

VISOKA POSLOVNO-TEHNIČKA ŠKOLA
STRUKOVNIIH STUDIJA U UŽICU

OBRADA DEFORMISANJEM

Prof. dr Predrag M. Drobnjak dipl.inž.maš.

REŽIM OBRADE DEFORMISANJEM PRI POVEĆANIM TEMPERATURAMA I BRZINAMA DEFORMISANJA

- Metalu je moguće povratiti plastična svojstva zagrevanjem do određene temperature.
- Umesto deformisanih zrna sa kristalnom rešetkom sa defektima, niču novi centri kristalizacije, oko kojih se razvijaju novi kristali.
- Unutrašnja naprezanja i defekti kristalne rešetke, koji su nastali plastičnom deformacijom, sada iščezavaju.
- Takav proces se naziva **rekristalizacija**.

- Temperatura pri kojoj počinju nastajati nova sitnija zrna sa kristalnom rešetkom bez dislokacije, naziva se temperatura rekristalizacije.
- Ova temperatura T_r je različita za razne metale i legure i može se orijentaciono odrediti u zavisnosti od temperature topljenja čistog metala.
- $T_r = 0,4 T_t$
- Legure obično imaju višu T_r od čistih metala.

- Procesu rekristalizacije prethodi pojava koja se naziva **oporavljanje**.
- Apsolutna temperatura T_0 pri kojoj počinje oporavljanje kreće se u granicama:

$$T_0 = (0,2-0,3)T_t$$

- U osnovi, oporavljanje i rekristalizacija nastaju zbog nastrojanja atoma u deformisanoj rešetki da se vrate u ravnotežno stanje.

- Veličina zrna raste sa povećanjem temperature posle svakog stepena deformacije, porast veći ukoliko je manji stepen prethodne deformacije.
- Porast zrna negativno utiče na mehaničke osobine metala.
- Metali sa sitno kristalnom strukturom imaju veću žilavost i čvrstoću, a i izgled njihove površine je bolji.
- Sa povećanim stepenom deformacije opada veličina zrna.

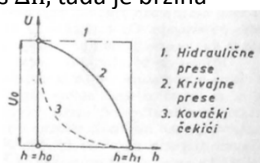
- Na brzinu porasta zrna jače utiče temperatura kojoj je metal podvrgnut nego vreme.
- To znači da će zrna daleko brže rasti ako se temperatura poveća a vreme drži konstantno, nego obrnuto, ako je temperatura konstantna, a vreme se produžava.
- Ako se obrada metala deformisanjem ne vrši u hladnom stanju, nego pri temperaturama višim od temperature rekristalizacije, tada se u metalu odvijaju istovremeno dva suprotna procesa, i to: deformacija zrna i rekristalizacija.

BRZINA DEFORMACIJE I BRZINA DEFORMISANJA

- Kod plastične prerade metala potrebno je uočiti razliku između brzine deformacije i brzine deformisanja.
- Brzina deformisanja** zavisi od mašine i predstavlja, **brzinu kretanja alata** (kod prese to je brzina kretanja pritiskivača, a kod čekića brzina malja).

- Ako se u vremenskom intervalu Δt izvrši sabijanje komada za iznos Δh , tada je brzina deformisanja:

$$u = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{dh}{dt} \frac{mm}{s}$$



- Brzina deformisanja se kod krivajnih presa, kovačkih čekića (2,3) menja u toku radnog hoda od vrednosti $u = u_0$ u početku deformacije (za $h = h_0$), do vrednosti $u = 0$ na završetku deformacije ($h = h_1$).
- Kod hidraulične prese $u = u_0 = u_{sr} = \text{const.}$

- Kada se komad početne visine h_0 sabija na visinu h za vreme t_{sr} tada je srednja brzina deformisanja:

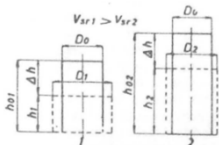
$$u_{sr} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_0 - h}{t_{sr}} \frac{mm}{s}$$

- Brzina deformisanja zavisi od vrste mašine i kreće se u granicama:

1. Za hidraulične prese: $u_0 = 0,03 - 0,5 \frac{m}{s} = 30 - 500 \frac{mm}{s}$;
2. Za krivajne prese: $u_0 = 0,4 - 0,6 \frac{m}{s} = 400 - 600 \frac{mm}{s}$;
3. Za kovačke čekiće: brzina u momentu udara malja u radni predmet $u_0 = 5 - 7 \frac{m}{s} = 5.000 - 7.000 \frac{mm}{s}$; srednja brzina se može približno uzeti $u_{sr} = u_0/2$;

- Brzina deformacije** predstavlja brzinu kretanja čestica materijala koji se deformiše.
- Brzina deformacija je izvod logaritamskog stepena deformacije po vremenu:
- $v = \frac{d\varphi}{dt}$ uz uslov da je $V = \text{const.}$
- brzina deformacije se može izraziti kao promena istisnute zapremine u jedinici vremena
- $v = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV_i}{dt} = \frac{u}{h} s^{-1}$
- Pri istoj brzini deformisanja, brzina deformacije će biti veća ukoliko je manja visina probnog uzorka.**

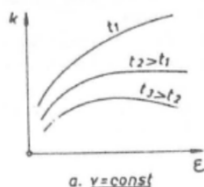
- Sabijaju se dva probna uzorka istog prečnika $D_{01} = D_{02} = D_0$, a različite početne visine $h_{01} < h_{02}$.
- Brzina deformisanja (brzina kretanja alata) je ista u oba slucaja $u_{sr} = \text{const.}$
- Oba komada se sabijaju za isti iznos Δh , tako da je:
- $\Delta h = h_{01} - h_1 = h_{02} - h_2$
- Kako je $\frac{\Delta h}{h_1} > \frac{\Delta h}{h_2}$ to je
- $V_{sr1} > V_{sr2}$



SPECIFIČNI DEFORMACIONI OTPOR KAO FUNKCIJA TEMPERATURE, BRZINE I STEPENA DEFORMACIJE

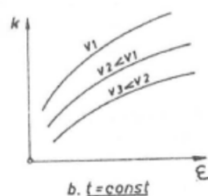
- Zbog složenosti procesa, uticaj temperature i brzine proučava se odvojeno.
- Dijagram k - ϵ posmatramo pri $v=\text{const}$ i $t=\text{var.}$ ili $v=\text{var.}$ i $t=\text{const.}$

- Ako se ispitivanje uticaja temperature na specifični deformacioni otpor vrši pri konstantnoj brzini, tada se mogu uočiti tri karakteristična slučaja.
- Kod niske temperature ispitivanja porastom stepena deformacije ϵ raste i specifični **deformacioni otpor k** (kriva t_1).



- Pri obradi metalnih materijala deformisanjem, u opštem slučaju, istovremeno se mogu odigravati dva procesa i to proces oporavljanja i proces rekristalizacije.
- U zavisnosti od toga koji od ova dva procesa preovladava, S. Gubkin je podelio plastično deformisanje metala na četiri područja i to:
 - vruće deformisanje ($T > T_r \geq 0,65 T_t$ -potpuna rekr.),
 - nepotpuno vruće ($T \approx T_r = 0,4 T_t$ -nepotpuna rekr.)
 - nepotpuno hladno ($T > T_o \geq 0,2 - 0,3 T_t$ -potpuno opor.)
 - hladnu deformisanje ($T < T_o$ nema rekristaliz. ni oporavljanja).

- Sa povećanjem brzine deformacije povećava se i specifični deformacioni otpor.



- Što je niža temperatura pri kojoj se vrši deformisanje to je slabiji uticaj brzine na specifični deformacioni otpor.

- Termomehanički režim tehnoloških procesa obrade metala deformisanjem, karakteriše se temperaturom, brzinom i stepenom deformacije.
- Sveukupnost uticaja navedenih faktora određuje specifični deformacioni otpor, tako da je:
- $k = k(T, \epsilon, v)$
- gde je:
- k - specifični deformacioni otpor,
- T - apsolutna temperatura u $^{\circ}\text{K}$,
- ϵ - stepen deformacije,
- v - brzina deformacije u s^{-1} .

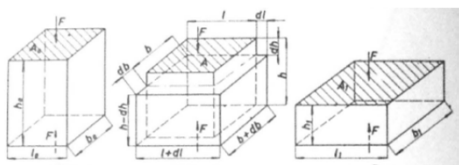
- Celokupni uticaj temperature, brzine i stepena deformacije na **specifični deformacioni otpor** se po A. Nadaiu može izraziti kao totalni diferencijal funkcije: $k = k(T, \epsilon, v)$ u obliku:

$$dk = \frac{\partial k}{\partial T} dT + \frac{\partial k}{\partial \epsilon} d\epsilon + \frac{\partial k}{\partial v} dv$$

- Prvi član obrasca uzima u obzir promenu specifičnog deformacionog otpora u zavisnosti od temperature.
- Drugi član uzima u obzir očvršćavanje deformacijom.
- Treći član karakteriše promenu specifičnog otpora u zavisnosti od brzine deformacije.

DEFORMACIONI RAD

- Rad utrošen za izvršenje deformisanja može se razjasniti kod sabijanja paralelopipeda.
- U nekom momentu procesa sabijanja, pod dejstvom sile F , visina tela će se smanjiti za beskonačno mali iznos dh .



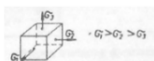
- Elementarni deformacioni rad će biti:
- $dW = Fdh$, a puni deformacioni rad utrošen na smanjenje visine od početne vrednosti h_0 do zadate h :
- $W = \int_{h_0}^h Fdh$, tj. bez predznaka \pm možemo zameniti granice pa je:
- $W = \int_h^{h_0} Fdh$
- Razmatramo idealne uslove bez spoljašnjeg trenja, pa je deformaciona sila:
- $F = kA$, gde je
- k - specifični deformacioni otpor bez trenja,
- A - kontaktna površina na kojoj deluje sila.

- Rad u idealnim uslovima (idealni rad):
- $W = \int_h^{h_0} kAdh$,
- Ukoliko se pretpostavi ravnomerna deformacija (bez ispupčenja bočnih stranica komada), tada je na osnovu aksioma na osnovu nepromenljivosti zapremine:
- $A = \frac{V}{h}$, tada je $W = V \int_h^{h_0} k \frac{dh}{h}$, ako je $\frac{dh}{h} = d\varphi$,
- Onda je specifični deformacioni rad:
- $a = \int_0^\varphi k d\varphi \frac{Nmm}{mm^3}$;
- Specifični deformacioni rad je onaj rad koji otpada **na jedinicu zapremine**.

USLOVI PLASTIČNOG TEČENJA

- Pri projektovanju tehnoloških procesa obrade plastčnim deformisanjem, u cilju iznalaženja radnih napona i deformacionih sila, potrebno je u početku ustanoviti uslove pod kojima dolazi do plastičnog tečenja metala.
- Stvarni tehnološki procesi se najčešće odigravaju u uslovima prostornog ili ravanskog naponskog stanja.
- Osobine metala se uglavnom proučavaju ispitivanjem probnih epruveta što ne daje potpunu sliku.

- Ako je telo opterećeno glavnim normalnim naponima $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, tada će plastično tečenje nastupiti pod drugim okolnostima od onih pod kojima nastupa pri linearnom opterećenju (samo npr. naponom σ_1).



- **Hipotezama o plastičnom tečenju** su uspostavljene zakonitosti ponašanja materijala pri linearnom i ostalim naponskim stanjima.
- To znači da hipotezama možemo zaključiti kako će se ponašati metal kod složenog naponskog stanja (prostornog ili ravanskog), ako se poznaju njegove osobine kod linearnog opterećenja.

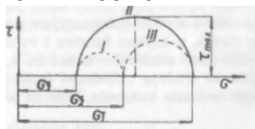
- Ako se posmatra opšti slučaj naponskog stanja elementa napregnutog tela, onda se zakon plastičnog tečenja matematički može izraziti funkcijom:
- $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, C_1, C_2, \dots) = 0$
- gde su:
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - glavni normalni naponi,
- C_1, C_2 - fizičke konstante metala, koje se određuju eksperimentima.
- Predočena f-ja predstavlja izvesnu zakonitost, koju moraju glavni naponi zadovoljiti da bi došlo do plastičnog tečenja.

Hipoteza najvećeg tangencijalnog (smicajnog) napona

- Ideja da se maksimalni, tangencijalni napon, uzme kao kriterijum za određivanje uslova pod kojima nastupa lom, pripada Kulonu.
- Kasnije su Tresca i Saint-Venant predložili da se ovaj uslov uzme i kao kriterijum pri kome počinje plastično tečenje metala.
- Po ovoj hipotezi, **plastično tečenje metala počinje kada najveći tangencijalni napon u metalu dostigne vrednost napona tečenja pri linearnom istezanju.**

1. Prostorno naponsko stanje:

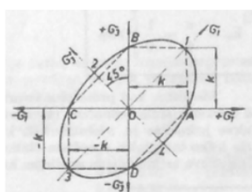
- Ukoliko je prostorno naponsko stanje određeno glavnim naponima:
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$, tada je najveći tangencijalni napon, prema naponskim Moor-ovim krugovima:
- $$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$
- uslov tečenja po ovoj hipotezi za prostorno naponsko stanje:
- $\sigma_1 - \sigma_3 = k$ - specifični deformacioni otpor za zadane uslove stepena, brzine i temperature deformacije.



- Obrazac $\sigma_1 - \sigma_3 = k$, može se izraziti i na sledeći način:
- $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = k$** , po ovoj hipotezi plastično tečenje nastupa onda kada razlika najvećeg i najmanjeg glavnog normalnog napona dostigne određenu vrednost k!
- Ako su glavni naponi negativni:
- $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < 0$, tada je $\sigma_1 = \sigma_{\min}$, i $\sigma_3 = \sigma_{\max}$ Sledi da je uslov plastičnog tečenja:
- $\sigma_3 - \sigma_1 = k$

2. Ravansko naponsko stanje

- Ravansko naponsko stanje nastaje pod uslovom kada je jedan od glavnih napona jednak nuli, to jest $\sigma_2 = 0$.
- Za ravansko naponsko stanje hipoteza se može predstaviti nepravilnim šestougaonikom u koordinatnom sistemu glavnih napona (σ_1 i σ_3).



Hipoteza najveće deformacione energije utrošene na promenu oblika

- Ovu hipotezu je postavio Huber (1904), a kasnije su je razradili Mises i Hencky.
- Po ovoj hipotezi uslov plastičnog tečenja glasi:
- Količina potencijalne deformacione energije, koja se troši za promenu oblika, za date uslove deformisanja (stepen, brzina i temperatura) konstantna je i jednaka količini deformacione energije promene oblika na granici tečenja pri linearnom istezanju.

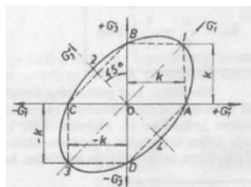
- Energija promene oblika može se izraziti jednačinom:
- $$U_d = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$
- a energija promene oblika na granici tečenja pri linearnom istezanju:
- $$U_{ds} = \frac{1+\nu}{3E} k^2;$$
- gde su:
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - glavni normalni naponi,
- ν - Poissonov koeficijent, fizička bezdimenzionalna karakteristika materijala čija veličina zavisi od vrste materijala
- E - modul elastičnosti.
- k - specifični deformacioni otpor

1. Prostorno naponsko stanje:

- Izjednačavajući izraze $U_d = U_{ds}$ dobija se uslov tečenja za prostorno naponsko stanje po ovoj hipotezi u obliku:
- $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2k^2$
- Bitna razlika između hipoteze najvećeg tangencijalnog napona i ove, nalazi se u tome što se u prvoj uzimaju ekstremne vrednosti glavnih napona u obzir (σ_1 i σ_3), a ova hipoteza uzima u obzir vrednosti napona σ_2 u intervalu $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$

2. Ravansko naponsko stanje:

- Uslov plastičnog tečenja za ravansko naponsko stanje dobija se iz prethodnog obrasca kada zamenimo da je $\sigma_2 = 0$, pa je:
- $\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 = k^2$
- Obrazac predstavlja opštu jednačinu elipse u koordinatnom sistemu.

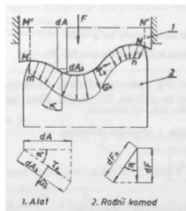


- Ova hipoteza je eksperimentima potvrđena i vrlo često se koristi u tehničkoj praksi.
- Može se zaključiti da se energetska hipoteza poklapa sa hipotezom najvećeg tangencijalnog napona u sledećim slučajevima:
 - kod linearnog naponskog stanja,
 - kod ravanskog naponskog stanja, kada su oba glavna normalna napona međusobno jednaka,
 - kod prostornog naponskog stanja, kada su dva glavna napona jednaka po veličini i predznaku.

DEFORMACIONA SILA

- Kod najvećeg broja operacija obrade metala deformisanjem, alat se kreće u radnom procesu pravolinijski.
- Aktivna sila alata je u svakom trenutku jednaka reakcionoj sili kojom se predmet suprotstavlja deformaciji.
- Zato se aktivna sila naziva i **deformaciona sila** i na osnovu njene veličine vrši se izbor prese.
- Valjanje, savijanje i ispravljanje na mašinama imaju i obrtno kretanje alata, a ne samo pravolinijsko, pa pored sile treba odrediti i obrtni moment.

- Da bi se odredila velična deformacione sile, prethodno treba odrediti veličinu i raspored napona na dodirnoj površini alata i radnog predmeta.
- Može se uzeti da je za neku operaciju plastične obrade pravac translatorskog kretanja alata u smeru strelice F (ujedno i pravac dejstva aktivne deformacione sile).
- Aktivna sila deluje na kontaktnoj površini $M-N$, a pravac i veličina normalnih napona σ_n su određeni dijagramom $m-n$.



- Normalna elementarna sila dF_n , koja deluje na element kontaktne površine dA_k je:
- $dF_n = \sigma_n dA_k$.
- U pravcu kretanja alata deluje elementarna aktivna sila
- $dF = dF_n \cos \alpha = \sigma_n dA_k \cos \alpha$,
- Gde je α ugao između pravca normalnog napona σ_n i pravca kretanja alata, to jest aktivne sile.

- Za određivanje ukupne deformacione sile treba uzeti u obzir celokupnu projekciju kontaktne površine M' - N' na ravan normalnu na pravac kretanja alata.
- Deformaciona sila će biti:
- $F = \iint_A \sigma_n dA$ ili $F = \int_0^A \sigma_n dA$
- Ako je normalni napon **σ_n konstantan** ili može biti zamenjen srednjom vrednošću, tada je sila:
- $F = \sigma_n A$

- Deijenjem deformacione sile F sa odgovarajućom površinom A (projekcijom kontaktne površine) dobija se radni pritisak:
- $p = \frac{F}{A} = \frac{\iint_A \sigma_n dA}{A}$
- Radni pritisak se gotovo uvek može izraziti i jednačinom:
- $p = mk$, gde je:
 - m - bezdimenzioni koeficijent, koji zavisi od vrste tehnološkog procesa obrade deformisanjem, oblika obratka i koeficijenta kontaktnog trenja.
 - k - specifični deformacioni otpor za zadate uslove: stepena, brzine i temperature deformacije bez uticaja trenja.
