

ORIGINALNI NAUČNI RAD

M. Plančak\*

RAZLIČITE MOGUĆNOSTI ANALIZE PROCESA ISTOSMERNOG  
ISTISKIVANJA ČELIKA

Rezime

*Dat je prikaz nekih od mogućnosti izračunavanja veličine deformacione sile kod istosmernog istiskivanja čelika. Na jednom konkretnom primeru primenjene su metode: a) deformacionog rada; b) gornje granice; c) vizioplastičnosti.*

*Pored toga, izvršen je i eksperiment istosmernog istiskivanja kom prilikom je registrovana veličina deformacione sile. Detaljno je opisana eksperimentalno-teorijska tehnika vizioplastičnosti koju je autor sproveo na domaćem realnom materijalu (Č.1121). Rezultati ukazuju na postojanje razlike u vrednostima dobijene veličine deformacione sile. U odnosu na eksperimentalno dobijenu vrednost sile, odstupanja idu od -14% (metoda deformacionog rada) do +12,25% (metoda gornje granice). Rezultat dobijen metodom vizioplastičnosti najbliži je eksperimentalno dobijenoj veličini sile.*

FORWARD EXTRUSION - POSSIBILITIES OF THE PROCESS  
ANALYSIS

Summary

*Load estimation in forward extrusion of steel by means of visioelasticity method is presented in this paper. This load is compared with the: a) upper bound solution b) work of deformation method and with the load obtained c) by the experiment. Details of the applied visioelasticity technique are given. The difference between obtained results is up to 30%. Most realistic value of the load (closest to the experimental load) is obtained by visioelasticity method. Still, this method is suitable for more complex investigations, like strain and stress analysis, process kinetic etc. For simple load estimation visioelasticity is too complicated and time consuming.*

\* ) Plančak dr Miroslav, docent Fakulteta tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

## 1. UVOD

Proces istosmernog istiskivanja, koji se vrlo često u različitim varijantama primenjuje u praksi, često je analiziran od strane mnogih autora i to sa raznih aspekata. U tim analizama primenjene su razne metode, počev od onih najjednostavnijih ("inžinjerska metoda") pa do, u novije vreme veoma zastupljenih, numeričkih metoda. U zavisnosti od primenjene metode, variraju i dobijeni rezultati istraživanja.

Pitanje ocene i izbora određene metode za analizu procesa deformisanja ne može se posmatrati nezavisno od toga što se tom analizom želi postići. Ako je cilj određivanja osnovnih parametara procesa u praktične svrhe, npr. radi izbora mašine, u tom slučaju može poslužiti i jednostavnija metoda, no za potrebe određivanja kompleksnijih međuzavisnosti između pojedinih relevantnih parametara procesa obrade deformisanjem, neophodno je primeniti jednu (ili više) od savremenih metoda.

Prilog analizi mogućnosti i pogodnosti pojedinih metoda dao je i Cser /4/. On je počeo od toga da je za kompletno rešenje jednog procesa obrade deformisanjem neophodno rešiti sledeća pitanja:

- a) Odrediti geometriju priprema
- b) odrediti potrebne sile deformisanja, deformacioni rad
- c) odrediti veličinu i raspored kontaktnih napona
- d) odrediti raspored deformacija po celoj zapremini obradka
- e) odrediti raspored napona po celoj zapremini obradka
- f) odrediti kinematiku deformisanja materijala
- g) analizirati problem obradivosti materijala
- h) odrediti potreban broj i redosled potrebnih operacija za dobijanje gotovog dela.

Navedena pitanja (a-h) na određeni način ilustruju kompleksnost jednog procesa obrade deformisanjem. Svako od tih pitanja predstavlja jednu posebnu problemsku celinu.

T.1.

METODA	Delovi jednostavne geometrije								Delovi sa komplikovanom geometrijom								Materijal sa ojačanjem							
	b	c	d	e	f	g	h		b	c	d	e	f	g	h		b	c	d	e	f	g	h	
1. Metoda preseka	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	
2. Elementarne varijacione metode	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3. Linije klizanja	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4. Metoda gornje granice	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	
5. UBET	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	
6. Metoda konačnih razlika	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	
7. Metoda konačnih elemenata	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8. Vizuioplastična metoda	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	

Autor analizira tri vrste problema obrade deformisanjem: a) dobijanje delova jednostavne geometrije; b) dobijanje delova sa komplikovanom geometrijom; c) dobijanje delova od materijala koji ojačava, a za svaku od tih grupa problema određuje (ne)pogodnost pojedinih metoda analize (Tabela T1). (U tabeli jedino nije naveden problem određivanja geometrije pripremka).

Jedan drugačiji pristup posmatranju ove problematike dat je u radu /2/. Prema ovom autoru, sve metode analize i optimiranja procesa obrade deformisanjem mogu se svrstati u tri grupe: 1) eksperimentalne, 2) tehnika modela, 3) simulacija procesa matematičkim modelom uz upotrebu računara (Tabela T2). Zatim je, za svaku grupu ovih metoda data ocena i to po kriterijumu potrebnih investicija, utrošenog vremena,

T2

	Eksperiment I	Tehnika modela II	Računar III
Investicije	xxx	x	xxx
Utrošeno vreme	xxx	xx	x
Kvalifikacija personala	xx	xxx	xxx
Troškovi	xxx	x(xx)	xx(x)

xxx - visoko; xx - srednje; x - nisko

kvalifikacije personala i troškova.

Iz tabele se uočava da grupe metoda I i III zahtevaju znatno veće investicije od grupe II. Utrošak vremena je najveći kod eksperimentalnih metoda a najmanji kod računara, ali je zato kod eksperimentalnih metoda potrebna nešto niža kvalifikacija personala nego što je to kod metoda II i III. Sa aspekta troškova najpovoljnije su metode iz grupe II.

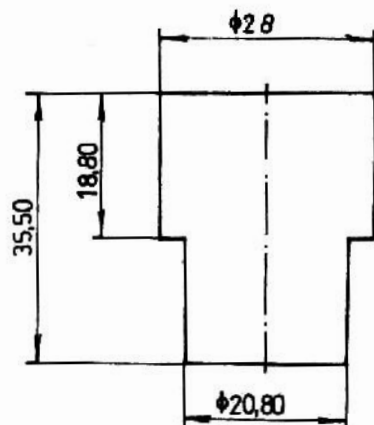
Potrebno je naglasiti da kod određenih metoda postoji predodređenost za pojedine probleme obrade deformisanjem. Tako, na primer, problemi trenja i habanja alata rešavaju se pretežno eksperimentalnim putem, problemi tečenja materijala metodom tehnike modela dok se problemi rešavanja naponsko-de-

formacionih odnosa pretežno rešavaju teoretskim ili teretsko-eksperimentalnim putem (grupe metoda I i III, tabela T2).

U želji da se ilustruju različiti pristupi rešavanju jednog te istog problema kao i da se kompariraju dobijeni rezultati, u ovom radu se prezentuju 4 različita načina odredjivanja veličine deformacione sile u procesu istosmernog istiskivanja čelika:

- Metoda deformacionog rada (Storožev/Popov /3/) - I
- Gornja granica (Avitzur /1/) - II
- Metoda vizioplastičnosti (eksperimentalno-teoretska istraživanja autora rada) - III
- eksperimentalno odredjivanje deformacione sile u realnom procesu istiskivanja.

Geometrija obradka za koji je odredjena veličina deformacione sile prikazana je na slici 1. Materijal uzorka je Č.1121 čija je kriva deformacionog ojačavanja odredjena



S1.1. Geometrija obradka

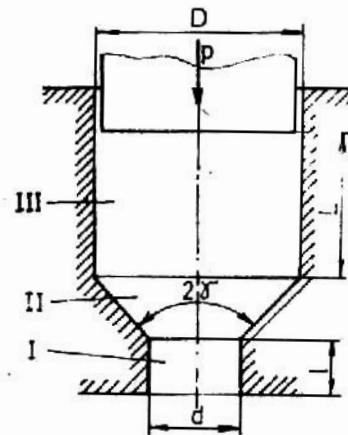
eksperimentalno /5/ i iznosi:

$$\sigma_e = 66 \cdot \phi^{0,23} \quad (1)$$

## 2. VELIČINA DEFORMACIONE SILE

### 2.1. Metoda deformacionog rada (Storožev/Popov) - I

Prema Storožev/Popovu /3/ zapremina materijala kod istosmernog istiskivanja može se podeliti u tri različite zone.



Sl.2. Različite zone po zapremini obradka prema /3/

**Zona I** - već deformisani materijal ističe kroz otvor matrice. U ovoj zoni ne dolazi do plastičnog deformisanja materijala nego je otpor isključivo rezultat trenja na zidu otvora matrice dužine "l". Prema /3/ taj specifični otpor iznosi:

$$p_1 = \sigma_e \frac{4\mu_1 \cdot l}{d} \quad (2)$$

**Zona II** - je zona gde se odvija proces deformisanja. Uz pomoć metode o deformacionom radu autori dolaze do sledećeg izraza za specifični otpor u ovoj zoni:

$$p_2 = \sigma_e \left( \frac{\mu_2 + 0,5}{2 \sin \gamma} + \frac{2}{1 + \cos \gamma} \right) \ln \frac{F}{f} \quad (3)$$

Ako je stvarni ugao matrice veći od ugla tečenja (to je ugao u okviru kojeg se još odvija tečenje materijal, ostali deo materijala u "ćoškovima" matrice ne uzima učešće u tečenju) onda se prema autorima u j-ni (3) za ugao  $2\gamma$  unosi ugao tečenja ( $2\gamma = 130^\circ$ ).

**Zona III** - je cilindrični kruti blok a specifični otpor koji se javlja u ovoj zoni je:

$$p_3 = \sigma_{e3} \frac{2L}{D} \quad (4)$$

Rezultujući specifični otpor za proces istosmernog istiskivanja iznosi:

$$p = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p = \sigma_{e1} \frac{4\mu_1 \cdot l}{d} + \sigma_{e2} \left( \frac{\mu_2 + 0,5}{2 \sin \gamma} + \frac{2}{1 + 2 \cos \gamma} \right) \ln \frac{D_0^2}{d^2} + \sigma_{e3} \frac{2L}{D} \quad (5)$$

a deformaciona sila:

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{D^2 \pi}{4}$$

U gornjim izrazima su:

$\sigma_{e1}, \sigma_{e2}, \sigma_{e3}$  - efektivni naponi u odgovarajućim zonama  
 $l, L, D, d$  - geometrijske veličine (videti crtež)

$\mu_1, \mu_2$  - odgovarajući koeficijenti trenja

$f = \frac{\pi d^2}{4}$  - površina izlaznog dela matrice

Žamenjujući u jednačinu (5) konkretne vrednosti, dobija se veličina ukupne deformacione sile:

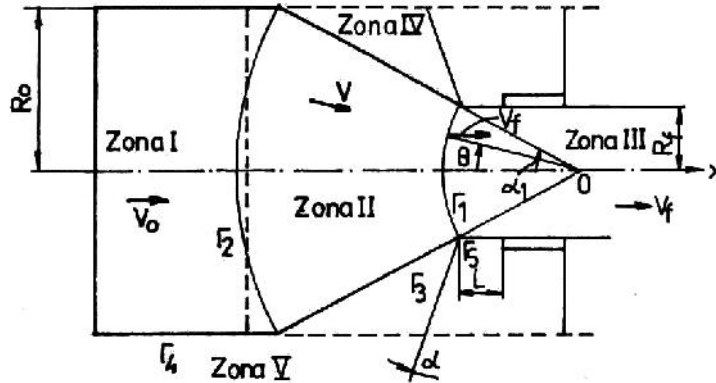
$$F = 47.310 \text{ daN}$$

## 2.2. Metoda gornje granice (Avitzur) - II

Iako koristi različitu metodu analize procesa, Avitzurov početni pristup problemu je vrlo sličan predhodno opisanom /1/. I ovde se ukupna zapremina materijala deli u III različite zone. Plastično deformisanje materijala obavlja se isključivo u zoni II i ukupna snaga deformisanja u toj zoni dobijena metodom gornje granice iznosi:

$$W_i = 2\pi \sigma_e \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \cdot f(\alpha) \quad (6)$$

Pored toga, pojavljuju se i gubitci snage na diskontinuitetima brzine  $\Gamma_2$  i  $\Gamma_1$  kao i usled trenja na površinama  $\Gamma_3$  i  $\Gamma_4$ :



Sl.3. Različite zone po zapremini obradka prema /4/

Ovi gubici iznose:

$$\begin{aligned}
 W_s &= W_{\Gamma_1, \Gamma_2} + W_{\Gamma_3} + W_{\Gamma_4} = \\
 &= \frac{2}{3} \sigma_e \pi \cdot v_f R_f^2 \left| \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \text{ctg} \alpha + m \text{ctg} \alpha \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} + m \frac{L_{\Gamma_5}}{R_f} \right| \quad (7)
 \end{aligned}$$

Ukupna snaga predstavlja zbir (6) + (7).

Slično kao i kod Strožev/Popova i Avitzur uvodi pojam kritičnog ugla. Ako je ugao matrice preveliki, stvara se "mrtva zona" u kojoj se materijal ponaša kruto. Trenje se u tom slučaju ne odvija između zida matrice i materijala, nego između "mrtve zone" i čestica iz zone II. Vrednost kritičnog ugla prema /1/ iznosi:

$$\alpha = \sqrt{\frac{3}{2} \ln \left( \frac{R_0}{R_f} \right)} \quad (8)$$

Jasno, ako je ugao matrice manji od kritičnog (8), ne dolazi do stvaranja "mrtve zone".



Ukupna deformaciona sila za istosmerno istiskivanje je, prema Avitzuru:

$$F = \frac{1}{v_0} (W_f + W_s) = \frac{1}{v_0} 2\pi\sigma_e v_f R_f^2 \ln \frac{R_0}{R_f} f(\alpha) + \frac{2}{3} \sigma_e \pi v_f R_f^2 \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha + m \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{R_0}{R_f} + m \frac{L_{\Gamma 4}}{R_f} \right) \quad (9)$$

U j-ni (9) su:

$R_0, R_f, L_{\Gamma 4}$  - geometrijske veličine (videti sliku)

$v_0$  - brzina alata

$\sigma_e$  - efektivni napon ( $\sigma_e = f(\phi)$ )

$f(\alpha)$  - funkcija, definisana prema [1]

$m$  - faktor trenja

$\alpha$  - ugao matrice (za slučaj  $\alpha < \alpha_{kr}$ ), ili  $\alpha = \alpha_{kr}$  kada je ugao matrice  $\alpha > \alpha_{kr}$

$v_f$  - izlazna brzina materijala

$L$  - konstruktivna veličina ( $L = 3 \text{ mm}$ )

Zamenjujući u jednačinu (9) konkretne vrednosti, vodeći računa da je  $v_f = v_0 \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^2$ , dobija se:

$$F = 62.300 \text{ daN}$$

### 2.3. Odredjivanje sile istiskivanja metodom vizioplastičnosti - III

Metoda vizioplastičnosti je eksperimentalno-teoretska metoda. Njenom primenom moguće je odrediti ne samo kinemat-ske parametre procesa nego i energetske (naponi, sila). Pri-likom odredjivanja napona i sile, polazi se od jednačina rav-noteže (u konkretnom slučaju je dato izvodjenje za aksijalno-simetrično deformisanje):

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

(10)

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0$$

Ove jednačine kombinuju se sa jednačinama koje predstavljaju vezu napona i brzina deformacije:

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_r &= \lambda(\sigma_r + p) \\
 \dot{\epsilon}_z &= \lambda(\sigma_z + p) \\
 \dot{\epsilon}_\theta &= \lambda(\sigma_\theta + p) \\
 \dot{\gamma}_{zr} &= 2\lambda \tau_{zr} \\
 \dot{\gamma}_{r\theta} &= \dot{\gamma}_{\theta z} = 0
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Dodatnim matematičkim operacijama, a na bazi (10) i (11), dolazi se do izraza za gradijent aksijalnog napona u obliku:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = \frac{2}{3} \sigma_e \left| \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\dot{\epsilon}} \right) - \frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{r \dot{\epsilon}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\gamma_{zr}}{\dot{\epsilon}} \right) \right|
 \tag{12}$$

Komponente brzina deformacija kao i efektivni napon određuju se eksperimentalno, da bi se zatim preko jednačine (12) dobila vrednost aksijalnog napona u relevantnim tačkama zapremine tela. Jedina tačka gde se na ovaj način ne može odrediti aksijalni napon jeste tačka u osi obradka jer za  $r=0$  pomenuti izraz postaje neodređen. Medjutim, zbog simetričnosti procesa u odnosu na osu obradka u toj tački važi:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = 0
 \tag{13}$$

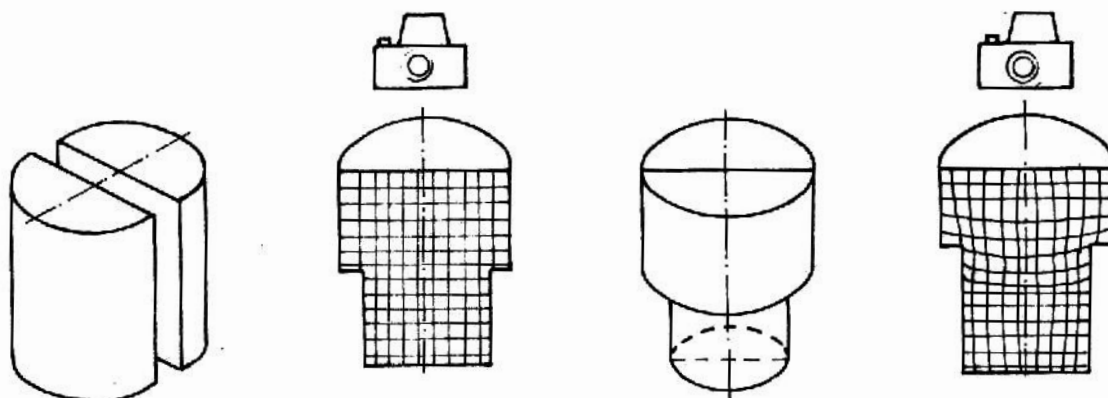
Iz gore prikazanog, vidi se da se problem određivanja aksijalne komponente u procesu aksijalno-simetričnog deformisanja svodi na problem identifikacije komponenti brzine deformacije i efektivnog napona u zoni deformisanja.

Veličina deformacione sile dobija se integracijom aksijalnog napona po površini:

$$F = \int \sigma_z dA
 \tag{14}$$

### 2.3.1. Eksperimentalni postupak vizioplastičnosti

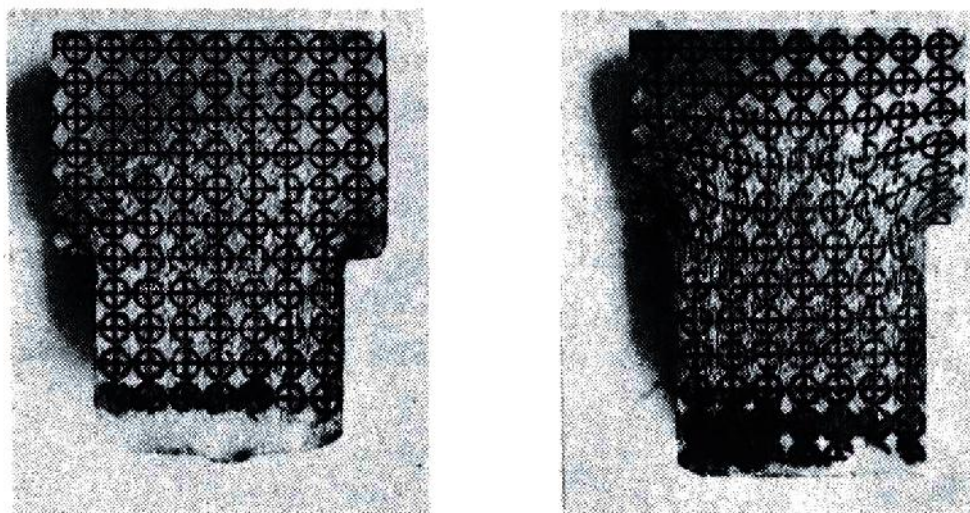
Prvi korak kod metode vizioplastičnosti je priprema uzorka. U konkretnom slučaju pripremak je sastavljen od dva polualjka (sl.4a) i deformisan do odredjenog stepena da bi zatim bio izbačen iz matrice a na njegovu meridijalnu ravan naneta merna mreža (sl.5a) koja je fotografisana. Taj trenutak predstavlja početak priraštaja koji se analizira. Uzorak je zatim ponovo sastavljen, postavljen u matricu i dalje deformisan. Deformisana merna mreža na kraju priraštaja ta-



Sl.4. Faze vizioplastične metode

kođe je fotografisana (sl.5b). Na taj način fiksirani su početak i kraj jednog priraštaja. Za taj priraštaj određuje se naponsko stanje i sila. Kako se radi o istosmernom istiskivanju, koje predstavlja stacionarni proces, to sila i naponi predstavljaju konstantne veličine u toku celog procesa /6/.

Podaci o pripremu: materijal je Č.1121,  $\frac{H_0}{D_0}=1$ ,  $D_0=28$  mm, podmazivanje sa  $MoS_2$ , spoljne površine su predhodno fosfatirane. Uporedjenjem fotografija (slajdova) nedeformisane i deformisane mreže dolazi se do podatka o pomeranju svake pojedine tačke na meridijalnoj ravni. Kako je bila merena



S1.5. Merna mreža na početku i završetku intervala i dužina trajanja intervala deformisanja  $\Delta t$ , to je moguće dobiti i brzine pomeranja tačaka u aksijalnom i radijalnom pravcu:

$$v_r = \frac{\Delta S_r}{\Delta t}; \quad v_z = \frac{\Delta S_z}{\Delta t} \quad (15)$$

$\Delta S_r$  - pomeranje tačke u "r" pravcu

$\Delta S_z$  - pomeranje tačke u "z" pravcu

$\Delta t$  - dužina trajanja intervala

Poznavanje rasporeda brzina omogućuje odredjivanje i brzina deformacije, prema:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r}; \quad \dot{\gamma}_z = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad (16)$$

Efektivni napon " $\sigma_e$ ", koji se takodje pojavljuje u osnovnoj jednačini vizioplastičnosti (12), odredjen je pomoću merenja tvrdoće (metoda etalon dijagrama /5/).

Na opisani način bili su odredjeni svi elementi potrebni za izračunavanje gradijenta aksijalnog napona u svakoj pojedinoj tački meridijalne ravni.

Raspored aksijalnog napona  $\sigma_z$  na ravnima  $z = \text{const}$  dobija se integracijom funkcije  $(\partial\sigma_z/\partial r) = f(r)$ :

$$\sigma_z = \int_0^r \sigma_e \left| \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\dot{\epsilon}} \right) \left( \frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{r\dot{\epsilon}} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\dot{\gamma}_{zr}}{\dot{\epsilon}} \right) \right| dr + K \quad (17)$$

Kako podintegralna funkcija u gornjem izrazu nije data eksplicitno nego diskretno (u konačnom broju tačaka), to je za rešavanje datog integrala korišćen metod numeričke integracije. Za dobijanje apsolutnih vrednosti aksijalnog napona neophodno je odrediti integracionu konstantu  $K$ . U ovom radu ova konstanta odredjena je pomoću predhodno odredjenog radijalnog napona na zidu matrice. Ovaj napon odredjen je eksperimentalno pomoću mernog pipka /5/.

Poznavanjem " $\sigma_r$ " na zidu matrice, može se izračunati i vrednost aksijalnog napona u toj tački preko:

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2}{3} \sigma_e \left( \frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z}{\dot{\epsilon}} \right) \quad (18)$$

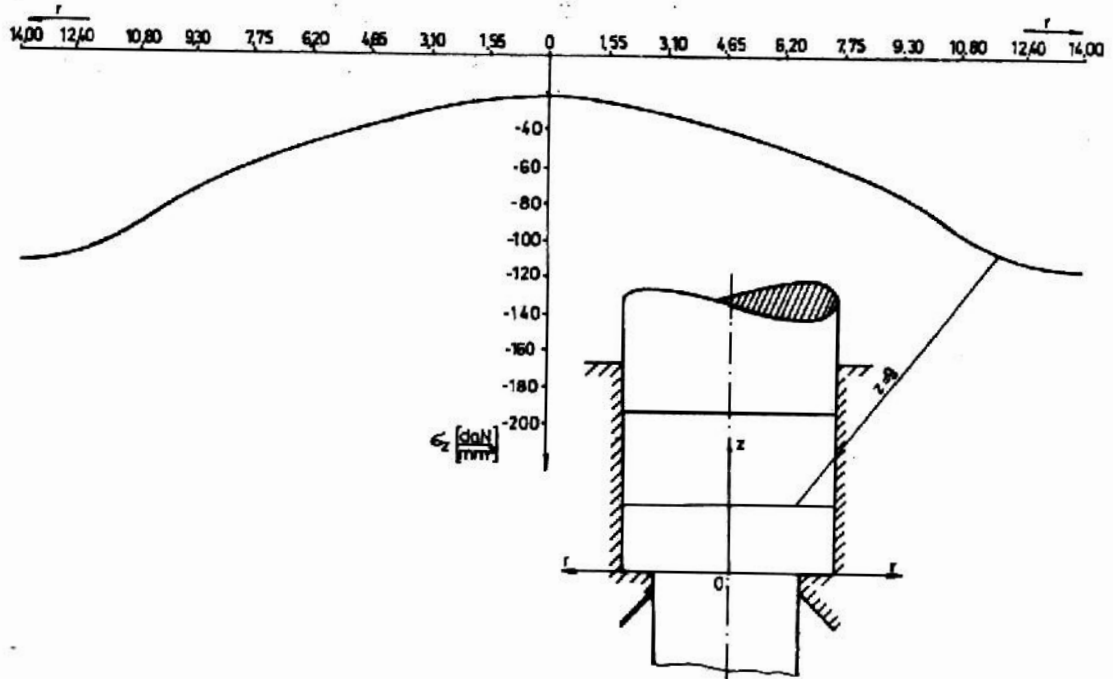
Na taj način izračunata vrednost aksijalnog napona predstavlja granični uslov preko koga se dolazi do integracione konstante  $K$  iz jednačine (17).

Na slici 6, prikazan je raspored aksijalnog napona ( $\sigma_z$ ) po preseku obradka za ravan  $z=9$  mm. To je ravan koja je najbliža žigu a još uvek je u plastičnoj oblasti.

Veličina deformacione sile može se sada dobiti integracijom aksijalnog napona za ravan  $z=9$  mm po površini, prema (14).

$$F = \int \sigma_z dA = \int \sigma_z \cdot 2r\pi dr = 2\pi \int_0^{R_0} r\sigma_z dr \quad (19)$$

U cilju integracije gornjeg izraza neophodno je na bazi poznatog aksijalnog napona u odredjenim tačkama za ravan  $z=9$  mm sačiniti novu funkciju  $F(r) = r\sigma_z$ , (tabela T3).



Sl.6. Raspored aksijalnog napona za ravan  $z=9$  mm.

T.3.

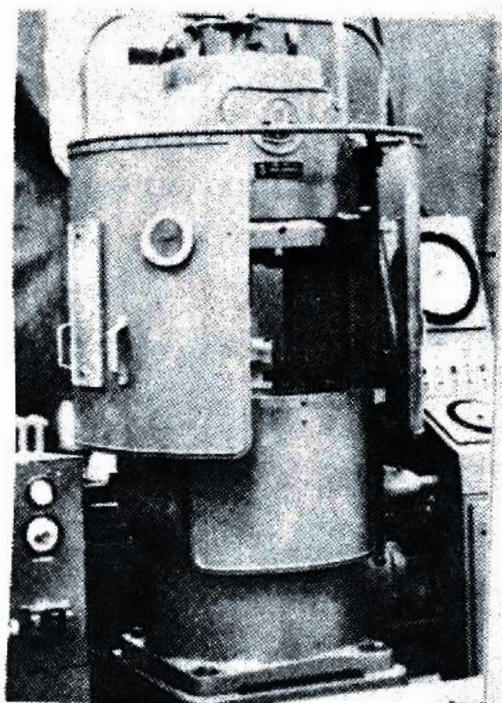
r (mm)	0	1,55	3,10	4,65	6,20	7,75	9,30	10,80	17,50	14,00
$F(r)=r\sigma_z$ $\left \frac{\text{daN}}{\text{mm}}\right $	0	-38,07	-97,96	-200,74	-325,87	-474,07	-690,80	-1024	-1378	-1582

Numeričkom integracijom ove funkcije prema (19) dobija se vrednost za deformativnu silu:

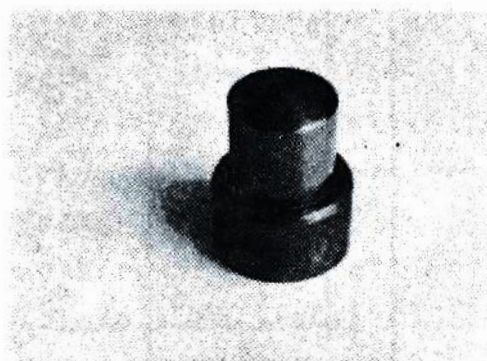
$$F = 2\pi \cdot 7783 = 48.900 \text{ daN}$$

## 2.4. Eksperimentalno određivanje sile istiskivanja

Eksperiment istosmernog istiskivanja izveden je na hidrauličnoj presi Sach & Kieselbach od 6300 kN. Veličina sile registrovana je na instrumentu koji je integralni deo mašine. Pripremak je predhodno fosfatiran a u toku procesa podmazivan sa  $\text{MoS}_2$ . Nakon početnog, nestacionarnog dela procesa, sila se stabilizovala na jednoj konstantnoj vrednosti. Istisnuto je 5 uzoraka a srednja vrednost sile je  $F = 55,500$  daN. Na slici 7. prikazana je mašina na kojoj su izvodjeni eksperimenti a na slici 8. obradak dobijen istosmernim istiskivanjem.



S1.7. Mašina na kojoj su vršeni eksperimenti



S1.8. Obradak

T.4.

Metoda	Postupak	Sila /daN/
1. Metoda deformacionog rada - I	$F = \frac{\pi D^2}{4} \left[ \sigma_{e1} \frac{\sigma_{H1}}{d} + \sigma_{e2} \left( \frac{\mu_2 + 0.5}{2 \sin \gamma} + \frac{2}{1 + 2 \cos \gamma} \right) \ln \left( \frac{D}{d} \right)^2 + \sigma_{e3} \frac{2L}{D} \right]$ <p>(Skica i objašnjenja pojedinih članova - videti stranu 6)</p>	47.310
2. Gornja granica - II	$F = \frac{1}{v_0} \left[ 2\pi \sigma_e v_f R_f^2 \ln \frac{R_0}{R_f} f(\alpha) + \frac{2}{3} \sigma_e \pi v_f R_f^2 \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha + m \operatorname{ctg} \alpha \right) \ln \frac{R_0}{R_f} + m \frac{L}{R_f} \right]$ <p>(Skicu i objašnjenja pojedinih članova - videti stranu 8)</p>	62.300
3. Viziplastična metoda - III	$\sigma_z = \int_0^r \frac{2}{3} \sigma_e \left  \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{z}{\varepsilon} \frac{r}{\varepsilon} \right) - \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{r} \frac{r}{\varepsilon} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{zr}{\varepsilon} \right) \right  dr + K ; F = \int \sigma_z dA$	48.900
4. Eksperimentalno određivanje sile	<p>Pripremak fosfatiran i podmazivan sa MoS<sub>2</sub>  Materijal: Č.1121, <math>\sigma_e = 66.4 \cdot 10^6</math> D  Stepen deformisanja: <math>\phi = 21 \frac{v_0}{d_1} = 0,6</math></p>	55.500



### 3. ZAKLJUČAK

Od većeg broja metoda kojima je moguće analizirati procese istiskivanja, u ovom radu primenene su tri: a) metoda deformacionog rada (I), b) metoda gornje granice (II) i c) metoda vizioplastičnosti (III). Pomoću navedenih metoda određena je veličina deformacione sile za slučaj istosmernog istiskivanja priprema od domaćeg čelika Č.1121.

T.5.

Postupak određivanja sile (Metoda)	Veličina dobijene sile (daN)	Odstupanje od eksperimentalno dobijene sile (F=55.500)
I /3/	47.310	- 14%
II /1/	62.300	+ 12,25%
III /5/	48.900	- 12%

Pored toga izvršen je i eksperiment istosmernog istiskivanja kojom prilikom je merena sila istiskivanja. U radu je detaljno prikazan teoretsko-eksperimentalni postupak vizioplastičnosti kojim je dobijen raspored aksijalnog napona po preseku uzorka a zatim - integrišući " $\sigma_z$ " po površini - i ukupna deformaciona sila. Vizioplastična istraživanja, kao i sam eksperiment istosmernog istiskivanja sprovedena su u Laboratoriji za obradu deformisanjem, Instituta za proizvodno mašinstvo FTN-a.

Rezultati ukazuju na postojanje razlika medju dobijenim vrednostima veličine deformacione sile (Tabela 5.). Maksimalno odstupanje medju rezultatima dobijenim različitim metodama je 26%. Ako se kao osnova za komparaciju usvoji eksperimentalno dobijena veličina deformacione sile (F=55.500 daN) onda metoda deformacionog rada daje za 14% manju silu (F=47.300 daN), metoda vizioplastičnosti za 12% (F=48.900 daN) dok jedino metoda gornje granice daje silu veću od one utvrdjene eksperimentom (F=62 300 daN).

Obzirom na učinjene pretpostavke i pojednostavljenja koja su neophodna kod svake od istraživanih metoda, realno je bilo očekivati da će se dobijeni rezultati medjusobno razlikovati.

Prema /7/, razlike u rešenjima istog problema obrade deformisanjem koji se rešava različitim metodama iznose od 30-50%. Rezultati prezentirani u ovom radu potvrđuju navedenu tvrdnju.

Od korišćenih metoda, vizioplastičnost je relativno najkomplikovanija. Ipak, iz ove činjenice ne treba zaključiti da ova metoda nije pogodna za rešavanje problema obrade deformisanjem, iz prostog razloga što ova metoda može da pruži znatno više od ostale dve. Metodom vizioplastičnosti moguće je dobiti ne samo ukupnu silu nego i raspored komponenti tenzora napona kao i elemente kinematskog polja po zapremini deformišućeg tela. Navedeni elementi neophodni su kod dubljih analiza procesa deformisanja.

#### LITERATURA

- [1] Avitzur: Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [2] Lange, K.: Neue Technologien der Kaltmassivumformung und ihre Optimierung - III Seminar über plastische Umformung, Győr, Juni 1985.
- [3] Storožev/Popov: Grundlagen der Umformtechnik VEB Verlag Technik-Berlin, 1968.
- [4] Cser, L.: Anwendbarkeit der Methoden der Plastizitätstheorie in der rechnergestützten technologischen Projektierung - III Seminar über plastische Umformung, Győr, Juni 1985.
- [5] Plančak M.: Naponsko-deformaciono stanje u procesima hladnog istiskivanja čelika, Dr. disertacija, N. Sad, 1984.
- [6] Shabaik, A.: Analysis of forming processes: experimental and numerical methods, Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, San Francisco, Dec. 1978.
- [7] Voelkner, W.: Spannungs-Kraft und Arbeitsermittlung beim Umformen, Fertigungstechnik und Betrieb 25(1975), 12.
- [8] Eberlein, L., Marx, G.: Wirkungswichtiger Einflussgrößen auf die Kontaktnormalspannungen und von Stahl, Fertigungstechnik und Betrieb 26 (1976) 10.