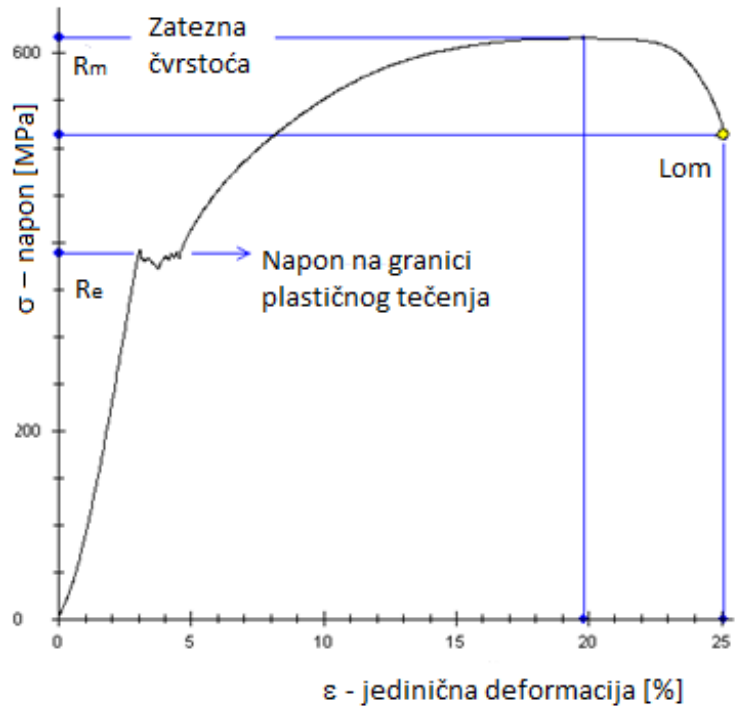
Tehnologija plastičnog deformisanja (TPD) metala podrazumeva skup metoda ili postupaka kojima se izrađuju poluproizvodi i gotovi delovi plastičnim (trajnim) deformisanjem tj. menjanjem oblika polaznog materijala, pri čemu se masa (zapremina) i celovitost dela ne menjaju.

Metode koje pripadaju TPD-u spadaju u obradu metala bez skidanja strugotine.



Najčešći primer (i najjednostavniji) na kome mogu da se objasne pojmovi elastične i plastične deformacije je jednoosno zatezanje epruvete u testu određivanja zatezne čvrstoće materijala.

U ovom testu određuje se i dijagram zatezanja koji ima nekoliko karakterističnih zona.

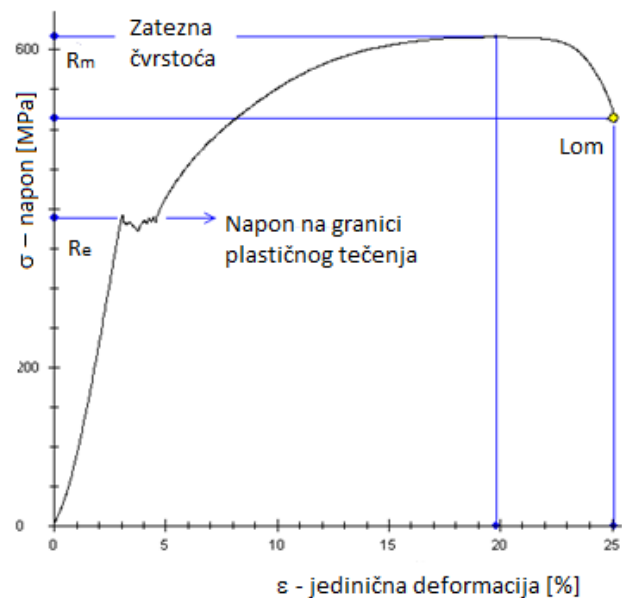
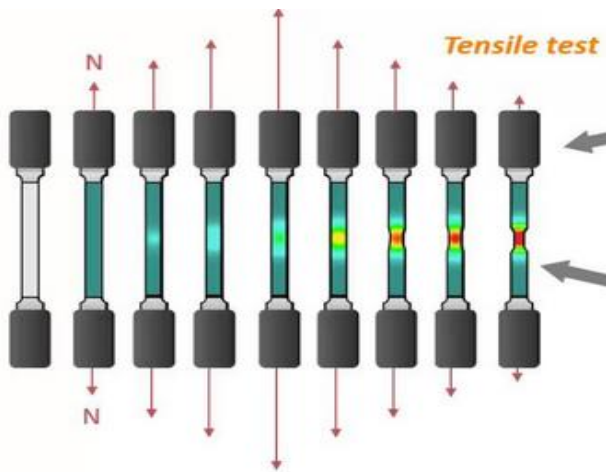


Dijagram zatezanja predstavlja zavisnost sile zatezanja F od izduženja Δl i snima se u toku ispitivanja na mašini za ispitivanje zatezanjem - kidalici.

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

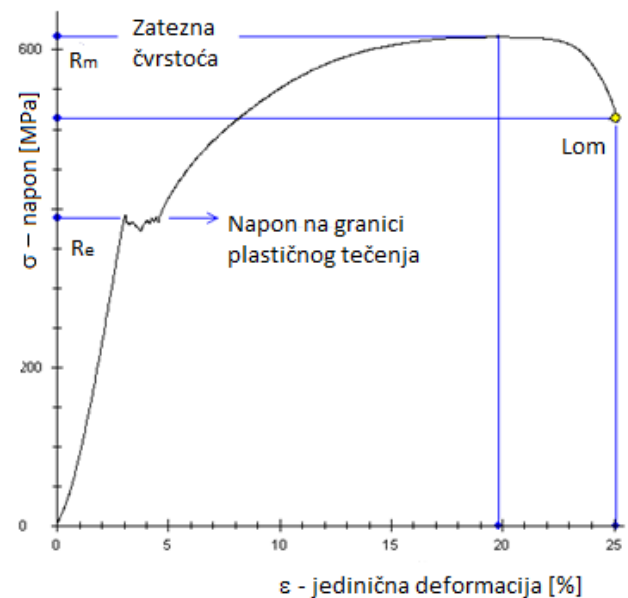
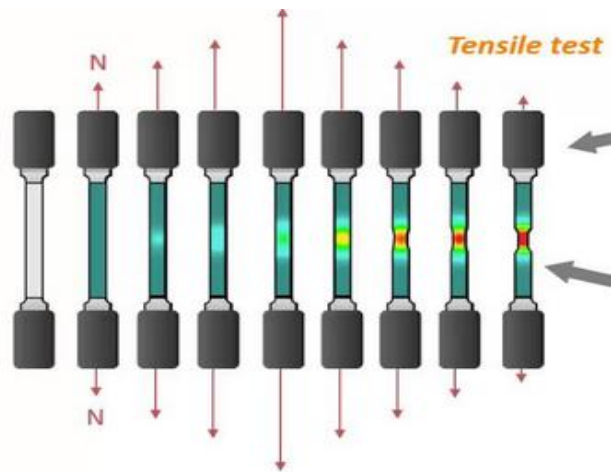
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Kada se epruveta postavi u kidalicu i počne proces zatezanja, u epruveti se prvo javljaju elastične deformacije i to traje sve dok napon ne dostigne vrednost napona na granici plastičnog tečenja R_e . To znači da do tog trenutka dolazi do izduženja epruvete koje nije trajno, odnosno, ako se epruveta izvadi iz kidalice pre nego što se postigne napon R_e dimenzije epruvete bi bile kao na početku procesa zatezanja.



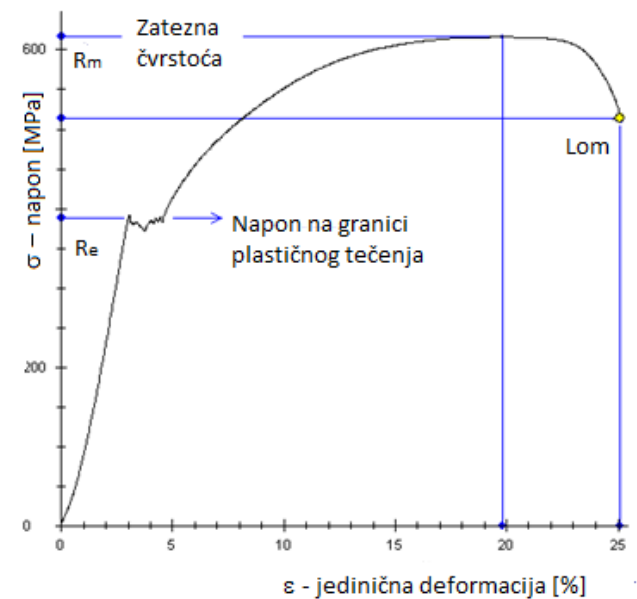
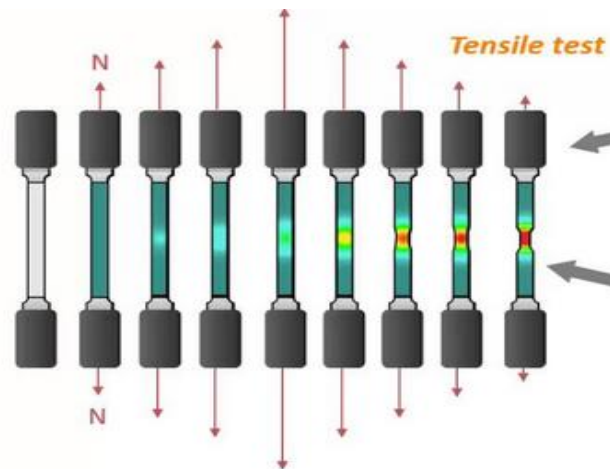
Na početku procesa, postoji linearna zavisnost između napona i deformacija.

Kada se pređe vrednost napona R_e deformacija epruvete je trajna, dužina epruvete se trajno povećava, a veličina popečnog preseka smanjuje, sve dok se ne postigne napon R_m . Naponi koji imaju vrednost između R_e i R_m dovode do trajnog ravnornog deformisanja epruvete. To znači da se dužina ravnornerno povećava, a veličina poprečnog preseka ravnornerno smanjuje.



Kada se postigne napon R_m deformacija epruvete više nije ravnomerna, već se lokalizuje na relativno malu dužinu oko mesta budućeg prekida, stvara se vrat na epruveti, na tom mestu dolazi do intenzivnog deformisanja, dok se ostatak epruvete kreće kao kruto telo. Ubrzo nakon formiranja vrata, dolazi do loma epruvete.

Dok se ne postigne napon R_m u materijalu vlada jednoosno naponsko stanje, dok je deformaciono stanje troosno. U metodama tehnologije plastičnog deformisanja naponska stanja su obično složenija.

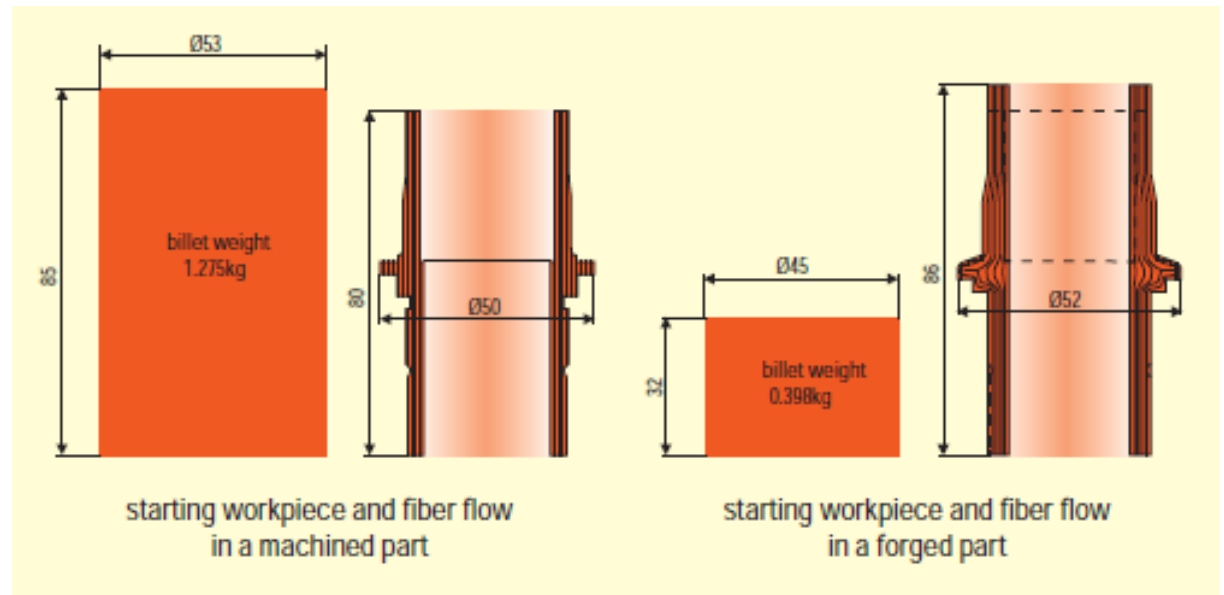


Karakteristike TPD - prednosti

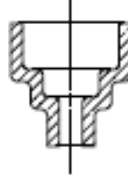

- Visok stepen iskorišćenja materijala

Ušteda materijala primenom metoda plastičnog deformisanja ilustrovana je primerom na kome je prikazana izrada istog dela pomoću metoda skidanja strugotine i metoda deformisanja.

Pripremak je u slučaju izrade dela deformisanjem 3,2 puta lakši od priprema izrađenog struganjem. Manja količina polaznog materijala utiče i na smanjenje cene gotovog dela.



- **Relativno brza izrada delova**, odnosno kraće vreme obrade u poređenju sa drugim tehnologijama

Skica obratka	Težina gotovog dela (N)	Težina pripremljena (N)		Materijal pretvoren u strugotinu		Ušteda materijala pri obradi hladnim deformis.		Glavno vreme izrade (s)	
		skidanje strugotine	hladno deformisanje	(N)	%	(N)	%	skidanje strugotine	hladno deformisanje
 <p>Kapa ležaja</p>	0,9	8,54	1,08	7,61	89	7,45	87	114	16
 <p>Glavčina točka</p>	1,07	9,12	1,22	8,06	88	765	82	186	24

Vreme izrade i utrošak materijala – komparacija dve metode obrade

-Visoke mehaničke osobine proizvedenih delova

- Niža cena izrade (u slučaju velikih serija)

Za najveći broj metoda alati su skupi i primena metode je isplativa samo u slučaju velikoserijske i masovne proizvodnje.

- Visoka tačnost i kvalitet obrađenih površina (kod hladnog deformisanja)

- Relativno nizak utrošak energije

Karakteristike TPD - ograničenja

- Primena najvećeg broja metoda je ekonomski opravdana u slučaju serijske i masovne proizvodnje,
- Ne mogu se svi materijali obrađivati metodama TPD,
- Kod nekih metoda postoji ograničenje u veličini dela s obzirom na dozvoljeno opterećenje alata,
- U procesu se često javljaju velike sile i pritisci, što iziskuje potrebu za robusnim alatima i mašinama velike snage.

Postoji više kriterijuma za klasifikaciju metoda TPD-a

1. Prema području primene proizvoda koji se dobija tehnologijom plastičnog deformisanja

-Primarna TPD

-Sekundana TPD

2. Prema naponskom stanju koje vlada u zoni deformisanja

-Zapreminska obrada,

-Obrada lima,

- Obrada razdvajanjem

3. Prema temperaturi obrade TPD se deli na:

- Hladnu obradu
- Toplu obradu
- Polutoplu obradu

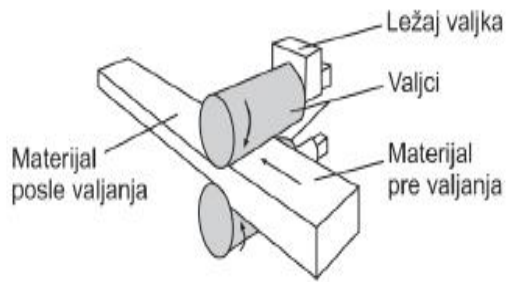
Prema nameni gotovog proizvoda TPD se može podeliti na

1. Primarnu TPD (proizvodnja polufabrikata) i
2. Sekundarnu TPD

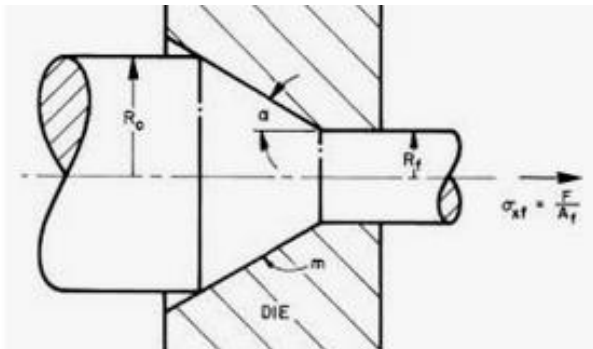
Metode primarne TPD primenjuju se za izradu polufabrikata kao što su šipke, žice, profili, lim. Ovoj grupi pripadaju metode kao što su vučenje, valjanje, istiskivanje i najčešće se primenjuju u metalurškim pogonima.

Primarna TPD

Valjanje

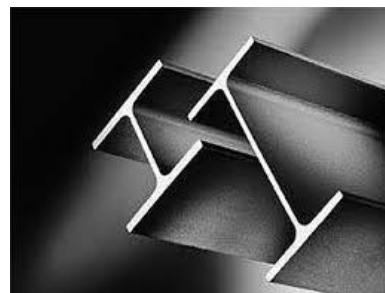
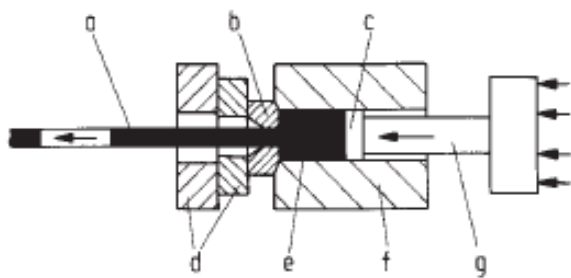


Vučenje



Primarna TPD

Istiskivanje



Sekundarna TPD

Najveći broj metoda TPD pripada ovoj grupi. Metodama sekundarne obrade proizvode se delovi koji su ugradbeno gotovi ili se dalje obrađuju nekom drugom proizvodnom tehnologijom (najčešće obradom skidanjem strugotine).



Zapreminsko deformisanje i deformisanje lima

Kod ove grupe metoda naponi u zoni obrade moraju biti veći od napona na granici plastičnog tečenja kako bi se ostvarila plastična (trajna) deformacija materijala (menjaju se oblik i dimenzije početnog materijala, priprema).

Razdvojno deformisanje

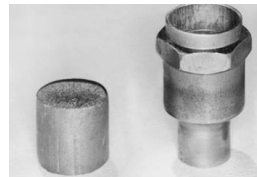
Kod ove grupe metoda naponi u zoni obrade moraju biti veći od smičuće čvrstoće materijala kako bi došlo do razdvajanja zapremine obratka od zapremine ostatka materijala.

Podela metoda TPD-a u zavisnosti naponskog stanja koje vlada u zoni deformisanja

- Obrada lima (preovladavaju dvoosna naponska stanja)



- Zapreminska obrada (preovladavaju troosna naponska stanja)



- Razdvojno deformisanje (naponi u zoni deformisanja moraju da budu veći od smičuće čvrstće materijala, odnosno potrebno je da se jedan deo zapremine početnog materijala odvoji od ostatka)



Prema temperaturi obrade TPD se deli na:

- Hladnu obradu
- Toplu obradu
- Polutoplu obradu

Hladna obrada

Metode koje spadaju u ovu grupu odvijaju se bez zagrevanja priprema, na temperaturi od oko 20°C.

Za najveći broj metalnih materijala može se reći da su to metode kod kojih

nije potrebno prethodno zagrevanje priprema.

Kod obrade hladnim deformisanjem dolazi do promene u kristalnoj strukturi metala što dovodi do promene mehaničkih osobina odnosno do **deformacionog ojačavanja materijala**.

Kao posledica deformacionog ojačavanja čvrstoća i tvrdoća materijala rastu, dok žilavost i plastična svojstva opadaju. S obzirom da nema zagrevanja materijala postižu se visoka tačnost i kvalitet obrađenih površina.

Topla obrada

Metode koje spadaju u ovu grupu izvode se iznad temperature rekristalizacije, što znači da se uporedo sa procesom deformisanja odvija i proces rekristalizacije.

Zbog toga je deformacioni otpor materijala znatno niži, povećana je plastičnost materijala, ali zbog zagrevanja na relativno visoke temperature kvalitet površine i tačnost dimenzija su niži u odnosu na metode hladne obrade.

Takođe troškovi proizvodnje rastu zbog troškova zagrevanja.

Rekristalizacionim žarenjem se deformisana struktura transformiše u nedeformisanu strukturu, temperatura rekristalizacionog žarenja je oko $0,4T_{\text{topljenja}}$ (za čelike iznosi od 550°C do 720°C). Topla obrada se izvodi iznad temperature rekristalizacije (za čelike je to od 950°C do 1250°C).

Polutopla obrada

Izvodi na temperaturama između tople i hladne obrade. Za čelične materijale te temperature iznose između 650°C i 900°C Temperatura je povišena u odnosu na hladnu obradu kako bi se u određenoj meri smanjio efekat deformacionog ojačavanja, a sa druge strane temperatura niža od temperature tople obrade nema u velikoj meri negativan uticaj na tačnost i kvalitet dobijenih delova.

Teorijske osnove tehnologije plastičnog deformisanja

Plastična deformacija materijala odvija se pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja koje izaziva pojavu unutrašnjih napona i promenu oblika polaznog materijala, odnosno trajne deformacije.

Deformacija po zapremini obratka obično nije homogena, tj. stepen deformacije u pojedinim tačkama može biti veoma različit, što zavisi od vrste tehnološke operacije, geometrijskih faktora alata i priprema, kontaktnog trenja itd.

Pri obradi deformisanjem ne smeju se prekoračiti vrednosti graničnih iznosa deformacije i napona, jer se u protivnom može razoriti materijal ili slomiti alat.

Zbog toga se za svaku tehnološku metodu izvodi proračun komponenti napona i deformacija, zatim proračun ukupnog opterećenja (deformacione sile) i deformacionog rada. Ovi parametri potrebni su za pravilno dimenzionisanje elemenata alata i izbor odgovarajućih mašina.

Pretpostavke u TPD

1. Hipoteza o homogenosti elastično-plastičnog tela

Prema ovoj hipotezi materijal obratka je homogen. Zapravo, struktura metala je diskretna, tj. sastoji se iz kristala.

2. Hipoteza o prirodnom naponskom stanju

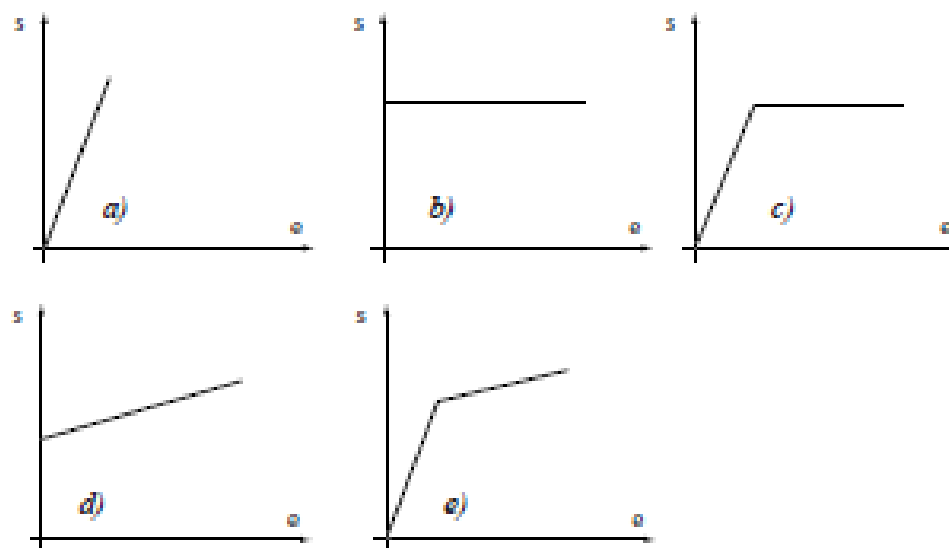
Prema ovoj hipotezi smatra se da pre početka deformisanja u materijalu ne postoje unutrašnji naponi, odnosno smatra se da su unutrašnji naponi, koji su posledica prethodne obrade, međusobno uravnoteženi.

3. Hipoteza o izotropnosti strukture materijala

Realni metalni materijali dobijeni livenjem i primarnim deformisanjem imaju različita fizičko-mehanička svojstva u različitim pravcima. Međutim, mnoge teorijske analize su jednostavnije ako se ta činjenica zanemari i smatra da je struktura materijala izotropna sa homogenim svojstvima u svim pravcima.

4. Hipoteza o idealizaciji elastičnih i plastičnih svojstava

Pod dejstvom opterećenja u materijalu se najpre javljaju elastične a potom i plastične deformacije. Veza između napon i deformacije u području elastičnosti je linearna a u području plastičnosti znatno složenija. Moguće idealizovane varijante te zavisnosti prikazane su na slici.



Slika 2.1 – Idealizacija elastično-plastičnih svojstava materijala

- 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

5. Zanemarivanje elastičnih deformacija – kruta plastičnost

U obradi deformisanjem veličina plastične deformacije je višestruko veća u odnosu na elastičnu deformaciju, što omogućuje da se elastična deformacija zanemari. Pri nekim obradama, kao što je savijanje, elastične deformacije se ne mogu zanemariti.

6. Konstantnost zapremine

Smatra se da se u toku plastičnog deformisanja materijala zapremina obratka ne menja.

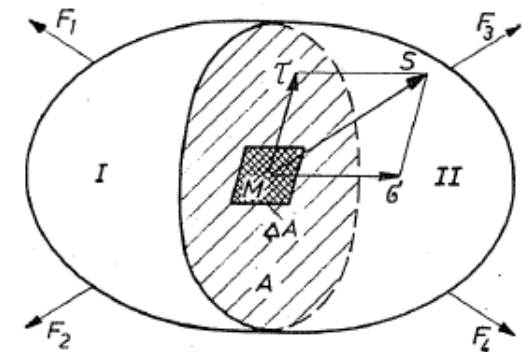
Zapremina obratka (V) jednaka je zapremini pripremljena (V_0)

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

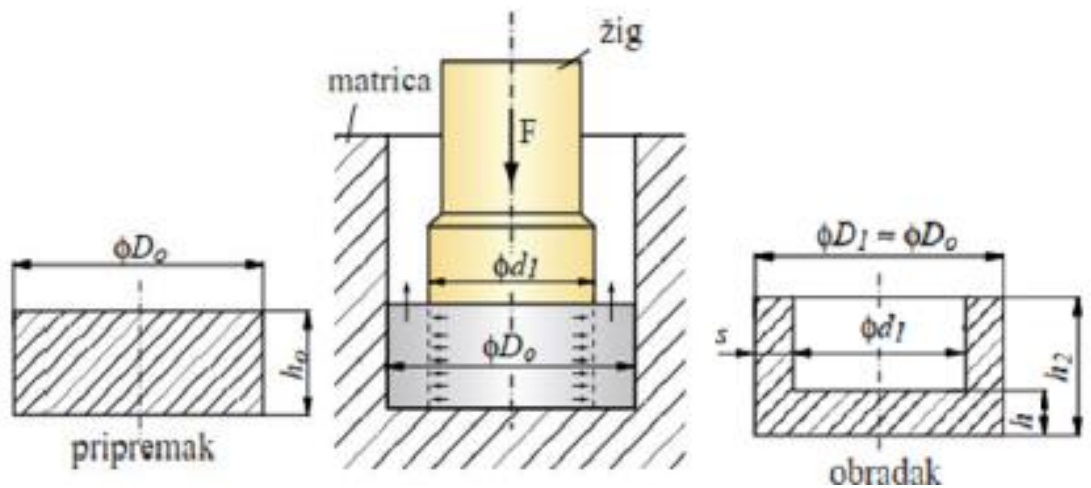
Naponi

Kada na neko telo deluje sistem spoljnih sila onda one u njemu dovode do odgovarajućih unutrašnjih napona. Promena oblika izazvana delovanjem spoljnih sila naziva se deformacija. Pri niskim vrednostima spoljnih sila (i niskim naponima) deformacija je samo elastična; po rasterećenju ta deformacija nestaje, a telo poprima prvobitni oblik. Kada se veličina spoljašnje sile poveća do određene granice dolazi do plastične (trajne) deformacije, a po rasterećenju telo ostaje deformisano.

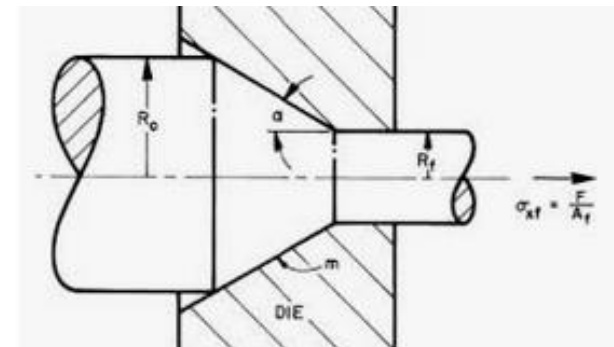
Naponi se mogu razložiti na normalne napone (oni koji su upravni, pod uglom od 90° u odnosu na ravan na koju deluju) i tangencijalne (smičuće) napone koji leže u ravni.



U procesima tehnologije plastičnog deformisanja naponsko stanje u materijalu obratka nije homogeno. Analiza naponskog stanja omogućava određivanje potrebne deformacione sile u procesu. Takođe analiza naponskog stanja može da ukaže na vrednosti napona koje mogu da dovedu do lokalizacije deformacije ili stvaranja pukotina u materijalu.

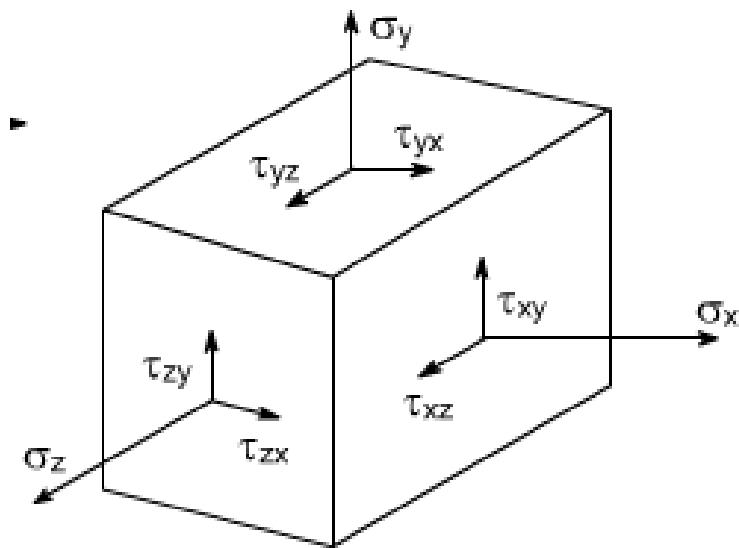


Suprotnosmerno istiskivanje



Vučenje žice

Naponsko stanje u nekoj tački napregnutog tela određeno je tenzorom napona koji ima devet komponenti napona, tri normalne komponente i šest tangencijalnih komponenti.



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

Može se dokazati da su sledeće komponente tangencijalnog napona jednake

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Onda se broj nepoznatih komponenti napona smanjuje na 6.

Tenzor napona sastoji se od dve komponente:

- Sfernog tenzora napona,
- Devijatora tenzora napona.

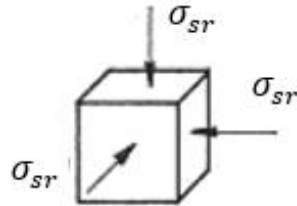
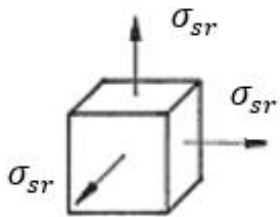
Sferni tenzor napona

$$T_{\sigma}^S = \begin{bmatrix} \sigma_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{sr} \end{bmatrix}$$

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

Komponente sfernog tenzora napona utiču na promenu zapremine, koja se dešava samo u oblasti elastičnih deformacija.

Sferni tenzor napona ne sadrži tangencijalne komponente napona, nego samo komponente normalnog napona koje su međusobno jednake, tako da istim intenzitetom ili pritiskaju ili zatežu materijal. Ovakvo naponsko stanje ne može da dovede do promene oblika materijala.



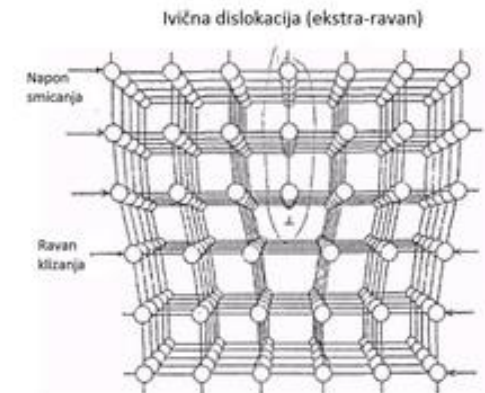
Devijator tenzora napona

Devijator tenzora napona određuje se kao razlika tenzora napona i sfernog tenzora napona. On sadrži i normalne i tangencijalne komponente napona koje dovode do trajne promene oblika dela, odnosno do plastične deformacije.

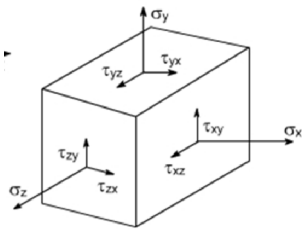
$$D_{\sigma} = T_{\sigma} - T_{\sigma}^S$$

$$D_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{sr} \end{bmatrix}$$

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



Ekvivalentni napon



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

Kod višeosnog naponskog stanja može se odrediti jedna veličina koja predstavlja to složeno naponsko stanje. Ta veličina se naziva ekvivalentni ili efektivni napon i za njeno određivanje koriste se različiti kriterijumi.

Ekvivalentni (efektivni) napon se prema hipotezi najveće deformacione energije utrošene na promenu oblika (Misesovoj hipotezi) za opšte naponsko stanje može odrediti na osnovu sledećeg izraza:

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

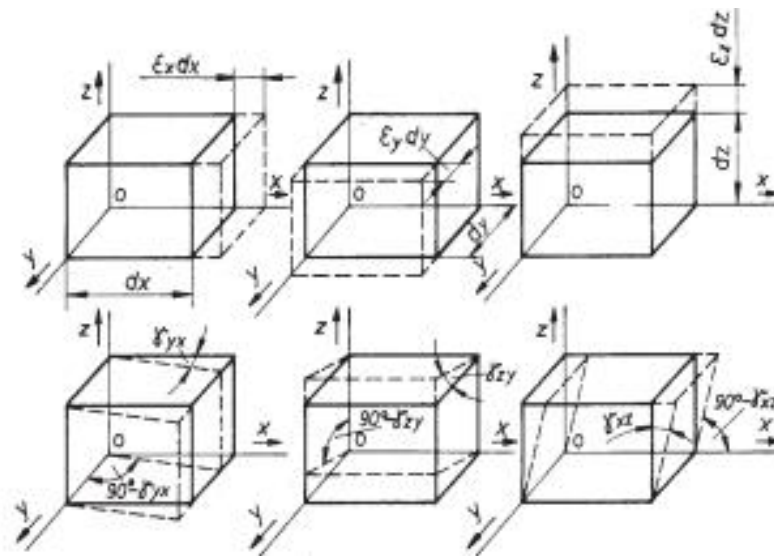
Ako su u pitanju glavni naponi izraz ima sledeći oblik:

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

Deformacije

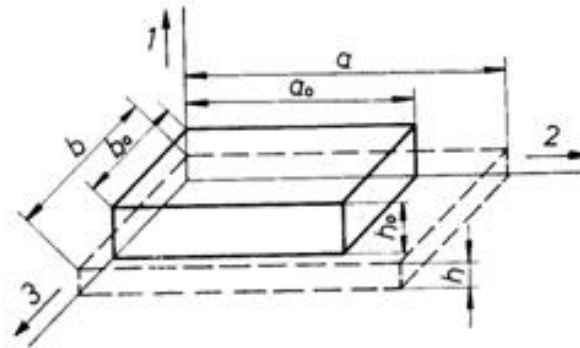
U tehnologiji plastičnog deformisanja deformacije predstavljaju merilo promene oblika i dimenzija tela koje su izazvane delovanjem spoljnih sila.

Deformacije mogu biti linearne i tangencijalne (ugaone).



Postoji više načina izračunavanja ostvarenog stepena deformacije, ali najčešći načini su:

- Relativna (jedinična) deformacija ϵ ,
- Logaritamska deformacija
- Deformacija preseka ψ

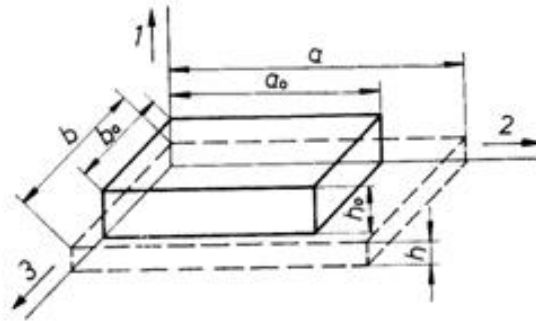


Relativna (jedinična) deformacija ε

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

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

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

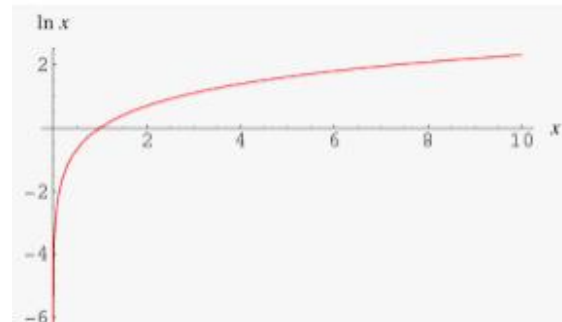


Logaritamska deformacija

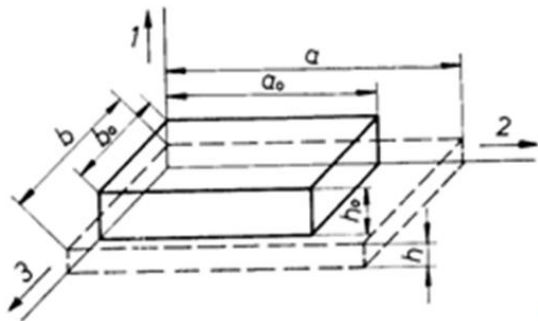
$$\varphi_a = \ln \frac{a}{a_0} > 0$$

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

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



Na osnovu uslova konstantnosti zapremine (pretpostavke da je zapremina početnog dela jednaka zapremini dela nakon deformisanja) može se izvesti izraz koji pokazuje da je zbir deformacija duž glavnih pravaca jednak nuli.



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

$$a_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = a \cdot b \cdot h$$

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

$$\ln\left(\frac{a}{a_0} \cdot \frac{b}{b_0} \cdot \frac{h}{h_0}\right) = \ln 1$$

$$\ln \frac{a}{a_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{h}{h_0} = 0$$

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

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

Kao i kod složenog naponskog stanja, tako se i kod složenog deformacionog stanja može odrediti jedna veličina koja predstavlja to složeno stanje.

Ta veličina se zove ekvivalentna deformacija i za opšte deformaciono stanje može da se izračuna prema sledećem izrazu:

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_x - \varphi_y)^2 + (\varphi_y - \varphi_z)^2 + (\varphi_z - \varphi_x)^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}$$

Kada su u pitanju glavne deformacije izraz ima sledeći oblik:

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2}$$

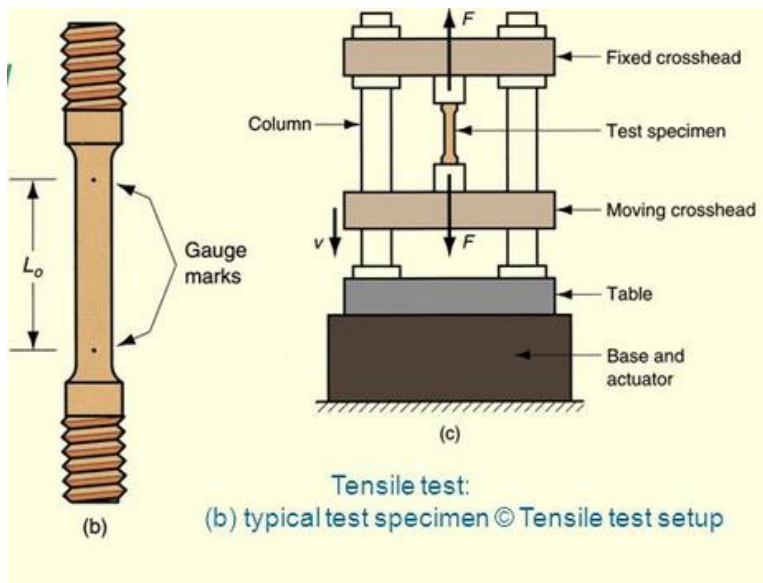
Kod jednoosnog zatezanja cilindrične epruvete (epruvete sa kružnim poprečnim presekom) može se pokazati da je ekvivalentna deformacija jednaka deformaciji dužine epruvete. U ovom slučaju je jednoosno naponsko stanje (zatezno), a troosno deformaciono.

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

$$\varphi_l = \ln \frac{l}{l_0} \quad \varphi_d = \ln \frac{d}{d_0}$$

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2}$$

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_l - \varphi_d)^2 + (\varphi_d - \varphi_d)^2 + (\varphi_d - \varphi_l)^2}$$



$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2}$$

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_d)^2 + (\varphi_d - \varphi_d)^2 + (\varphi_d - \varphi_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2(\varphi_1 - \varphi_d)^2} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_d)^2}$$

Iz uslova konstantnosti zapremine sledi

$$\varphi_1 + \varphi_d + \varphi_d = 0$$

odnosno

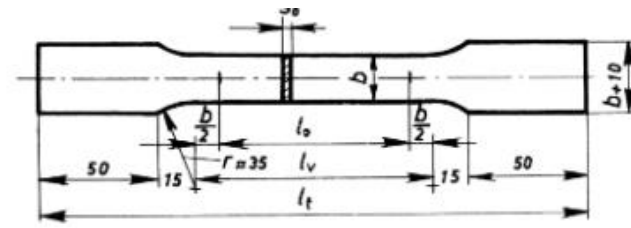
$$\varphi_d = -\frac{\varphi_1}{2}$$



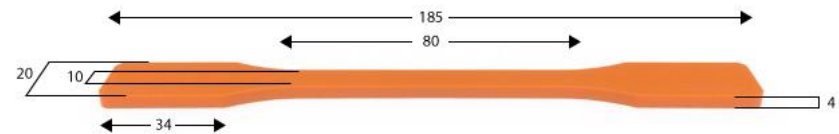
$$\varphi_e = \varphi_1$$



Okrugle epruvete



Epruvete od lima



Brzina deformacije

Brzina deformacije ($\dot{\varphi}$) u obradi deformisanjem je brzina relativnog pomeranja čestica materijala, odnosno izvod deformacije po vremenu.

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

u – brzina deformisanja koja zavisi od mašine na kojoj se obrada izvodi

h – trenutna visina obratka

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

Prema brzini deformacije metode tehnologije plastičnog deformisanja se mogu podeliti u tri grupe:

- Superplastično oblikovanje $\dot{\varphi} \geq 10^{-5} \div 10^{-2} s^{-1}$
- Kvazistatički procesi $\dot{\varphi} \geq 10^{-2} \div 10^2 s^{-1}$
- Visokobrzinska obrada $\dot{\varphi} \geq 10^2 s^{-1}$