

1. REFERATI, SAOPŠTENJA I PRIKAZI

Dr Binko Musafia

MODELSKA ANALOGIJA PROCESA RAVNINSKOG DEFORMACIONOG STANJA

Ravninski problem

Projektovanje tehnoloških procesa sa optimalnim dimenzionalno-konfigurativnim odnosima radnog komada, uz minimalni energetski bilans, zasniva se na naponsko-deformacionim odnosima aparata matematske fizike i njenog posebnog dijela - teorije plastičnosti.

Makrofenomenološki posmatrano savremena teorija plastičnosti nudi teoretsku mogućnost rješavanja ovih zahtjeva.

Zadržimo se trenutno na takozvanom "opštem problemu teorije plastičnosti" sintetizovanom sistemom niže danih jednačina.

$$\left. \begin{aligned}
 \text{A)} \quad & \frac{\partial \bar{U}_{ij}}{\partial x^j} = 0 \\
 \text{B)} \quad & d\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} d\bar{U}_{ij} + \frac{d\bar{U}_{ij}^*}{2\theta} + d\lambda \bar{U}_{ij}^* \\
 \text{C)} \quad & \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}_{ij}}{\partial x^k \partial x^m} + \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}_{km}}{\partial x^i \partial x^j} - \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}_{ik}}{\partial x^j \partial x^m} - \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}_{jm}}{\partial x^i \partial x^k} = 0 \\
 \text{D)} \quad & d\bar{\epsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{d\bar{\epsilon}_{ij}^* d\bar{\epsilon}_{ij}^*} \\
 \text{E)} \quad & \bar{U}_i = F(\int d\bar{\epsilon}_i)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

gdje su:

x^i, x^j, \dots, x^m - kontravarijantne koordinate

ν, E, θ - konstante elastičnosti (koeficijent Š.D., Poissona, T. Youngov modul elastičnosti i modul klizanja)

$d\lambda$ - faktor proporcionalnosti priraštaja plastičnog dijela deformacija koji je u procesu opterećenja pozitivan (a u procesu rasterećenja je jednak nuli)

$\sigma_{ij}, \dots, \dots, \epsilon_{km}$ - komponente simetričnih tenzora napona i deformacija

$\sigma_{ij}^*, \epsilon_{ij}^*$ - komponente devijatora tenzora napona i deformacija

$\sigma_{ij} \begin{cases} = 1 & \text{za } i=j \\ = 0 & \text{za } i \neq j \end{cases}$ - simbol Kroneckera (jedinični tenzor).

Diskutujući postavljeni sistem jednačina (1) može se konstatovati:

- A) Sistem od tri parcijalne diferencijalne jednačine statičke ravnoteže sadrži šest nepoznatih komponentnih napona (momentne jednačine ravnoteže impliciraju uslov simetričnosti tenzora napona).
- B) Po teoriji priraštaja deformacija uspostavljene su funkcionalne zavisnosti elastičnog i plastičnog dijela priraštaja deformacija sa komponentama sferičnog i devijatora tenzora napona. Ove jednačine za ravninski problem postavio je L. Prandtl (1924.g.), a za opšti slučaj idealno-plastičnog tijela šest funkcionalnih medjuzavisnosti predložio je A.Reuss (1930.g.). Nešto docnije (1932.g.) F.K.G. Odquist proširio je važnost jednačina i na očvršćavajuća tijela.
- C) Jednoznačno određeno polje pomjeranja (u kome su pomjeranja neprekidne funkcije kontravarijantnih koordinata) uslovljeno je funkcionalnom medjuzavisnošću normalnih i tangencijalnih deformacija. Može se dokazati [1] da tri St. Venantove diferencijalne jednačine drugog reda sadrže šest nepoznatih komponentnih napona.
- D) Priraštaj intenzivnosti deformacije izražava se kao funkcija druge skalarnе invarijante devijatora tenzora priraštaja deformacija.
- E) Intenzivnost napona, kao funkcija radnog očvršćavanja, u ovom slučaju je predložena u prikladnom obliku i svedena na funkciju deformacionog očvršćavanja. Identitet obje funkcije važi samo pod pretpostavkama: idealno izotropnih svojstava tijela, apstrahovanja efekta J.Bauschingera, isključivo elastične promjene zapremine i jednakosti W.Lode- A.Nadai [2] koeficijenta vida naponskog i deformacionog stanja.

Sa matematske tačke gledišta teoretska mogućnost rješenja sistema jednačina (1) egzistira jer broj jednačina odgovara broju nepoznatih veličina. Medjutim, bez znatnijih aproksimacija i dodatnih pretpostavki niti jedan prostorni problem se ne

može riješiti integracijom postavljenog sistema, čemu posebno doprinosi i nelinearnost pojedinih jednačina.

Ukoliko se tehnološki proces realizuje u uslovima fiksacije pomjeranja u pravcu jedne ose koordinatnog sistema (na pr. y -ose), tada svi komponentni naponi ne zavise od dotične koordinate, tangencijalni komponentni naponi u ravnima normalnim na ovu osu su jednaki nuli, dok je adekvatni normalni napon jednak polusumi ostala dva normalna napona [3].

$$\begin{aligned} \varepsilon_y = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial y} = 0, \quad \sigma_y = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} = \bar{\sigma} \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

Analitika ravninskog deformacionog stanja izražena uslovnim jednačinama (2) ne predstavlja samo formalno matematsku simplifikaciju opšteg problema teorije plastičnosti (1), nego i suštinski pristup razrješavanju raznih procesa plastične obrade koji se prema konstelaciji naponsko-deformacionih odnosa i konstrukcijskoj koncepciji alata mogu svrstati u ravninska, ili quaziravninska stanja.

Tu se prvenstveno misli na procese kod kojih nema promjene dimenzije u jednom glavnom pravcu, ili je ova promjena zanemarljivo mala u odnosu na promjene dimenzija u ostala dva glavna pravca.

Po konceptu ravninskog deformacionog stanja rješava se niz procesa plastične obrade kao što su: presovanje nerotacionih dijelova metodom istosmjernog istiskivanja [4], duboko izvlačenje sa redukcijom debljine zida [5], valjanje tankih limova veće širine [6], slobodno kovanje dužih komada paralelopipednog oblika [7] i sl.

Modeliranje ravninskih procesa

Istraživanje modeliranih procesa ima za cilj stvaranje korelacionih odnosa. Na taj način se iz teoretskih analiza funkcionalnih medjuzavisnosti jednog procesa mogu izvući adekvatni zaključci za drugi proces. Postupak verifikacije se pri tome skraćuje jer se vrši na jednom procesu iz familije dotičnog modela.

Model procesa ravninskog presovanja metodom istosmjernog istiskivanja (sl. 1A) i ravninskog izvlačenja (sl. 1B) formiran je iz sljedećih repernih elemenata:

1. Dužina komada u svim fazama procesa ostaje nepromijenjena ($l = \text{const}$) i jednaka dužini priprema - gredice, čime su ispunjeni uslovi ravninskog deformacionog stanja (2).

2. Deformacione karakteristike određene su stepenom deformacije ψ i stepenom redukcije λ

$$\psi = \frac{B_0 - B_1}{B_0} = \frac{\lambda - 1}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{B_0}{B_1} = \frac{1}{1 - \psi} \quad (3)$$

3. Dimenzionalno-konfigurativni odnosi zasnivaju se na varijaciji centralnog ugla kalupa za presovanje i izvlačenje (α) pri jediničnoj vrijednosti početne širine za oba procesa

$$B_1 = \frac{B_0}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} = 1 - \psi \quad (4)$$

4. Po kinematici procesa pretpostavlja se jedinična vrijednost ulazne brzine ($v_0 = 1$) čime je ujedno određena razmjena hodografa (sl. 1b).

Uslovne jednačine vektora protoka brzina kroz granice plastičnih oblasti

$$v_0 B_0 - v_p B_1 = 0 \quad ; \quad v_0 B_1 - v_{iz} B_0 = 0$$

omogućavaju definiciju konačnih - izlaznih brzina za proces presovanja i izvlačenja

$$\left. \begin{aligned} v_p &= \frac{B_0}{B_1} v_0 = \lambda v_0 = \lambda \\ v_{iz} &= \frac{B_1}{B_0} v_0 = \frac{v_0}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

5. Istraživanje se sprovodi po reološkom modelu kruto-plastičnog tijela St. Venanta [8], pri čemu se operiše sa reduciranim parametrima mehaničkih osobina materijala

$$\left. \begin{aligned} k_r &= \frac{2}{\sqrt{3}} k = 1,155 k = 2 k_s \\ k_s &= \frac{k}{\sqrt{3}} = 0,577 k = \frac{k_r}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdje je:

k - funkcija intenzivnosti napona koja u uslovima neposredne primjene predstavlja specifični deformacioni otpor za zadane uslove stepena, temperature i brzine deformacije.

6. Oba procesa ispituju se u alatima sa poliranim radnim površinama uz aktivno podmazivanje, pri kontaktnim uslovima bliskim idealnim.

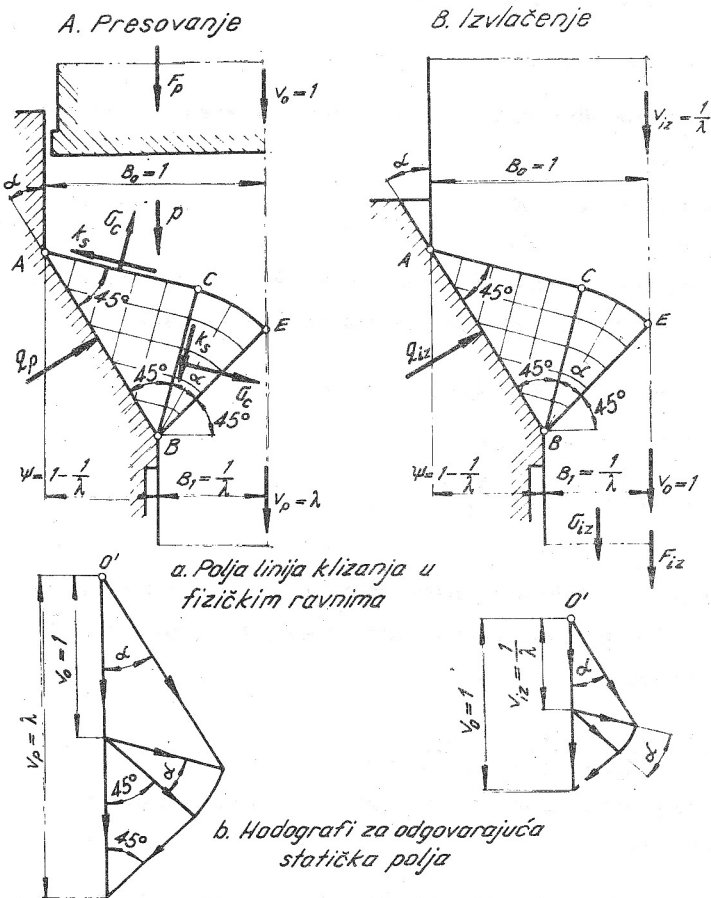
Neke od hipotetičkih idealizacija (posebno iz tačke 5 i 6) biće kod daljih razmatranja modificirane uslovima realnog procesa.

Za analizu problema statičkih polja u fizičkim ravnima najprikladnije je R.Hillovo [9] univerzalno dvostruko centrirano lepezasto polje linija klizanja.

Ovo polje kod graničnih vrijednosti stepena deformacije i stepena redukcije

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \frac{B_0 - B_1}{B_0} = \frac{2 \sin \alpha}{1 + 2 \sin \alpha} \\ \lambda &= \frac{B_0}{B_1} = 1 + 2 \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

degeneriraju u oblik prikazan na sl. 1a.



Sl. 1 Modeliranje procesa presovanja i izvlačenja po statičkim poljima

Ravnoteža elementa tijela u stanju plastičnoq tečenja uslovljena je sistemom jednačina

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s_\alpha} (\bar{\sigma} + 2k_s \omega) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial s_\beta} (\bar{\sigma} - 2k_s \omega) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

gdje su:

s_α, s_β - krivolinijske koordinate mreže linija klizanja

$\bar{\sigma}, k_s$ - srednji normalni napon (2) i redukovana vrijednost napona početka plastičnog tečenja (6)

ω - ugao klizanja uz duž linije klizanja

Integracijom diferencijalnih jednačina (8) dobivaju se poznate Henckyjeve integralne jednačine plastičnosti

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} + 2k_s \omega &= C_1 = 2k_s f(\beta) \\ \bar{\sigma} - 2k_s \omega &= C_2 = 2k_s \varphi(\alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

Primjenom Henckyjevih integrala (9) na jednorodno ABC i centrirano polje BCE (sl. 1A) može se odrediti normalni pritisak kalupa za presovanje

$$q_p = -\bar{\sigma}_c + k_s = k_s(1 + 2\alpha) + k_s = 2k_s(1 + \alpha) \quad (10)$$

i radni pritisak procesa presovanja

$$p = q_p \frac{B_0 - B_1}{B_0} = 2k_s(1 + \alpha) \frac{\lambda - 1}{\lambda} = 2k_s(1 + \alpha)\psi \quad (11)$$

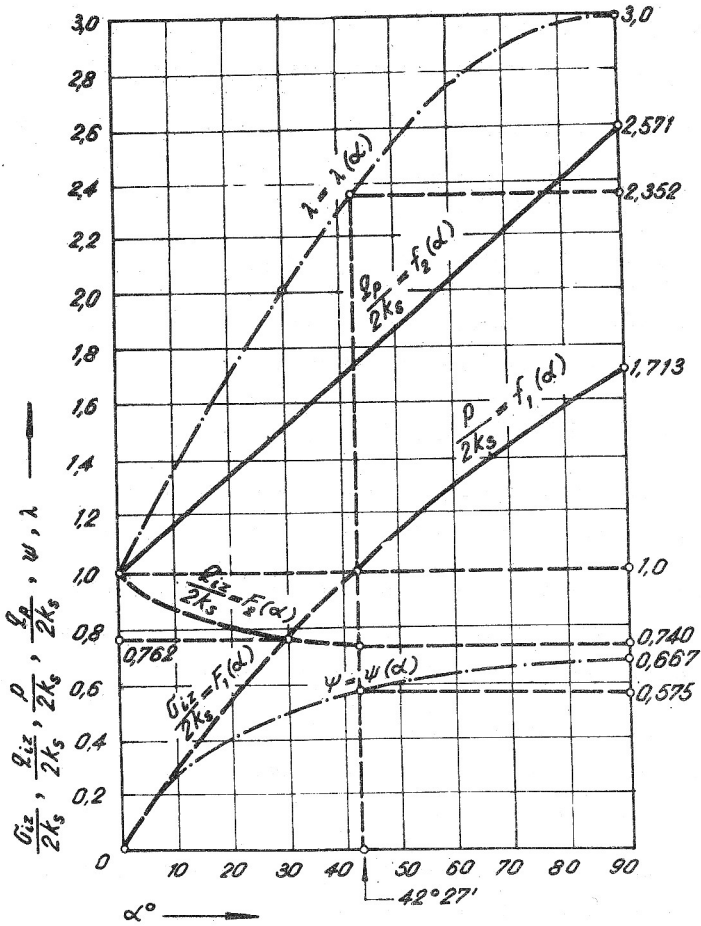
Iz dijagrama funkcionalnih medjuzavisnosti procesa presovanja (sl. 2) se zaključuje da normalni pritisak kalupa za presovanje (10) i radni pritisak procesa presovanja (11) u cijelom intervalu deformacije predstavljaju monotono rastuće funkcije sa korelacijom

$$\frac{q_p}{p} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = \frac{2k_s(1 + \alpha)}{2k_s(1 + \alpha)\psi} = \frac{\lambda}{\lambda - 1} = \frac{1}{\psi} \quad (12)$$

pri čemu normalni pritisak kalupa za presovanje znatno premašuje radni pritisak procesa presovanja.

Koristeći modelsku analogiju na proces izvlačenja (sl. 1B), analognim postupkom dobiva se normalni pritisak kalupa za izvlačenje

$$q_{iz} = 2k_s \frac{1 + \alpha}{1 + 2 \sin \alpha} = 2k_s(1 + \alpha) \frac{1}{2} = 2k_s(1 + \alpha)(1 - \psi) \quad (13)$$



Sl. 2 Dijagram funkcionalnih medjuzavisnosti procesa presovanja i izvlačenja

koji prema dijagramu izvlačenja predstavlja monotono opadajuću funkciju (sl.2).

Napon izvlačenja u izlaznom presjeku zone deformacije

$$\sigma_{iz} = 2k_s (1 + \alpha) \frac{2 \sin \alpha}{1 + 2 \sin \alpha} = 2k_s (1 + \alpha) \frac{\lambda - 1}{\lambda} = 2k_s (1 + \alpha) \psi \quad (14)$$

limitiran je moći nošenja materijala u ovoj zoni ($\sigma_{iz} \leq 2k_s$). Iz ovog uslova rezultiraju granični parametri procesa izvlačenja

$$\alpha = 42^{\circ} 27' ; \quad \psi = 0,575 \quad \text{i} \quad \lambda = 2,352 \quad (15)$$

Radi povoljne šeme prostornog naponskog stanja svetrnog pritiska ovaj limit ne egzistira kod procesa presovanja i sa daleko većim stepenima redukcije, o čemu svjedoče i rezultati nekih eksperimentalnih istraživanja koji će biti izloženi.

Analogno relaciji (12) po dijagramu funkcionalnih medjuzavisnosti procesa izvlačenja (sl. 2) se uočava da za ovaj proces važi korelacija normalnog pritiska kalupa za izvlačenje (13) i napona izvlačenja (14)

$$\frac{Q_{iz}}{Q_{iz}} = \frac{F_2(\alpha)}{F_1(\alpha)} = \frac{2k_s(1+\alpha)(1-\psi)}{2k_s(1+\alpha)\psi} = \frac{1}{\lambda-1} = \frac{1-\psi}{\psi} \quad (16)$$

Odnos normalnog pritiska kalupa za presovanje (10) i normalnog pritiska kalupa za izvlačenje (13) raste sa porastom stepena redukcije

$$\frac{Q_p}{Q_{iz}} = \frac{f_2(\alpha)}{F_2(\alpha)} = \frac{2k_s(1+\alpha)}{2k_s(1+\alpha)(1-\psi)} = \lambda = \frac{1}{1-\psi} \quad (17)$$

Radni pritisak procesa presovanja u idealnim kontaktnim uslovima jednak je naponu izvlačenja, ograničenom limitnim vrijednostima (15).

Medjutim, u proizvodnim uslovima uticaj trenja je značajniji kod procesa presovanja nego kod procesa izvlačenja, jer je normalni pritisak kalupa za presovanje (10) veći od normalnog pritiska kalupa za izvlačenje (13).

Ispitivanja procesa pri istim kontaktnim uslovima i konstantnim parametrima alata, pokazuju da radni pritisak procesa presovanja premašuje vrijednost napona izvlačenja za isti stepen redukcije [10].

Modelska analogija ravninskih procesa se može izučavati i po kinematski mogućim - prekidnim poljima. Jedan od mogućih pristupa, posebno sa primjenom W. Johnsonovih [11] kruto-plastičnih blokova, izložen je u radu [12].

Plastičnost i linearizacija

Uslov plastičnog tečenja za izotropni materijal izražava se kao funkcija druge i treće skalarne invarijante devijatora tenzora napona

$$f\left(\frac{1}{2} \sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^*, \frac{1}{3} \sigma_{ij}^* \sigma_{jk}^* \sigma_{ki}^*\right) = 0 \quad (18)$$

Za ravninsko deformaciono stanje (2) jednačina (18) se redukuje na veoma prikladan Mises-Henckyjev energetski uslov plastičnosti

$$\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2k_s} = \pm \sqrt{1 - \frac{\tau_{xz}^2}{k_s^2}} \quad (19)$$

Nadalje je potrebno razmotriti prihvatljivost linearizacije uslovne jednačine plastičnog tečenja (19), to jest njenog svodjenja na oblik

$$\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_z = \pm 2k_s = \pm k_r = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} k \quad (20)$$

Jednačina (20) je tačna samo u slučaju ako su tangencijalni naponi jednaki nuli ($\tau_{xz} = 0$). Inače, relacija (20) je približna, jer linearizacija predstavlja aproksimaciju glavnih, komponentnim naponima.

E.P. Unksov [13] je ustanovio da greška koja nastaje korištenjem aproksimativnog - linearizovanog uslova plastičnog tečenja (20), umjesto tačnog (19) ne premašuje iznos od 10% ako tangencijalni naponi leže u intervalu

$$0 \leq \tau_{xz} \leq 0,7 k_s \quad (a)$$

Kod procesa presovanja i izvlačenja u hladnom stanju, sa brižljivo obradjenim alatom (polirane radne površine alata), uz aktivno podmazivanje (kvalitativno i kvantitativno), nejednačinu (a) je moguće uvijek zadovoljiti i to za kontaktnu površinu gdje tangencijalni napon dostiže najveću vrijednost [14].

Prelaskom sa idealizovanog na realni proces anulira se i pretpostavka c idealnim svojstvima materijala (šema kruto-plastičnog reološkog modela).

Jednu mogućnost analitičke eksplicije funkcije deformacionog očvršćavanja daje relacija [15]

$$k = k_0 + \frac{k_m - k_0}{\psi_m} \psi \exp \frac{1}{\alpha} (\psi_m^\alpha - \psi^\alpha) \quad (21)$$

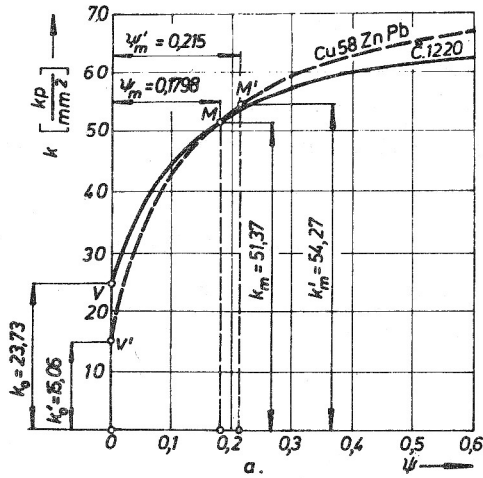
gdje je:

k_0 - stvarni napon početka plastičnog tečenja

k_m, ψ_m - stvarni napon i deformacija u momentu gubitka stabilnosti procesa jednoosnog istezanja

α - parametar mehaničkih osobina materijala

Na sl. 3 prikazane su funkcionalne zavisnosti specifičnog deformacionog otpora od deformacije za razne metale i to po analitičkoj aproksimaciji (21) i eksperimentalnim vrijednostima dobivenim u području ravnomjerne (nelokalizovane) deformacije probnog uzorka.

Al Cu Mg1

$$k_0 = 27,16 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$k_m = 52,40 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$\psi_m = 0,149$$

$$a = 0,236$$

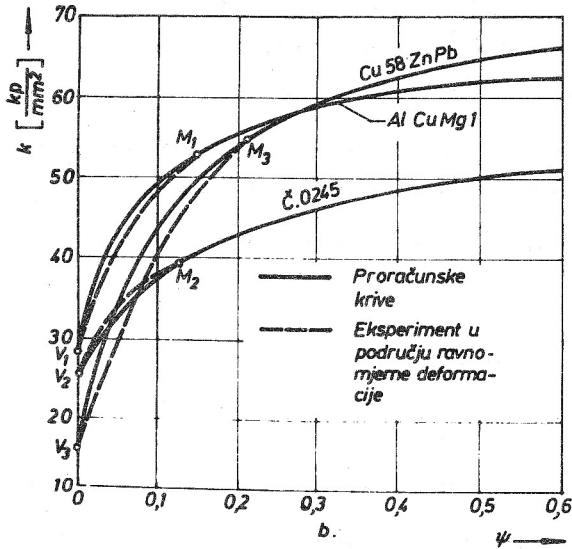
Č.0245

$$k_0 = 25,18 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$k_m = 38,93 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$\psi_m = 0,127$$

$$a = 0,429$$

Cu 58 Zn Pb

$$k_0 = 15,06 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$k_m = 54,27 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$\psi_m = 0,215$$

$$a = 0,310$$

Č.1220

$$k_0 = 23,73 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$k_m = 51,37 \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

$$\psi_m = 0,1798$$

$$a = 0,305$$

Sl. 3 Proračunske i eksperimentalne vrijednosti specifičnog deformacionog otpora za razne metale

Klasifikacija procesa stacionarnog izvlačenja

Procesi raznoimenog naponskog stanja kao što su: izvlačenje žice, profila, cijevi duboko izvlačenje sa i bez redukcije debljine zida realizuju se pod dejstvom

pozitivnog radnog (efektivnog) napona.

Radni napon nastaje kao posljedica prenosa sile sa radnog organa mašine (u zoni prenosa sile), a funkcija je stepena deformacije, parametara procesa i parametara materijala

$$\sigma_{iz} = \sigma_{iz}(\psi, P_1, P_2 \dots P_i, M_1, M_2 \dots M_i) \quad (b)$$

Moć nošenja u zoni prenosa sile ograničena je redukovanom vrijednošću specifičnog otpora koji prema (6) i (21) zavisi od stepena deformacije i parametara materijala.

$$k_r = \frac{2}{\sqrt{3}} k = k_r(\psi, M_1, M_2 \dots M_i) \quad (c)$$

Rješavanjem jednačina (b) i (c) uz minimalni energetski bilans dobiva se granični stepen deformacije optimalnog procesa u funkciji od parametara materijala i parametara procesa

$$\psi_g = \psi_g(M_1, M_2 \dots M_i, P_1, P_2 \dots P_i) \quad (22)$$

Proizvodnja u podoptimalnom području ($\psi < \psi_g$) je neracionalna (jer se proizvod radi u više radnih operacija nego što je potrebno), dok je rad u nadoptimalnom području ($\psi > \psi_g$) nemoguć (jer dolazi do rezanja proizvoda).

Duboko izvlačenje sa redukcijom debljine zida (sl. 4a) je proces kod kojega se u radnoj zoni alata (zoni deformacije) vrši prinudno smanjenje debljine zida ($s_i < s_o$), sa relativno malom promjenom srednjeg prečnika ($d_{s_i} \approx d_{s_o} \approx \text{const}$), uz adekvatno povećanje visine probnog uzorka ($\Delta h_i > \Delta h_o$) [16].

Zanemarujući priraštaj elastičnog dijela deformacije, uz uslov nestišljivosti (sa koeficijentom S.D. Poissona $\nu = 0,5$) jednačina (B) sistema (1) se pojednostavljuje, pa se po teoriji tečenja Lèvy - Misesa [17] dobiva da je ukupni priraštaj je dnak priraštaju plastičnog dijela komponentne deformacije

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \sigma_{ij}^* = d\lambda (\sigma_{ij} - \nu \delta_{ij}) \quad (d)$$

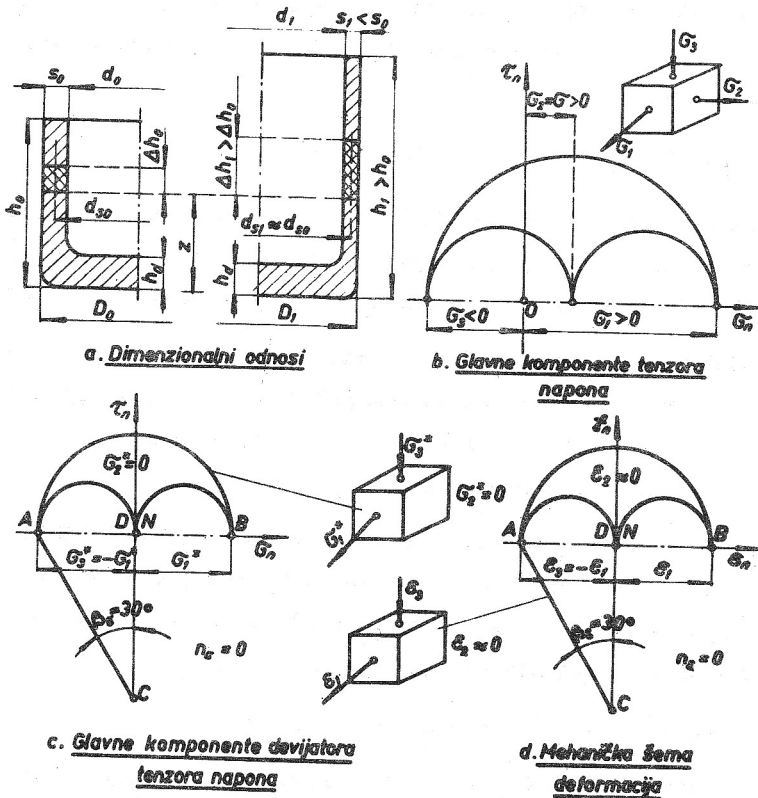
Nestišljivost materijala ($d\varepsilon_{ii}^p = 0$) može se interpretirati i odnosom glavnih logaritamskih deformacija

$$\varphi_n = \ln \frac{\Delta h_i}{\Delta h_o} = - \left(\ln \frac{d_{s_i}}{d_{s_o}} + \ln \frac{s_i}{s_o} \right) = - (\varphi_d + \varphi_s) \approx - \varphi_s \quad (e)$$

pri čemu je

$$\varphi_d \ll \varphi_s, \varphi_n \quad (f)$$

Prva glavna (aksijalna) logaritamska deformacija procesa je pozitivna (jer predstavlja povećanje visine probnog uzorka) i jednaka trećoj glavnoj (radijalnoj) logaritamskoj deformaciji uzetoj sa suprotnim predznakom (radi smanjenja debljine zida), pod pretpostavkom da je tangencijalna deformacija (promjena srednjeg prečnika) zanemarljivo mala u odnosu na radijalnu i aksijalnu deformaciju.



Sl. 4 Klasifikacija procesa stacionarnog izvlačenja na osnovu dimenzionalnih, naponskih i deformacionih odnosa

Iz sistema (d) i pretpostavke (f) dobiva se već ranije postavljena matematska definicija ravninskog deformacionog stanja (2), pa duboko izvlačenje sa redukcijom debljine zida spada u ravninske procese sa konstelacijom glavnih komponenta tenzora napona prema sl. 4b.

Lode-Nadaijev koeficijent vida naponskog stanja [2], uz relaciju (2) iznosi

$$\eta_v = \frac{2\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3} = \frac{\operatorname{tg}(\beta_g - 30^\circ)}{\operatorname{tg} 30^\circ} = 0 \quad (\text{g})$$

pa se prema Mohr-Rozenbergovoj geometrijskoj interpretaciji glavnih komponenta devijatora tenzora napona (sl. 4c) zaključuje da se radi o mehaničko-naponskoj šemi smicanja.

Kosinus ugla vida deformacionog stanja po G.A. Smirnov-Aljajevu [18]

$$\cos 3\beta_g = \frac{4}{\varepsilon_3^3} \operatorname{det} \left| \varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij} \right|, \quad \beta_g = 30^\circ \quad (\text{h})$$

potvrđuje da ovaj proces ima mehaničku šemu ravninskog deformacionog stanja (sl. 4d).

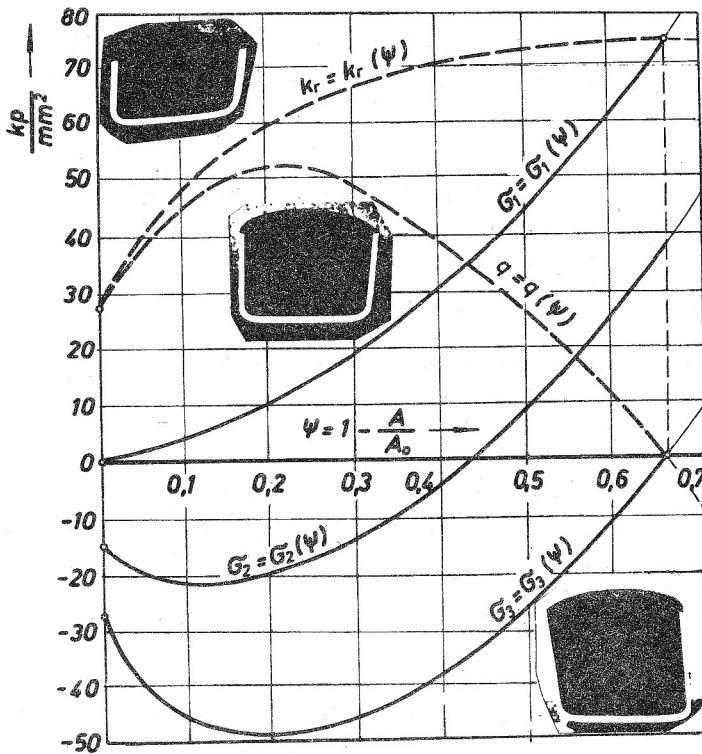
Element napregnutog tijela u zoni deformacije opterećen je aksialnim naponom istezanja ($\bar{\sigma}_1$), radijalnim naponom pritiska ($\bar{\sigma}_3$), a u cirkularnom pravcu srednjim normalnim naponom ($\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}$) pozitivnim za $|\bar{\sigma}_1| > |\bar{\sigma}_3|$ i negativnim u intervalu $|\bar{\sigma}_1| < |\bar{\sigma}_3|$.

Usljed djejtva normalnog pritiska kalupa za izvlačenje na konusnoj površini kalupa po zakonu C.A. Coulomba dolazi do pojave tangencijalnog kontaktnog napona, proporcionalnog koeficijentu kontaktnog trenja, pa je radijalni napon

$$\bar{\sigma}_3^* = - \left(\rho \frac{dz}{\cos \alpha} \cos \alpha - \tau \frac{dz}{\cos \alpha} \sin \alpha \right) \frac{1}{dz} \quad (\text{m})$$

Primjenom linearizovanog uslova plastičnog tečenja (20) i jednačine (m) dobivaju se glavni naponi procesa i normalni pritisak kalupa u funkciji od prvog glavnog napona, parametara procesa i parametara materijala

$$\left. \begin{aligned} \varrho &= \frac{1}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} k - \sigma_1 \right) = \frac{k_r - \sigma_1}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \\ \sigma_3 &= -\varrho (1 - \mu \operatorname{tg} \alpha) \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{1}{2} [\sigma_1 - \varrho (1 - \mu \operatorname{tg} \alpha)] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$



Sl. 5 Glavni naponi i granične vrijednosti deformacija procesa dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine zida

Aksijski napon σ_1 proizilazi kao rezultat integracije diferencijalne jednačine stanja (ravnoteže i plastičnosti) u izlaznom presjeku zone deformacije.

Promjene glavnih napona prikazane su na sl. 5. Proračun je sproveden za materijal Č.12 20 sa reduciranom vrijednošću specifičnog deformacionog otpora (6)

i (21) po eksperimentalnim vrijednostima prema sl. 3 .

Teoretska vrijednost graničnog stepena deformacije (u alatu bez zone glačanja, za $\bar{\sigma}_{iz} = \bar{\sigma}_f$), kao rezultat rješenja jednačine (22), iznosi $\psi_g = 0,660$. Uključivši dodatne gubitke u zoni glačanja (iako su čelični komadi bili prethodno fosfatirani i podmazivani $\bar{\sigma}'_{iz} > \bar{\sigma}_f$) teoretska vrijednost stepena deformacije optimalnog procesa se smanjuje na iznos $\psi_g = 0,593$. Rezultati eksperimentalnih istraživanja [19] pokazuju da je razaranje proizvoda uočeno kod stepena deformacije $\psi = 0,567$. Uopredjujući ovu vrijednost sa idealizovanim stanjem (idealni kontaktni uslovi i kruto-plastični reološki model) prema (15), uočavaju se veoma mala odstupanja.

Iako su uslovi realnog procesa nepovoljniji od idealno pretpostavljenih, bliskost teoretskih i eksperimentalnih rezultata ne leži samo u faktoru povoljnih kontaktnih uslova, nego i u koliziji kruto-plastičnog tretmana i fenomena očvršćavanja, koji sa stanovišta optimizacije procesa implicira pozitivne efekte u zoni prenosa sile.

Klasifikacija presovanja metodom istosmjernog istiskivanja

Presovanje istiskivanjem je proces obrade kod kojega se radni komad oblikuje isticanjem metala iz kalupa odgovarajućeg presjeka. Kod presovanja po metodi istosmjernog istiskivanja smjerovi kretanja radnog dijela alata i isticanja metala iz kalupa su istovjetni [20]. Konstrukcija alata ispunjava zahtjeve osnosimetrične i ravninske deformacije (sl. 6).

Nastanak plastičnog tečenja kod osnosimetričnih procesa i pod pretpostavkom linearizacije razlikuje se od početka plastičnog tečenja kod ravninsko-deformacionih procesa.

Uopštavajući problem, približna jednačina plastičnog tečenja zavisi i od koeficijenta naponskog stanja (g), pa se može predočiti

$$\bar{\sigma}_{max} - \bar{\sigma}_{min} = \delta^* k = \frac{2}{\sqrt{3 + n^2}} k \quad (24)$$

Prema predloženoj klasifikaciji na osnovu deformacionih parametara procesa presovanja metodom istosmjernog istiskivanja (sl. 6) moguća su dva granična stanja:

- a. Kod osnosimetričnog opterećenja komponente vektora pomjeranja tačaka tijela i komponentni naponi ne zavise od polarnog ugla

$$\frac{\partial u_i}{\partial \theta} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \tilde{\sigma}_{ij}}{\partial \theta} = 0 \quad \text{za } i, j = 1, 2, 3 \quad (n)$$

Pretpostavka (n) uključuje kinematiku radijalnog tečenja elementarnih čestica tijela u zoni deformacije, a posljedica je da su dva normalna napona (radijalni i cirkularni) međusobno jednaki.

Mehaničke karakteristike osnosimetrične deformacije iz (g), (n) i (24)

$$\tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_1, \quad r_{\tilde{\sigma}} = 1, \quad \delta = 1 \quad ; \quad \tilde{\sigma}_1 - \tilde{\sigma}_3 = k \quad (25)$$

- b. Kod ravninskog presovanja dužina poprečnog presjeka gredice i otpreska ostaje ista ($l = \text{const}$). U pravcu y-ose nema deformacije i svi izvodi komponentnih napona po ovoj koordinati moraju biti jednaki nuli

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \tilde{\sigma}_{ij}}{\partial y} = 0 \quad \text{za } i, j = 1, 2, 3 \quad (0)$$

Pretpostavka (0) prema (2) uključuje uslov po kome je drugi glavni napon ujedno i srednji normalni napon.

Mehaničke karakteristike ravninske deformacije iz (g), (0) i (24)

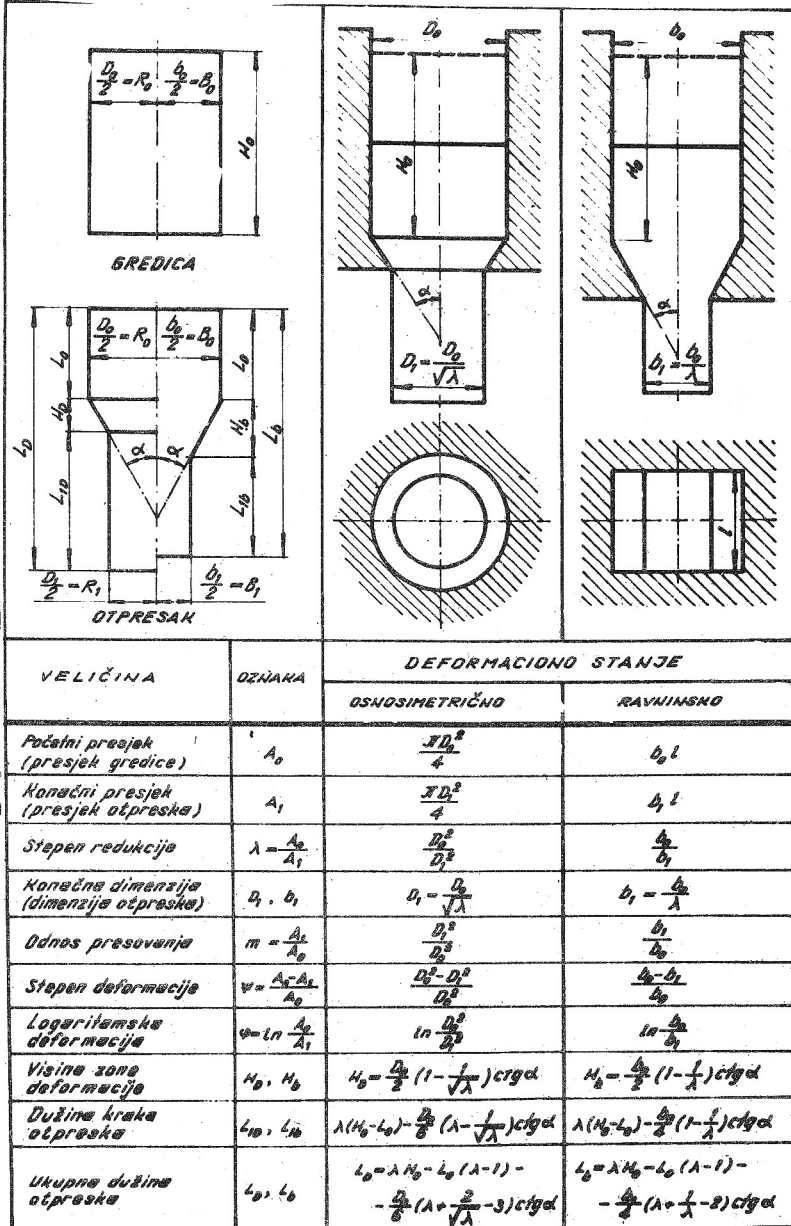
$$\tilde{\sigma}_2 = \frac{\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_3}{2}, \quad r_{\tilde{\sigma}} = 0, \quad \delta = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad ; \quad \tilde{\sigma}_1 - \tilde{\sigma}_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} k \quad (26)$$

Geometrijska koncepcija eksperimenta bazira na tome da gredice (sl. 6) imaju istu početnu visinu $H_0 = 40 \text{ mm}$ i isti početni presjek $A_0 = 616 \text{ mm}^2$, pri čemu su oblici gređica:

- Osnosimetrična deformacija realizuje se sa gređicom okruglog poprečnog presjeka prečnika $D_0 = 28 \text{ mm}$,
- Širina prizmatične gređice uzima se jednaka prečniku osnosimetrične gređice $b_0 = D_0 = 28 \text{ mm}$, dok iz uslova konstantnosti početnog presjeka gređice proizilazi dužina gređice $l = 22 \text{ mm}$. Ova dimenzija se u toku procesa presovanja ne mijenja, što znači da su ostvareni uslovi ravninskog deformacionog stanja.

Proračunska i eksperimentalna analiza geometrije otpresaka pokazuje da se pod istim uslovima presovanja dobivaju ravninski otpresci manjih dužina od osnosimetričnih otpresaka. Iz dijagrama prikazanog na sl. 7 se uočava da razlike du-

žina otpresaka pri konstantnom uglu presovanja rastu sa povećanjem stepena redukcije. Pri konstantnom stepenu redukcije ove razlike opadaju sa povećanjem ugla kalupa za presovanje, tako da kod presovanja iz ravnog kalupa potpuno iščezavaju.



Sl. 6 Deformacioni parametri procesa presovanja metodom istosmjernog istiskivanja

Eksperimentalna istraživanja ravninskih procesa ukazuju na izvjesne specifičnosti ovog procesa.

Neke mogućnosti eksperimentalne verifikacije ravninskih procesa izložene su u radu [21], a detaljnija metodologija je obradjena u [22].

Za kvalitativnu procjenu procesa presovanja prikladan je metod nanošenja i praćenja deformacije koordinatne mrežice [23].

Za eksperimentalna istraživanja korišten je aluminijum (Al.99,5) radi izrazito linearno očvršćavajuće karakteristike [24].

Prizmatične gredice su radjene iz dva dijela $2x$ ($11x28x40$) mm i na svakoj polovini gredice je utisnuta kvadratna koordinatna mrežica dimenzija $1x1$ i $2x2$ mm.

Presovanje istiskivanjem je ostvareno sa četiri stepena redukcije:

$$\lambda = 1,25 ; 2,0 ; 2,73 \text{ i } 4,0$$

i sa konačnom širinom ravninskih otpresaka:

$$b_1 = 22,4 ; 14,0 ; 10,25 \text{ i } 7,0 \text{ mm}$$

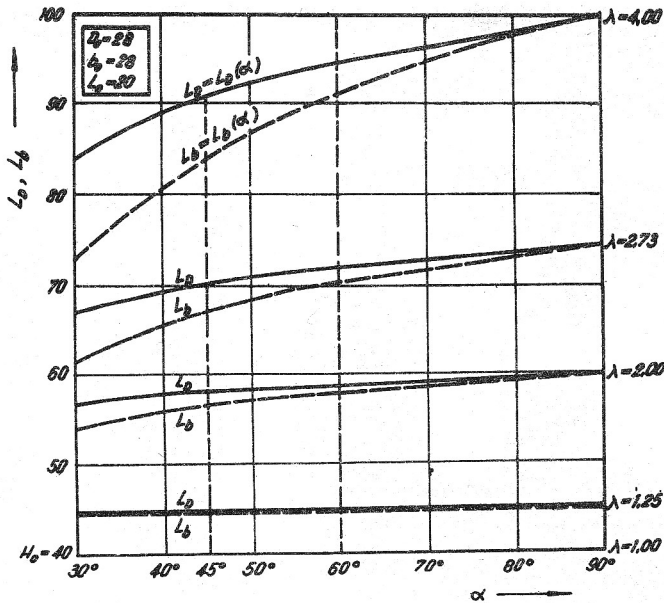
Za svaki stepen redukcije variran je centralni ugao kalupa za presovanje:

$$\alpha = 30^\circ ; 45^\circ ; 60^\circ \text{ i } 90^\circ.$$

Fotografije ravninske gredice sa utisnutom koordinatnom mrežicom i nekih otpresaka ravninske deformacije prikazani su na sl. 8.

Kontaktne uslovi i temperaturno polje imaju presudan značaj na oblik, dimenzije i lokaciju zone deformacije, a posebno na kvalitet otpreska. Kod rada u hladnom stanju zona deformacije leži pri dnu ravnog kalupa, tako da tiskač pomjera metal gredice kao elastično tijelo. Iz prikazanih fotografija (sl. 8) se uočava da utisnuta koordinatna mrežica, nakon presovanja, u području glave otpreska pokazuje malu neravnomjernost deformacionog stanja. Ovakav proces je najpoželjniji jer daje visok kvalitet otpreska, a ostvaruje se u alatu sa poliranim radnim površinama uz efektivno podmazivanje i pri umjerenim brzinama deformacije.

Mjerenja sile presovanja pokazuju u prvoj fazi nagli porast probne sile sa povećanjem hoda tiskača. Porast sile u početku rada uslovljen je popunjavanjem kon-



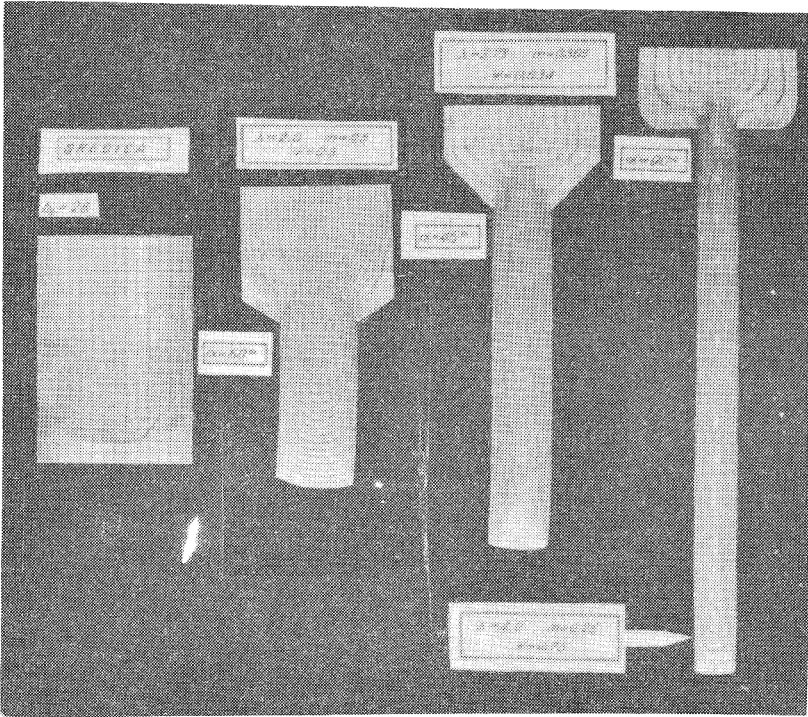
Sl. 7 Uporedjenje ukupnih dužina osnosimetričnih i ravninskih otpresaka pri varijaciji stepena redukcije i ugla kalupa

tejnara kalupa za presovanje (usljed sabijanja gređice), a zatim utiskivanjem gređice u radnu zonu kalupa za presovanje i istiskivanjem otpreska.

Položaj maksimuma probne sile kao i njegova apsolutna vrijednost rastu sa povećanjem stepena redukcije. Eksperimenti ukazuju na relativno manju zavisnost sile presovanja od centralnog ugla kalupa za presovanje, iako većina eksperimenata pokazuje da slabi minimum pada u područje centralnog ugla kalupa od oko 45° (teoretska vrijednost optimalnog ugla - minimalnog energetskog bilansa iznosi $42^\circ 43'$).

Nakon pojave maksimuma dalji tok probne sile je prilično ravnomjeran i pokazuje manju zavisnost od hoda tiskača. Ovo je faza stacionarnog procesa u kojoj se postižu najkvalitetniji otpresci (kod proba ova faza se fiksira graničnicima u alatstvu zavisnim od stepena redukcije otpreska).

Eksperimenti presovanja metodom istosmjernog istiskivanja, u uslovima istoimene naponske šeme, realizovani su sa stepenom redukcije $\lambda = 4,0$ što odgovara stepenu deformacije $\psi = 0,75 = 75\%$. Iako granične mogućnosti preoblikovanja



Sl. 8 Fotografije gredice (A1 99,5) i dijela ravninskih otpresaka sa kojima su vršeni eksperimenti

sa ovim vrijednostima još nisu ni izdaleka iscrpljene, ove vrijednosti znatno premašuju i teoretske granične vrijednosti idealizovanog procesa izvlačenja određene prema (15). Radi toga proces presovanja metodom istosmjernog istiskivanja spada u najprogresivnije tehnološke metode prerade metala.

Literatura

1. Mase G. Theory and Problems of Continuum Mechanics. Mc Graw Hill. London, 1970.
2. Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. Vol. I. Mc Graw Hill. London, 1950.
3. Mendelson A. Plasticity: Theory and Application. The Macmillan Company. New York, 1968.
4. Musafia B. Inovacije u tehnologiji presovanja istiskivanjem. Putevi i dostignuća. Republički prosvjetno-pedagoški zavod. Godina XI Br.1. Sarajevo, 1976.

5. Musafia B. Granični stepen deformacije procesa plastične obrade sa pozitivnim radnim naponom. Strojniški Vestnik. SV-XII-2. Ljubljana, 1967.
6. Tarnovskij I.J. i dr. Teorija obrabotki metallov davleniem. Metallurgizdat. Moskva, 1963.
7. Thomsen E.G. i dr. Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing. The Macmillan Company. New York, 1965.
8. Reiner M. Rheologie in elementarer Darstellung. Carl Hanser Verlag. München, 1968.
9. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford University Press, 1971.
10. Gubkin S.I. Plastičeskaja deformacija metallov. Tom II. Metallurgizdat. Moskva, 1961.
11. Johnson W. Engineering Plasticity. Van Nostrand Reinhold. London, 1973.
12. Musafia B. Primjena ekstremalnih principa teorije plastičnosti u tehnologiji obrade deformacijom. IX Savjetovanje proizvodnog mašinstva. Zbornik radova. Niš, 1974.
13. Unks ov E.P. Inženjerna teorija plastičnosti. Mašgiz. Moskva, 1959.
14. Musafia B. Linearizacija uslova plastičnog tečenja. Zbornik radova Katedre za proizvodnu tehniku Mašinskog fakulteta. Sarajevo, 1969.
15. Musafia B. Analitički metod određivanja specifičnog deformacionog otpora kao funkcije deformacije. II Savjetovanje proizvodnog strojarstva. Zbornik radova. Zagreb, 1966.
16. Bauder U. Tiefziehen von Hohlkörpern aus dicken Stahlbechen. Stahl und Eisen 71, Nr. 10, 1951.
17. Musafia B. Primjenjena teorija plastičnosti. II dio. Univerzitet u Sarajevu, 1974.
18. Smirnov-Aljajev G.A. Soprotivlenie materialov plastičeskomu deformirovaniju. Mašgiz. Leningrad, 1963.
19. Musafia B. Metodski pristupi u istraživanjima nekih procesa plastične deformacije metala. XIII Jugoslovenski kongres racionalne i primjenjene mehanike. Zbornik radova K2. Jugoslovensko društvo za mehaniku. Beograd, 1976.
20. Pearson C.E. The Extrusion of Metals. Chapman and Hall. London, 1961.
21. Musafia B. Savremena teoretska i eksperimentalna dostignuća u području aplicirane teorije plastičnosti. IV Savjetovanje proizvodnog mašinstva. Zbornik radova. Sarajevo, 1968.
22. Holister G.S. Experimental Stres Analysis. Ar the University Press. Cambridge, 1967.

23. Žolobov V. V. Pressovanie metallov. Metallurgija. Moskva, 1971.
24. Musafia B. Istraživanje reoloških osobina materijala sa linearnom očvršćavajućom karakteristikom. Zbornik radova Katedre za proizvodnu tehniku Mašinskog fakulteta. Sarajevo, 1975.

B. Musafia

MODELSKA ANALOGIJA PROCESA
RAVNINSKOG DEFORMACIONOG STANJA

Rezime

U članku se obradjuju principi modeliranja procesa presovanja i izvlačenja, sa ciljem iznalaženja korelacionih odnosa medju njima. Osnovni reporni elementi koncipiranih modela su: pri istom stepenu deformacije procesi redukcije kod presovanja i izvlačenja realizuju se u uslovima ravninskog deformacionog stanja, a kinematski uslovi zadani su ekvivalentnom jediničnom ulaznom brzinom.

Analiza procesa dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine zida omogućava iznalaženje radnih napona u funkciji od stepena deformacije, parametara procesa i materijala, uključujući i efekte očvršćavanja kod rada u hladnom stanju.

Kao tipičan predstavnik procesa sa istoimenom naponskom šemom analiziran je proces presovanja metodom istosmjernog istiskivanja. Sprovedeni eksperimenti pokazuju da su kod stepena deformacije od 75% dobiveni vrlo kvalitetni otpresci, iako pri tome granične mogućnosti preoblikovanja još nisu iscrpljene.

MODELLÄHNLICHKEIT DER EBENER
VERZERRUNGSZUSTAND PROZESSE

Zu sammenfassung

In dem Artikel werden Modellierungsprinzipien der Press und Ziehprozesse behandelt zwecks Ermittlung deren Korrelationsverhältnisse. Die grundlegenden Repère - Elemente nach denen die Modelle konzipiert werden sind: Realisierung des Reduktionsprozesses beim Pressen und Ziehen des gleichen Verformungsgrades durch Bedingungen eines ebenen Deformationszustandes, und kinematische Bedingungen werden durch äquivalente Einheitseintrittsgeschwindigkeit gegeben.

Die Analyse des Tiefziehprozesses mit Abstrecken ermöglicht die Ermittlung der Arbeitsspannungen in Abhängigkeit von dem Verformungsgrad, Prozess - und Werkstoffparametern, inclusive die Formänderungsfestigkeit - Effekte bei der Arbeit im kalten Zustand.

Als typischer Vertreter des Prozesses mit gleichnamigen Spannungsschema wurde Vorwärtsfliesspressen Prozess analysiert. Bei den durchgeführten Experimenten mit Verformungsgrad von 75% wurden Presstücke sehr guter Qualität gewonnen, obwohl dabei die Grenzmöglichkeiten der Formänderung bei diesem Prozess noch nicht erschöpft sind.