

Plančak, M.*
Bramley, A.**
Osman, F.***

ORIGINALNI NAUČNI RAD

ODREĐIVANJE DEFORMACIONE SILE U PROCESIMA ZAPREMINSKOG
DEFORMISANJA POMOĆU U B E T METODE

LOAD PREDICTION IN BULK DEFORMATION USING U B E T

Summary

UBET method has been used to predict load, metal flow, surface profile and local pressure in metal forming processes. This technique is based on the principle of subdividing the deformation zone into generalized elements (rectangular and triangular) for which general velocity field is introduced. Velocity field, together with boundary velocity discontinuities, flow data and friction data, enable calculation of total load. By means of optimizing routine, which is incorporated in the UBET, such velocity field is obtained which gives minimum value for the rate of energy dissipation. In this work process of simple upsetting of the cylinder has been analysed by UBET. The cylinder was divided automatically into standard rectangular elements, separated by surfaces of velocity discontinuities across which different flow conditions are applied. Detailed procedure for the estimation of admissible velocity field for one generalized rectangular element is presented. Equations for the velocity field for triangular generalized elements as well as total load estimation is given. Process has been analyzed in an incremental manner. The initial dimension of billet and die are given through a set of coordinates which describe geometry of the process. The incremental procedure flow chart is presented and analysed. The load-displacement relationship for three different billet geometries was obtained. Results are compared with those obtained by SLAB method and by experiment. UBET simulation was carried out with and without strain hardening. Good agreement between experiment, SLAB method and UBET with strain hardening is obtained.

* Plančak dr. Miroslav, dipl. ing., docent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, Vladimira Perića-Valtera 2.

** Bramley A., Profesor Dr. University of Bath, School of Mechanical Engineering England

*** Osman F., Lecturer, Dr. University of Bath, School of Mechanical Engineering England

Rezime

UBET metoda koristi se za određivanje ukupne deformacione sile, toka materijala, geometrije slobodnih površina a u novije vreme i za određivanje površinskih pritisaka (kontaktnih napona) između alata i materijala. Osnovni princip ove metode je podela zone deformisanja na jedinične elemente za koje se definišu standardizovana polja brzina. Poznavanjem kinematike procesa moguće je odrediti ukupnu snagu i potrebnu deformacionu silu. Kako u jednom procesu deformisanja postoji veliki broj dozvoljenih kinematskih polja, to UBET sadrži i optimizacionu proceduru. U radu je dat algoritam UBET programa. Na primeru slobodnog sabijanja ilustrovana je primena UBET-a. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim primenom metode preseka i dobijenim eksperimentalno.

1. UVODNA RAZMATRANJA

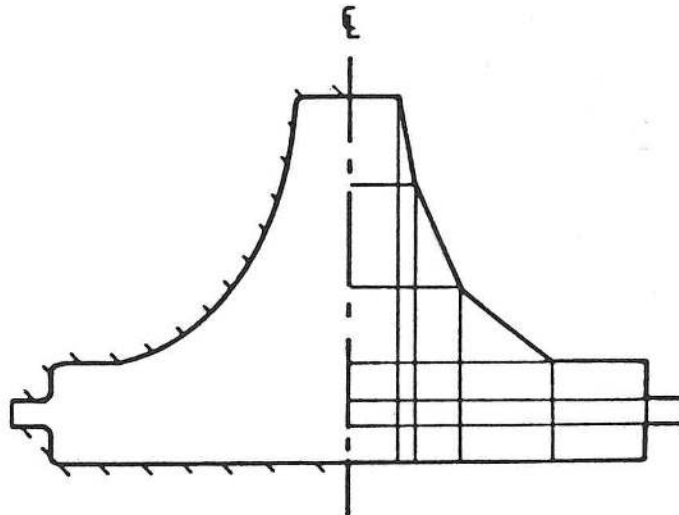
Jedan od najviše primenjivanih i najdalje razvijenih vidova metode gornje granice je UBET-postupak (UBET=Upper Bound Elemental Technique). Osnove ovom principu postavio je Kudo [1] a nagli razvoj i dalje usavršavanje UBET-a nastavljeno je u poslednjih desetak godina i to zahvaljujući pre svega razvoju računarske tehnike.

Pomoću UBET-a moguće je odrediti ne samo ukupnu silu deformisanja (što je slučaj sa "klasičnim" gornjegraničnim postupkom) nego i tok materijala, određivanje optimalne geometrije priprema, određivanje geometrije obradka (u slučajevima gde ona nije jednoznačno određena alatom), a u najnovije vreme UBET omogućava izračunavanje kontaktnih pritisaka između alata i materijala.

Osnovni princip primene UBET-a u analizi procesa deformisanja sastoji se u tome da se telo, čija se deformacija posmatra, izdeli ravnim površinama na prštenaste elemente (tz. jedinične elemente) koji za osnovu imaju četvorougao ili trougao. Svaka takva površina razdvaja po dva elementa i predstavlja istovremeno i površinu diskontinuiteta brzina. Za svaki oblik elementa razvijena je metoda određivanja brzina kretanja čestica unutar elementa a time i brzina na njegovim granicama. Kada je poznato kinematsko polje unutar svakog elementa moguće je odrediti ukupnu snagu deformisanja, dok brzine na granicama između pojedinih elemenata omogućuju određivanje snage koja se gubi na diskontinuitetima. Snaga koja se gubi na spoljašnje trenje određuje se takodje na osnovu brzina kretanja čestica na granicama između elemenata (materijala) i alata.

2. KINEMATSKO POLJE PO ZAPREMINI JEDINIČNOG ELEMENTA

U podeli tela na pojedine jedinične elemente polazi se od zahteva da stvarna zapremina tela što vernije bude reprezentovana tim elementima. Na slici 1. prikazan je stvarni oblik tela (sa leve strane ose) i njegova interpretacija preko jediničnih elemenata

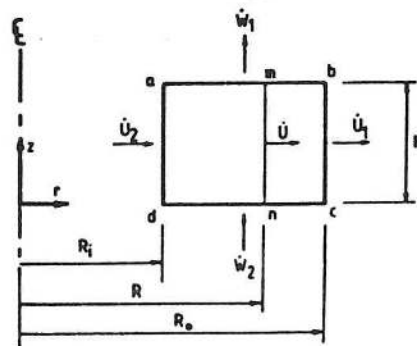


Sl. 1. Podela tela na jedinične elemente prema [4]
 Fig. 1. Subdivision into generalized elements [4]

Prema [2] i [3] pravougaoni oblik i oblik trougla u potpunosti mogu da opišu sa zadovoljavajućim nivoom tačnost svaki stvarni oblik tela.

U daljem tekstu daje se prikaz odredjivanja rasporeda aksijalne i radialne brzine po zapremini jediničnog elementa pravougaonog oblika, kao i odredjivanje snage za čisto deformisanje tog elementa.

Na slici 2. prikazan je element pravougaonog oblika (a, b, c, d).



Sl. 2. Jedinični pravougaoni element
 Fig. 2. Generalized rectangular element

Označena su karakteristična rastojanja od ose simetrije (R_i , R_o) kao i brzine materijala na ulazu u elementat (U_2 i W_2) i na izlazu iz elementa (U_1 i W_1). Takodje je prikazan i tekući prečnik (R) na kom se pojavljuje tekuća brzina (U). Za takav jedan element predpostavlja se paralelno polje brzina tj. $U=f(r)$ i $W=f(z)$. Iz jednakosti zapremine materijala koji ulazi i koji izlazi iz elemenata sledi:

$$\begin{aligned} U \cdot A &= U_2 \cdot A_2 + W_2 \cdot a_2 - W_1 \cdot a_1 \\ 2U\pi R H &= 2U_2\pi R_i H + \pi(R^2 - R_i^2)(W_2 - W_1) \\ U &= \frac{2U_2 R_i H + (W_2 - W_1)(R^2 - R_i^2)}{2RH} = f(R, R_i, U_2, W_1, W_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Daljim sredjivanjem dobija se:

$$U = \frac{R_i |2HU_2 + R_i(W_1 - W_2)|}{2RH} - \frac{R(W_1 - W_2)}{2H} \quad (2)$$

Aksijalna brzina u proizvoljnom preseku $z=\text{const}$, je:

$$W = W_2 + \frac{W_1 - W_2}{H} \quad (3)$$

Ako se uvedu oznake za konstante K_1 i K_2 dobijaju se konačni izrazi za:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{W_1 - W_2}{H} \quad \text{i} \quad K_2 = R_i |U_2 + R_i K_1| \\ U &= \frac{K_2}{R} - K_1 R = f(R) \end{aligned} \quad (4)$$

$$W = 2K_1 \cdot z + W_2 = f(z)$$

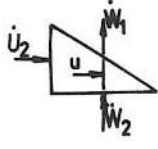
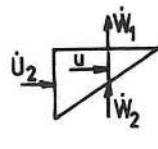
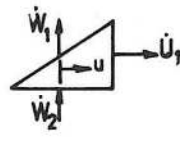
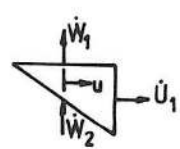
Brzine deformacije, neophodne za odredjivanje snage za čisto deformisanje jediničnog elementa, respektujući $|4|$, dobijaju se kao:

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr} &= \frac{\partial U}{\partial r} = - \left(\frac{K_2}{R^2} + K_1 \right) \\ \epsilon_{zz} &= \frac{\partial W}{\partial z} = 2K_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\epsilon_{\theta} = \frac{U}{R} = \frac{K_2}{R^2} - K_1$$

Na sličan način mogu se prema [2] i [4] dobiti brzinska polja i za jedinični element trouglastog oblika, s tim što postoji razlika medju njima u pogledu orijentacije prema osi simetrije. Za svaki od jediničnih elemenata važi drukčije polje brzina.

T1

	$U = K_2 \frac{R_0 + R}{R}$ $K_1 = \frac{W_1 - W_2}{2H}$	$W = -K_2 \frac{z}{R} + W_2$ $K_2 = K_1 (R_0 - R_i)$
	$U = K_2 \frac{R_0 + R}{R}$ $K_1 = \frac{W_1 - W_2}{2H}$	$W = K_2 \frac{H - z}{R} + W_1$ $K_2 = K_1 (R_0 - R_i)$
	$U = -K_2 \frac{R + R_i}{R}$ $K_1 = \frac{W_1 - W_2}{2H}$	$W = K_2 \frac{z}{R} + W_2$ $K_2 = K_1 (R_0 - R_i)$
	$U = -K_2 \frac{R + R_i}{R}$ $K_1 = \frac{W_1 - W_2}{2H}$	$W = W_1 - K_2 \frac{H - z}{R}$ $K_2 = K_1 (R_0 - R_i)$

U tabeli T1 dati su ti različiti slučajevi položaja trouglastih jediničnih elemenata sa odgovarajućim brzinskim poljima.

3. UKUPNA SNAGA

Snaga za čisto deformisanje iznosi:

$$E_d = \frac{2}{3} \sigma_e \int \sqrt{\frac{1}{2}(\epsilon_r^2 + \epsilon_z^2 + \epsilon_\theta^2)} dV$$

Zamenom (5) kao i $dv=2r\pi drdz$ u gornji izraz dobija se:

$$E_d = \frac{2}{3} \sigma_e \cdot 2 \cdot \pi \int_{Ro}^{R_1} \int_0^H \sqrt{\left(-\frac{K_2}{R} - K_1\right)^2 + 4K_1^2 + \left(\frac{K_2}{R} - K_1\right)} \, drdz$$

Sredjujući gornji izraz dobija se konačan oblik izraza za snagu čistog deformisanja jediničnog elementa pravougaonog oblika:

$$E_d = \left\{ \frac{2\pi}{\sqrt{3}} H \sigma_e \left[f(Ro) - f(Ri) - K_2 \ln \left(\frac{K_2 + f(Ro)}{K_2 + f(Ri)} \cdot \frac{Ri^2}{Ro^2} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

gde su:

$$f(ro) = (K_2^2 + 3K_1^2 Ro^4)^{1/2}$$

$$f(Ri) = (K_2^2 + 3K_1^2 Ri^4)^{1/2}$$

Poznajući brzine po celoj zapremini svakog jediničnog elementa pa i na njihovim graničnim površinama, moguće je odrediti gubitke snage na diskontinuitetima kao i na spoljašnje trenje. Na slici 4. prikazana su dva susedna jedinična elementa sa površinom dodira "s", koja je istovremeno i graniča diskontinuiteta. Razlika brzina na toj granici je:

$$dV = Ua - Ub \quad (7)$$

Poznajući tu razliku brzina kao i veličinu površine diskontinuiteta, određuju se gubici snage usled diskontinuiteta brzina.

Gubici snage usled spoljašnjeg trenja takodje se određuju uz pomoć brzine kretanja čestica na graničnim površinama materijal-alat (sl. 5.).

Ukupna snaga dobija se kao zbir snaga za čisto deformisanje, snaga na diskontinuitetu i snage usled spoljašnjeg trenja, i to uzimajući u obzir jedinične elemente od kojih je izkomponovano telo:

$$E_{TOT} = \sum_1^n E_d + \sum_1^{n_1} E_{dis} + \sum_1^{n_2} E_{Fr}. \quad (8)$$

n - broj jediničnih elemenata

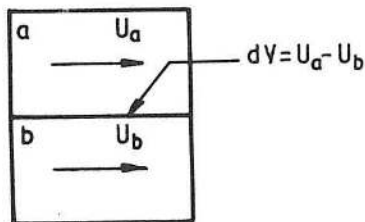
n_1 - broj površina diskontinuiteta

n_2 - broj površina kontakata alat-materijal

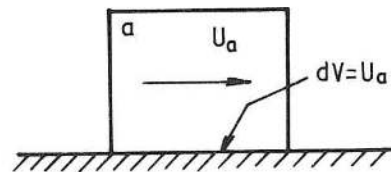
Ukupna deformaciona sila iznosi:

$$F = \frac{E_{TOT}}{V_{a1}} \quad (9)$$

Ukoliko se telo podeli na veći broj jediničnih elemenata utoliko se dobija polje brzina koje je bliže realnom pa je tako i krajnji rezultat (ukupna snaga, deformaciona sila i srednji pritisak na alat) realniji. Na sl. 6 prikazana su dva slučaja UBET-analize procesa slobodnog sabijanja: u prvom slučaju (A) telo je izdeljeno na 4 jedinična elementa a u drugom (B) na 16. Zbog simetrije procesa posmatraće se samo jedna četvrtina zapremine tela. Predpostavlja se da je brzina alata $V_a = -1$ a da je proces simetričan i u odnosu na N-N osu, tj. da tačke na toj osi imaju aksijalnu brzinu $V_{n-n}=0$.



Sl. 4. Kontakt dva jedinična elementa
Fig.4. Contact between two elements



Sl. 5. Kontakt sa alatom
Fig.5. Contact with die

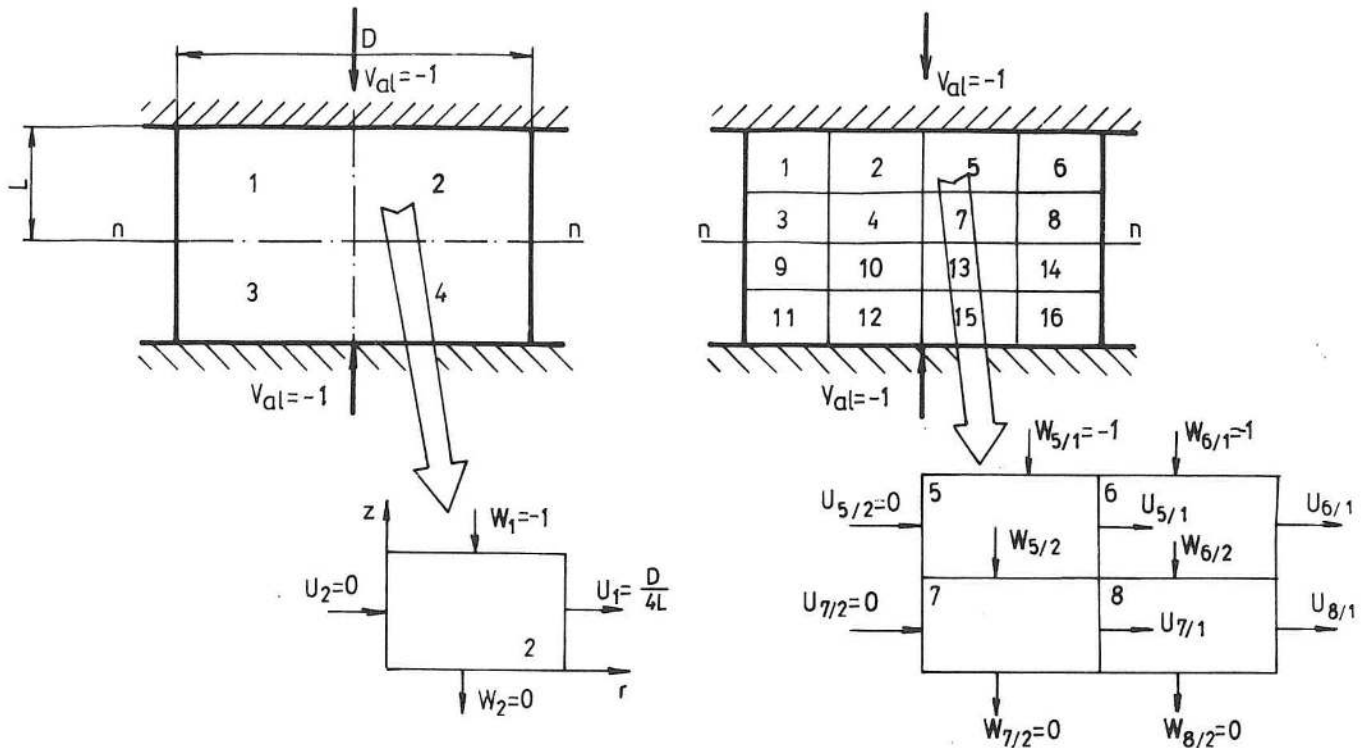
Slučaj A:

Brzinsko polje unutar jediničnog elementa 2 potpuno je definisana brzina alata ($V_a=-1$), graničnim uslovima ($U_2=0$, $W_2=0$) i geometrijskim odnosima jediničnog elementa i ukupnog tela. Kinematsko polje unutar elementa 2 ima oblik:

$$U = \frac{R}{2L} \quad ; \quad W = -\frac{Z}{L}$$

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{1}{2L} \quad ; \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{L} \quad ; \quad \epsilon_Q = \frac{U}{R} = \frac{1}{2L}$$

Na osnovu poznatog kinematskog polja lako se određuju elementi ukupne snage.

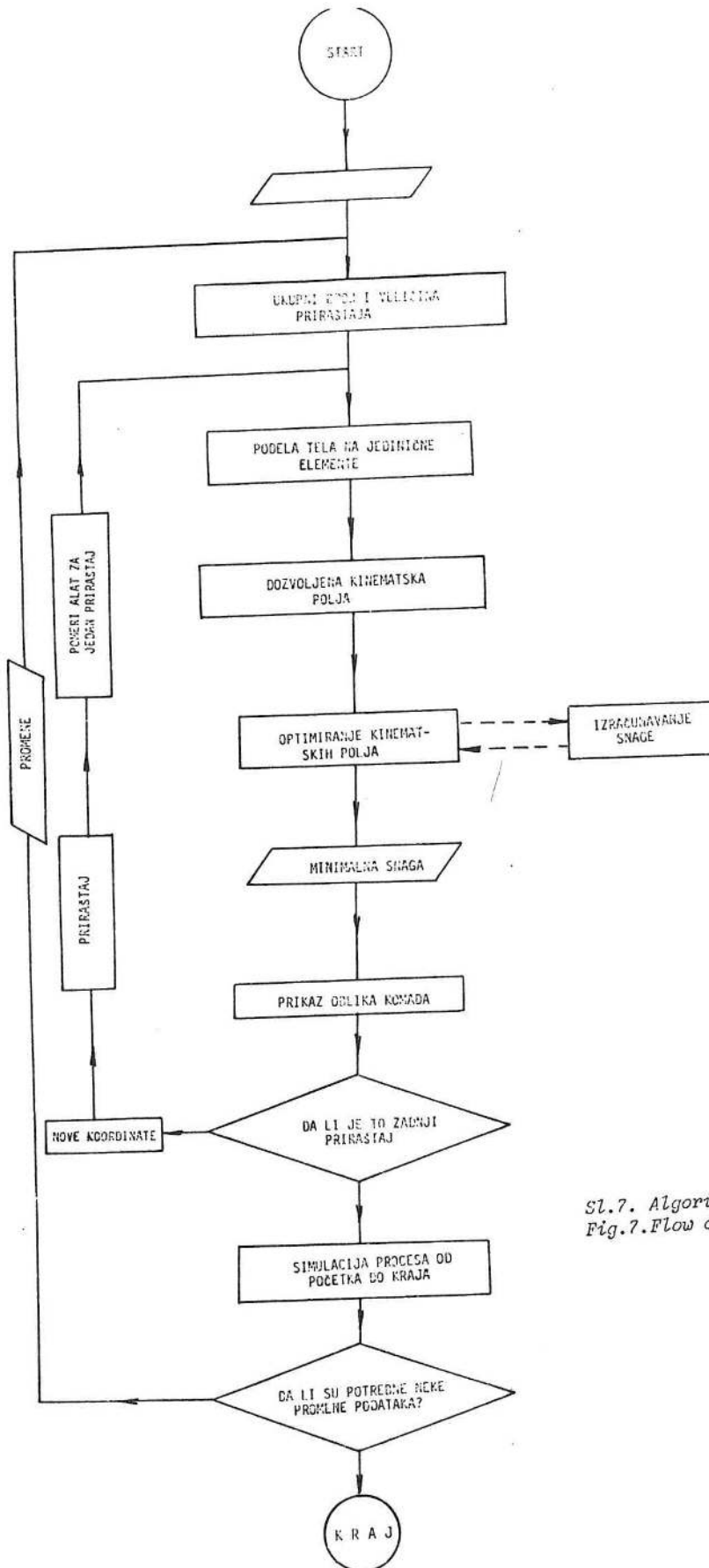


Sl. 6. Dva načina podele tela na jedinične elemente
 Fig.6. Two possibilities of subdivision into generalized elements

Slučaj B:

U ovom slučaju četvrtina zapremine tela reprezentovana je sa 4 elementa (5-8). Kinematsko polje nije jednoznačno određeno graničnim uslovima i brzinom alata, kako je to bilo u prethodnom slučaju, nego veći broj različitih kinematskih polja zadovoljava gore navedene uslove (varijabilne brzine za ovaj slučaj su, prema sl. 6, W_{52} , U_{51} i W_{62} i U_{71}). Ovakva podela tela omogućava izbor kinematskog polja koje predstavlja proces, s tim što se taj izbor vrši na bazi optimizacije. Kriterijum optimizacije je minimalna snaga, tj. onakav tok materijala koji zahteva minimalnu snagu. Jasno je da se na ovaj način dobija kinematsko polje koje je bliže realnom kinematskom polju nego što je to u slučaju A, ali je u slučaju B potrebna optimizacija, što znači da se sama procedura znatno usložnjava.

Za potrebe primene UBET-metode napisan je i korišćen program |4| čiji je algoritam dat na sl. 7. Sa algoritma se uočava da se proces analizira inkrementalno. Posle definisanja osnovnih podataka (geometrija, materijal) prog-



Sl.7. Algoritam programa
Fig.7. Flow chart

ram automatski deli telo na jedinične elemente a zatim definiše dozvoljena kinematska polja za te elemente. Sledeći korak je optimizacija tih polja. Procedura se ponavlja za svaki priraštaj, sve do kraja procesa.

4. SLOBODNO SABIJANJE

Analiziran je proces slobodnog sabijanja cilindra. Materijal: A199,5, kriva deformacionog ojačanja ima oblik (odredjen u posebnom eksperimentu)

$$\sigma = 8.7 + 6.8 * \phi \quad (\text{daN/mm}^2)$$

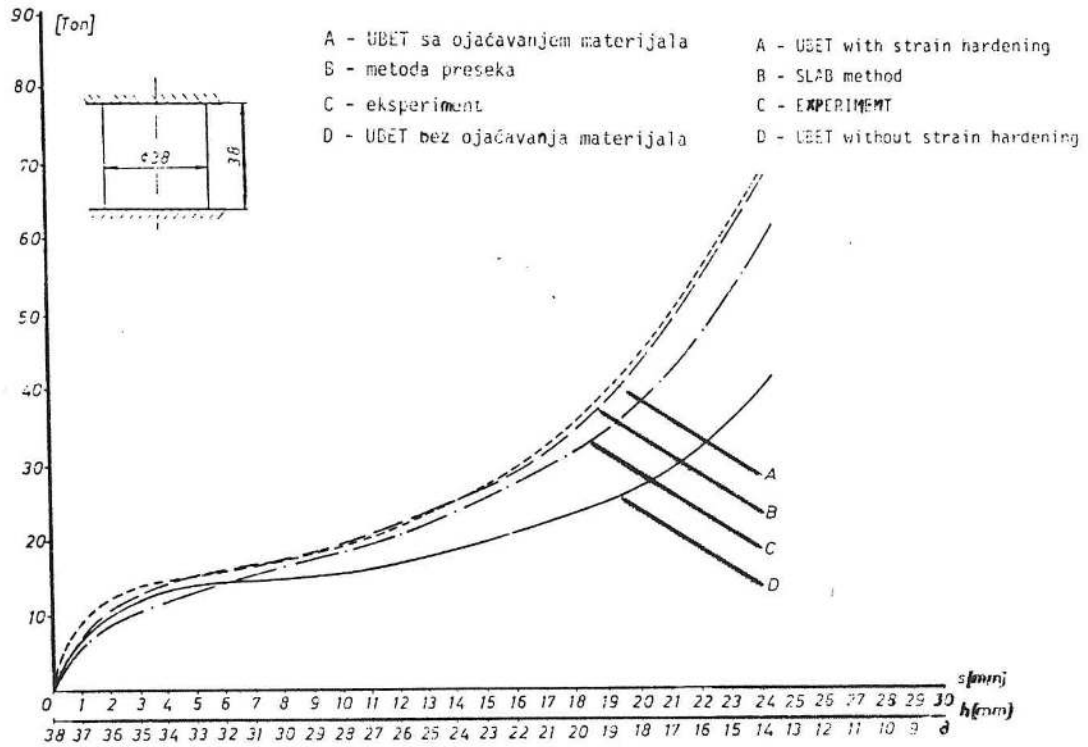
Geometrije priprema su:

- a.) \emptyset 38x38 (Ho/Do=1)
- b.) \emptyset 38x25 (Ho/Do=0.65)
- c.) \emptyset 38x19 (Ho/Do=0.5)

Proces slobodnog sabijanja analiziran je:

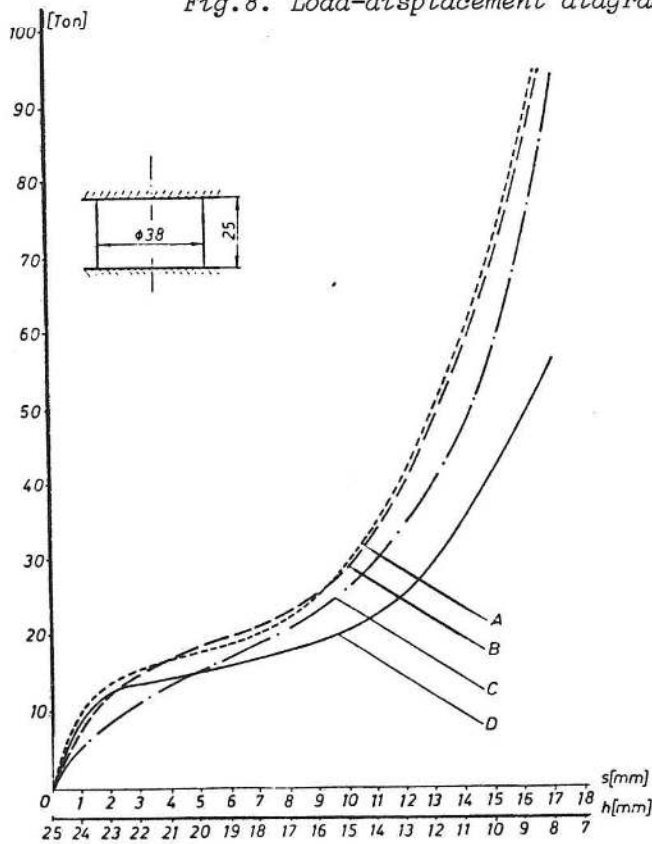
- metodom preseka
- UBET metodom
- eksperimentalno

Na slici 8-10 dat je dijagram sila-put za tri navedena slučaja deformisanja i to dobijen pomoću tri različite metode. Pri tome je UBET-metoda varirana 2 puta (sa i bez ojačanja materijala).



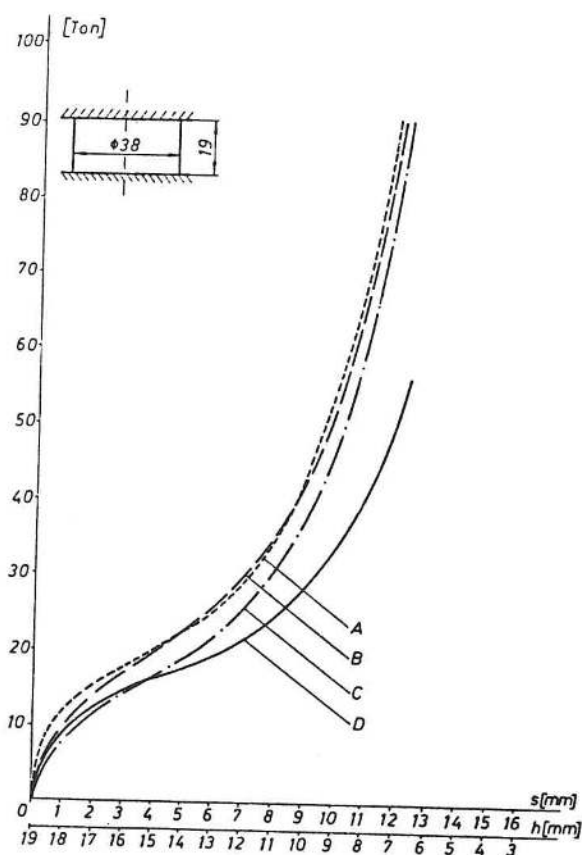
Sl. 8. Dijagram sila put za $\frac{H_o}{D_o} = 1$

Fig.8. Load-displacement diagram for $\frac{H_o}{D_o} = 1$



Sl.9. Dijagram sila put za $\frac{H_o}{D_o} = 0,65$

Fig.9. Load-displacement diagram for $\frac{H_o}{D_o} = 0,65$



Sl.10. Dijagram sila put za $\frac{H_0}{D_0} = 0,5$

Fig.10. Load-displacement diagram for $\frac{H_0}{D_0} = 0,5$

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Ideja Kuda [1] da se metoda godnje granice modificira u smislu separantne analize pojedinih elemenata ukupne zapremine tela a zatim dobijeni rezultati integrišu u jednu celinu, našla je svoje puno otelotvorenje brzim razvojem računarske tehnike. Razvijena je UBET metoda koja omogućuje brzu i pouzdanu analizu procesa obrade deformisanjem. Zahvaljujući sve višem nivou sofisticacije software-a i hardware-a omogućeno je praćenje i simulacija procesa u svakoj njegovoj fazi uz monitorovanje kinematskih, energetskih i geometrijskih parametra procesa.

Metoda UBET omogućuje:

- odredjivanje deformacione sile i srednjeg pritiska
- odredjivanje toka materijala
- odredjivanje optimalne geometrije i dimenzije priprema
- odredjivanje geometrije slobodnih površina obradka (koje nisu u dodiru sa alatom)

e) odredjivanje kontaktnih napona

U radu je prikazano definisanje kinematskog polja za osnovne jedinične elemente (pravougaone i trouglaste) kao i odredjivanje snage tj. ukupne deformacione sile. Ukazano je na to da je u najvećem broju slučajeva za jedan proces moguće definisati veliki broj polja brzina koja zadovoljavaju zahtevane uslove (kontinuitet i granični uslovi) i da je zbog toga u analizu neophodno uključiti proces optimizacije. Pri tome je kriterijum optimizacije minimum potrebne energije za deformisanje.

Analiziran je konkretan slučaj deformisanja-slobodno sabijanje - i na njemu ilustrovana metoda UBETA-a uz istovremeno uporedjenje dobijenih rezultata sa već "klasičnom" metodom preseka kao i sa eksperimentalnim rezultatom. Dat je algoritam UBET programa koji je koncipiran na inkrementalnom principu.

Dobijeni rezultati ukazuju na istu prirodu toka dijagrama sila-put po sve tri metode, s tim što metoda gornje granice daje najveće vrednosti za silu. To je i očekivano obzirom na samu prirodu gornje granice.

Potrebno je napomenuti da sadašnji nivo UBET-a omogućuje uključivanje trenja samo sa aspekta uticaja trenja na veličinu potrebne snage (sile) ali ne i sa aspekta uticaja trenja na geometriju obradka. Tako npr. UBET ne omogućava (za sada) predikciju naburivanja prilikom slobodnog sabijanja. U završnoj su fazi istraživanja na tom planu i za očekivati je da se uskoro pojave prvi rezultati.

LITERATURA

- [1] KUDO, H.: "Some analytical and experimental studies of axisymmetrical cold forging and extrusion" Int.J.Mech.Sci., 2, 1960, 102 and 3, 1961, p.91.
- [2] CRAMPORN, A.S.: "The application of the Upper bound elemental technique to the forging process" PhD Thesis, Leeds University, 1979.
- [3] BRAMLEY, A.: "Computer Aided Forging Design" Annals of the CIRP Vol. 36/1/1987.
- [4] OSMAN, F.H.: "Computerized simulation of forging processes", PhD Thesis, University, 1981.
- [5] PLANČAK, BRAMLEY, OSMAN: "Analiza procesa ravanskog suprotnosmernog istiskivanja metodom gornje granice", Zbornik radova Instituta za proizvodno mašinstvo br.5/6, Novi Sad, 1989.
- [6] THORNTON, BRAMLEY: "An approximate method for predicting metal flow in forging and extrusion operations" Proceedings the Institute of Mechanic of Engineers, Vol. 194 No.2, 1980.