

ORIGINALNI NAUČNI RAD

I. Trbojević, D. Marganović*

ANALIZA STEPENA ISKORIŠĆENJA DEFORMACIONOG
RADA U PROCESU OBRADJE VUČENJEM

Rezime

U radu je data računaska analiza uticaja pojedinih parametara procesa na stepen iskorišćenja deformacionog rada, kao i komparacija sa uticajem ovih parametara na deformabilnost materijala.

ANALYSE DES AUSNUTZUNGSGRADES DER DEFOR-
MATIONARBEIT IN ZIEHPROZESSEN

Zusammenfassung

In der Arbeit ist die rechnerische Analyse des Einflusses einzigen Parametern auf den Ausnutzungsgrad in Ziehprozessen gegeben. Gleichzeitig wurde verglichen was für ein Einfluss die gleiche Parametern auf die Umformbarkeit des Materials haben.

1. UVOD

U radu (2) izvršena je analiza deformabilnosti materijala preko funkcije stepena deformacije, čije izvodjenje je prikazano u radu (1). Rešavanje funkcije, sa variranjem brojnih uticajnih parametara, vršeno je pomoću računara. Postavljeni program može da posluži i za analizu uticaja pojedinih parametara na stepen iskorišćenja deformacionog rada, ako se on na pogodan način izrazi u funkciji stepena

*) Trbojević mr Ilija, dipl. ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

Marganović mr Dušan, dipl. ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za mernu tehniku i upravljanje, 21000 Novi Sad, Fruškogorska 14.

deformacije.

Analiza stepena iskorišćenja deformacionog rada (ili stepena efektivnosti deformacije) treba da pruži jasniju sliku o uticaju pojedinih parametara procesa na gubitke energije koji nastaju kao posledica odredjenih unutrašnjih otpora materijala i spoljnih otpora usled trenja na kontaktnim površinama. Energija koja se troši na savladjivanje ovih otpora, pored toga što predstavlja gubitak pretvara se u toplotu, povećavajući temperaturu u zoni deformacija, što može u odredjenim uslovima negativno da utiče na postojanost alata kao i na osobine izvučenog materijala. Ovaj problem posebno je izražen kod vučenja žice iz visokootpornih čeličnih materijala, kod kojih povišenje temperature utiče na ograničavanje stepena deformacije i brzine vučenja, od kojih direktno zavisi produktivnost proizvodnje.

2. STEPEN ISKORIŠĆENJA DEFORMACIONOG RADA

Stepen iskorišćenja deformacionog rada predstavlja odnos korisnog (ili idealnog) W_i i ukupnog deformacionog rada W_{uk} koji se troši u procesu obrade:

$$\eta = \frac{W_i}{W_{uk}} \quad (1)$$

Koristan deformacioni rad troši se na povećanje potencijalne energije materijala, što se izražava kroz promenu odredjenih fizičkih svojstava (čvrstoća, tvrdoća...) i adekvatan je radu koji je potreban da se izvrši ravnomerno deformisanje u uslovima jednoosnog naponskog stanja, bez uticaja trenja na kontaktnim površinama. Ovaj rad direktno zavisi od otpornosti materijala prema plastičnom deformisanju, i može se lako izračunati na osnovu poznate $k-\phi$ krive datog materijala:

$$W_i = V \int_{\phi_1}^{\phi_2} k d\phi = V \cdot a \quad (2)$$

gde je:

$$a = \int_{\phi_1}^{\phi_2} k d\phi - \text{specifični deformacioni rad po jedinici zapremine,}$$

V - zapremina,

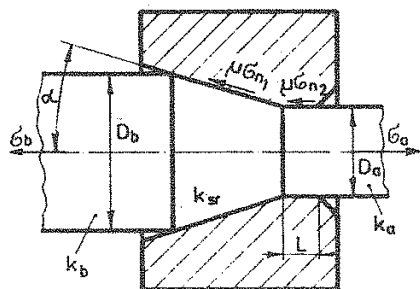
$k = k(\phi)$ - kriva specifičnog deformacionog otpora (kriva tečenja).

Ukupan deformacioni rad troši se na savladjivanje:

- deformacionog otpora (koristan rad)
- unutrašnjih otpora, koji nastaju usled savijanja i medjusobnog klizanja čestica materijala i
- spoljnih otpora, koji nastaju kao posledica trenja na kontaktnim površinama.

Praktično odredjivanje ukupnog deformacionog rada najlakše može da se izvrši sabiranjem radova aktivnih spoljnih sila (sl.1):

$$W_{uk} = F_a l_a - F_b l_b = \sigma_a A_a l_a - \sigma_b A_b l_b = V(\sigma_a - \sigma_b) \quad (4)$$



Sl.1

Sada stepen iskorišćenja može da se napiše kao:

$$\eta = \frac{V \cdot a}{V(\sigma_a - \sigma_b)} = \frac{a}{\sigma_a - \sigma_b} \quad (5)$$

Ako se zakonitost krive tečenja, kao karakteristike materijala, usvoji u obliku funkcije $k = C\phi^n$ specifični deformacioni rad može se izraziti kao:

$$a = \int_{\phi_1}^{\phi_2} k d\phi = \int_{\phi_1}^{\phi_2} c \phi^n d\phi = \frac{c}{1+n} (\phi_2^{1+n} - \phi_1^{1+n}) \quad (6)$$

odnosno, stavljajući da je:

$$\phi_2 = \phi_{pi} + \phi_i$$

gde je:

ϕ_i - stepen deformacije koji odgovara datom relativnom naponu vučenja i datim uslovima obrade (indeks „i“ predstavlja redni broj operacije),

$\phi_1 = \phi_{pi}$ - stepen prethodne deformacije,

pa se dobija:

$$a = \frac{1}{1+n} |(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}| \quad (7)$$

Naponi vučenja (σ_a) i protiv zatezanja (σ_b) mogu se izraziti preko parametara v (relativni napon vučenja), odnosno ξ (relativni napon protivzatezanja) u obliku:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= v k_a, \\ \sigma_b &= \xi k_{sr}. \end{aligned} \quad (8)$$

Veličine k_a i k_{sr} mogu se izraziti u obliku |1|:

$$\begin{aligned} k_a &= c (\phi_{pi} + \phi_i)^n \\ k_{sr} &= \frac{c}{1+n} \frac{(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}}{\phi_i} \end{aligned} \quad (9)$$

pa stepen iskorišćenja dobija oblik:

$$\eta = \frac{\frac{c}{1+n} (\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}}{v c (\phi_{pi} + \phi_i)^n - \xi \frac{c}{1+n} \frac{(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}}{\phi_i}} \quad (10)$$

odnosno posle sredjivanja:

$$\eta = \frac{\phi_i}{(1+n) (\phi_{pi} + \phi_i)^n} \quad (11)$$

$$v \frac{(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}}{(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}} - \xi$$

Za analizu stepena iskorišćenja potrebno je varirati sve parametre u odredjenom broju nivoa. Prethodno za svaku kombinaciju parametara treba izračunati veličinu stepena deformacije ϕ_i^* , koji pored parametara v, n, ξ, ϕ_{pi} zavisi još od koeficijenta trenja na kontaktnim površinama μ i od geometrijskih parametara:

- ugla konusa kanala alata α i
- relativne dužine kalibrirajuće zone $m = \frac{L}{D_a}$

Izraz (11) može se uprostiti za neke granične slučajeve. U slučaju da nema protivzatezanja ($\xi=0$) izraz dobija oblik:

$$\eta = \frac{(\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n} - \phi_{pi}^{1+n}}{v(1+n) (\phi_{pi} + \phi_i)^{1+n}} \quad (12)$$

Ako se radi o prvoj operaciji obrade ($i=1; \phi_{pi}=0; \xi=0$) biće:

$$\eta = \frac{\phi_1^{1+n}}{v(1+n)\phi_1^n} = \frac{\phi_1}{v(1+n)} \quad (13)$$

* Funkcija stepena deformacije $|1|$ izvedena je u obliku:

$$a\phi_i^3 + b\phi_i^2 + c\phi_i + d = 0,$$

gde su:

$$a = \mu \cot \alpha$$

$$b = 2[a(\phi_{pi} + \xi - 1) - f_1(\alpha)]$$

$$c = 2\{(1+n)(1+4\mu m)v - \xi - \frac{2}{\sqrt{3}} f_2(\alpha) - 4nm - 2\phi_{pi}\} [f_1(\alpha) + a(1-\xi)]$$

$$d = 4\phi_{pi} \{(1+4\mu m)v - \xi - \frac{2}{\sqrt{3}} f_2(\alpha) - 4\mu m\}$$

$$f_1(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left| 1 - (\cos \alpha) \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 + \frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}} \right|$$

$$f_2(\alpha) = \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha.$$

U slučaju teoretski maksimalnog napona vučenja, koji dostiže vrednost napona tečenja ($v=1$) i kome odgovara najveći stepen deformacije ϕ_g - granica deformabilnosti, dobija se maksimalna vrednost stepena iskorišćenja za date parametre procesa:

$$\eta_{\max} = \frac{\phi_g}{1+n} \quad (14)$$

U slučaju idealnog procesa, bez trenja ($\mu=0$) i bez neravnomernosti deformacije, stepen iskorišćenja bio bi jednak jedinici ($\eta_{id}=1$). Iz toga proizlazi izraz za teoretski maksimalnu vrednost granice deformabilnosti pri obradi vučenjem:

$$\phi_{g \max} = 1+n \quad (15)$$

3. REZULTATI PRORAČUNA

Za izračunavanje stepena iskorišćenja potrebno je najpre izračunati vrednost stepena deformacije ϕ_1 , koja odgovara datom relativnom naponu vučenja i ostalim uslovima obrade. Funkcija $\phi_1 = \phi_1(v, n, \phi_p, \mu, \alpha, m, \xi)$ rešavana je pomoću računara u radu [2], a isti program proširen je i za istovremeno izračunavanje veličine n . Ovaj program prikazan je na sl.2 (dat je samo glavni program).

Da bi se mogao analizirati uticaj pojedinih parametara ($v, n, \phi_p, \mu, \alpha, m, \xi$) na stepen iskorišćenja za proračun su usvojene odgovarajuće vrednosti ovih parametara i to:

$$n = 0.1, 0.15, 0.20, 0.25$$

$$v = 0.4, 0.7, 1.0$$

$$\phi_p = 0.0, \phi_1, \phi_1 + \phi_2, \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (i=4)$$

$$\mu = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$$

$$m = 0.0, 0.5, 1.0$$

$$\xi = 0.0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$$

$$\alpha = 1, 2, 3, \dots, 20^\circ.$$

Kao rezultati proračuna dobijene su vrednosti $\phi(\alpha)$ i $n(\alpha)$ pri konstantnim vrednostima ostalih parametara u svim kombinacijama. Istovremeno su izračunate i maksimalne vre-

Slika 2. (str.1)

```

1  C   GLAVNI PROGRAM
2     DOUBLE PRECISION DDAL,SINA,COSA
3     COMMON /COM/ A,B,C,D
4     DIMENSION ALL(50),FIV(50),ALP(50),EMV(10),ANIV(10),AMIV(10)
5     WRITE(5,200)
6     200 FORMAT(1H1,5X,'PRORACUN OPTIMALNOG UGLA ALPHA',///)
7     READ(4,101)NAL,IMM,NEM,NNI,NMI
8     101 FURMAT(10I5)
9     READ(4,100)EN,FIP,FIL,FID,G,GAL,AKSI
10    100 FDMAT(8G10,2)
11    READ(4,100)(EMV(I),I=1,NEM),(ANIV(I),I=1,NNI),(AMIV(I),I=1,NMI)
12    WRITE(5,204)NAL,IMM,NEM,NNI,NMI,EN,FIP,FIL,FID,G,GAL,AKSI
13    204 FORMAT(1H0,'KONSTANTNI PARAMETRI',/,1H0,'NAL=',I2,3X,'IMM=',I2,
14    1      3X,'NEM=',I2,3X,'NNI=',I2,3X,'NMI',I2,3X,'EN=',G11.5,/,1H0,
15    2      'FIP=',G11.5,3X,'FIL=',G11.5,3X,'FID=',G11.5,/,1H0,'G=',
16    3      G11.5,5X,'GAL=',G11.5,3X,'KSI=',G11.5)
17    WRITE(5,199)
18    NFIUK=4
19    FIUK=5.
20    FIPP=0.
21    DO 2 I=1,NAL
22    2 ALP(I)=FLUAT(I)
23    IPAGE=0
24    DO 3 IEM=1,NEM
25    EM=EMV(IEM)
26    DO 3 INI=1,NNI
27    ANI=ANIV(INI)
28    DO 3 IMI=1,NMI
29    AMI=AMIV(IMI)
30    FIP=FIPP
31    DO 9 IFIUK=1,NFIUK
32    ITER=0
33    DAL=GAL+1.
34    WRITE(5,205)EM,ANI,AMI,EN,AKSI,FIP
35    205 FORMAT(1H0,'PROMENLJIVI PARAMETRI',/,1H0,'EM=',G11.5,2X,
36    1      'ANI=',G11.5,2X,'AMI=',G11.5,' EN=',G11.5,
37    2      '/',1H , 'AKSI=',G11.5, ' FIP=',G11.5,/)
38    DO 8 IAL=1,NAL
39    8 ALL(IAL)=ALP(IAL)
40    *WRITE(5,206)
41    206 FORMAT(1H ,5X,'AL/STEP/',8X,'FI',
42    1      13X,'ETA',11X,'CKD',/)
43    5 CONTINUE
44    DO 1 IAL=1,NAL
45    DDAL=ALL(IAL)
46    DDAL=DDAL*0.01745329 DO
47    SINA=DSIN(DDAL)
48    COSA=DCOS(DDAL)
49    F1=1,DO/SINA**2*(1,DO-COSA*DSQRT(1,DO-0.916666666666DO*SINA**2)
50    1      +0.08703883 DO*DLG(1.9574271 DO/(0.9574271 DO*COSA+DSQRT(1.
51    2      DO-0.916666666666 DO*SINA**2))))
52    F2=DDAL/SINA**2=COSA/SINA
53    A=COSA/SINA
54    A=AMI*A

```

Slika 2. (str.2)

```

55      B=2.*(A*(FIP+AKSI-1.)-F1)
56      D=-(AKSI+1,154701*F2+4.*AMI*EM)
57      C=2.*((1,+EN)*(1,+4.*AMI*EM)*ANI+D=2.*FIP*(F1+A*(1,-AKSI)))
58      D=4.*FIP*((1,+4.*AMI*EM)*ANI+D)
59      IM=IMM
60      FILL=FIL
61      FIDD=FID
62      CALL BISEC(FI,FILL,FIDD,G,IM,IND)
63      IF(ITER.GT.0) GO TO 7
64      ETA=(FIP+FI)**EN
65      CKD=(FIP+FI)*ETA=FIP**(1,+EN)
66      ETA= FI/ (ANI*(1,+EN)*FI*ETA/ CKD=AKSI)
67      CKD=FI*FI*(1,+EN)/CKD
68      *WRITE(5,202)          ALL(IAL),FI,ETA,CKD
69  202  FORMAT(1H ,5G15,5)
70      7  CONTINUE
71      IF(FI=FID+G) 11,10,10
72  10  FIV(IAL)=0.
73      GO TO 1
74  11  FIV(IAL)=FI
75      1  CONTINUE
76      CALL MAX(FIV,NAL,IMAX,FIM)
77      IF(DAL.GT.GAL) GO TO 4
78      FI=FIV(IMAX)
79      ETA=(FIP+FI)**EN
80      CKD=(FIP+FI)*ETA=FIP**(1,+EN)
81      ETA= FI/ (ANI*(1,+EN)*FI*ETA/ CKD=AKSI)
82      CKD=FI*FI*(1,+EN)/CKD
83      *WRITE(5,203)FIV(IMAX),ALL(IMAX),ETA,CKD
84  203  FORMAT(1H0,11H*** MAX FI=,G11,4,2X,9HZA ALPHA=,G11,4,/,
85      1  5X,'ETA=',G11,5,5X,'CKD=',G11,5,/)
86      IPAGE=IPAGE+1
87      IF(MOD(IPAGE,2).EQ.0) *WRITE(5,199)
88  199  FORMAT(1H1)
89      FIP=FIP+FIV(IMAX)
90      IF(FIP.LT.FIUK) GO TO 9
91      GO TO 3
92  4  CONTINUE
93      I1=IMAX-1
94      I2=IMAX+1
95      IM=I2
96      IF(FIV(I1).GT.FIV(I2)) IM=I1
97      AL1=ALL(IMAX)
98      AL2=ALL(IM)
99      DAL=(AL2-AL1)/FLOAT(NAL)
100     DO 5 IAL=1,NAL
101     5  ALL(IAL)=AL1+DAL*FLOAT(IAL-1)
102     ITER=ITER+1
103     GO TO 6
104     9  CONTINUE
105     3  CONTINUE
106     STOP
107     END

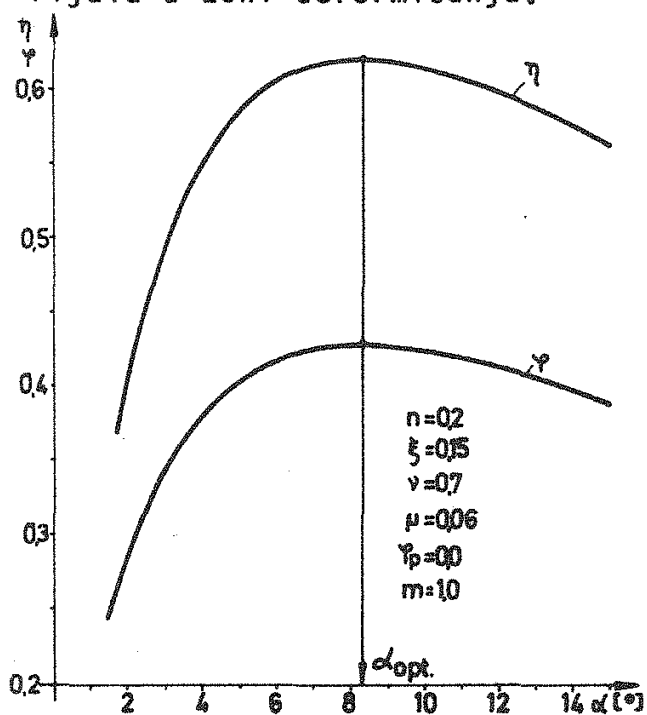
```

© ERRORS COMPILATION COMPLETE

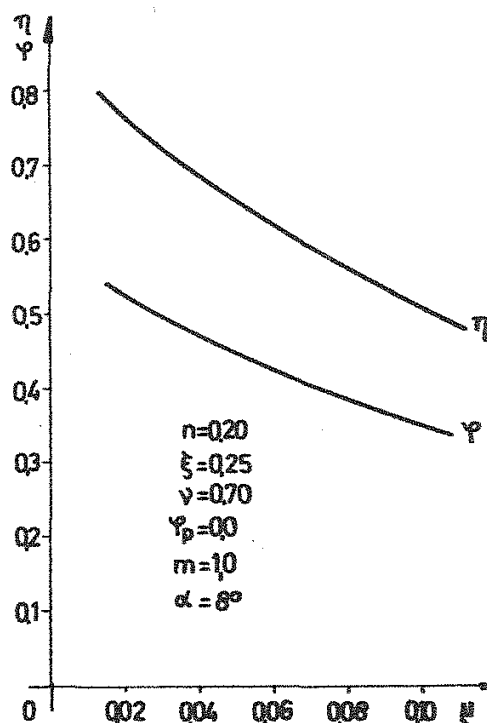
dnosti ϕ_{\max} i η_{\max} , kojima odgovara optimalni ugao konusa alata α_{opt} . Rezultati su štampani u velikom broju tabela. Uticaj pojedinih parametara najbolje se može sagledati ako se rezultati proračuna, sa odabranim karakterističnim vrednostima parametara prikažu grafički (sl.3.÷ sl.9.). Pri variranju pojedinih parametara u napred navedenim nivoima, kao konstantne vrednosti ostalih parametara usvojene su:

$$\begin{aligned} n &= 0.2 \\ \xi &= 0.15 \\ \mu &= 1.0 \\ \nu &= 0.7 \\ m &= 0.06 \\ \phi_p &= 0.0 \\ \alpha &= 8^\circ \end{aligned}$$

Na slici 3. data je zavisnost stepena iskorišćenja η , kao i stepena deformacije ϕ od ugla konusa kanala alata α . Kao što se vidi najveće vrednosti η (kao i ϕ) dobijaju se pri optimalnom uglu α_{opt} . Smanjenje η pri manjim uglovima ($\alpha < \alpha_{\text{opt}}$) nastaje zbog povećanog otpora trenja na kontaktnim površinama, dok kod većih uglova ($\alpha > \alpha_{\text{opt}}$) povećavaju se gubici zbog povećanog klizanja i savijanja čestica materijala u zoni deformisanja.



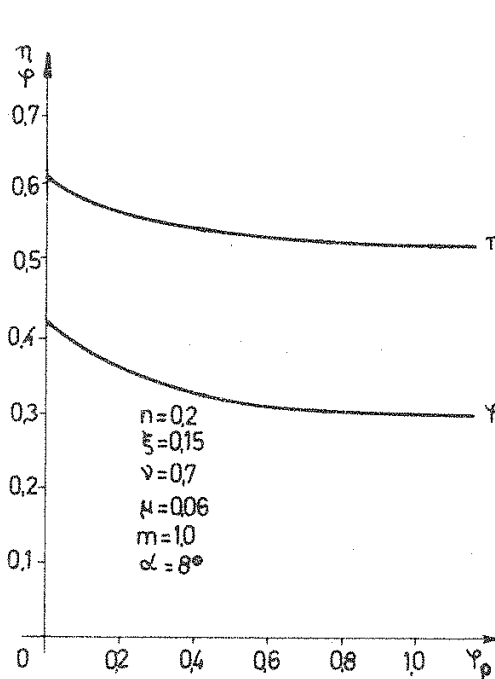
S1.3



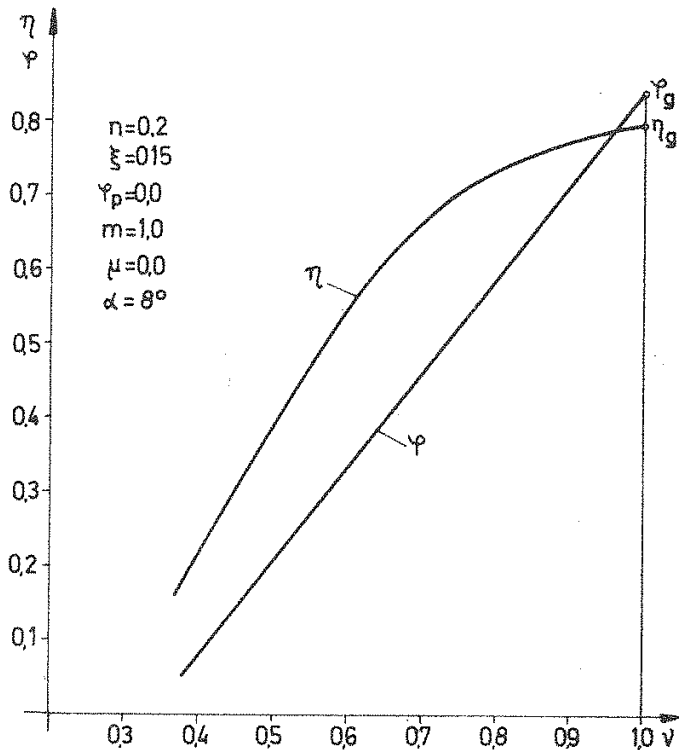
S1.4

Kontaktno trenje ima najveći uticaj na porast gubitaka, što se vidi na sl.4. Pri promeni koeficijenta trenja od vrednosti 0,02, koja je bliska uslovima hidrodinamičkog trenja, do vrednosti 0.10, koja odgovara lošijim uslovima podmazivanja suvim sapunskim mazivom, stepen iskorišćenja opada čak za $\Delta\eta=0,26$. Iz ovog se vidi značaj proučavanja mogućnosti poboljšavanja uslova podmazivanja u cilju smanjenja kontaktnog trenja.

Na sl.5 data je zavisnost η od stepena prethodne deformacije ϕ_p . Najbolje iskorišćenje deformacionog rada



S1.5



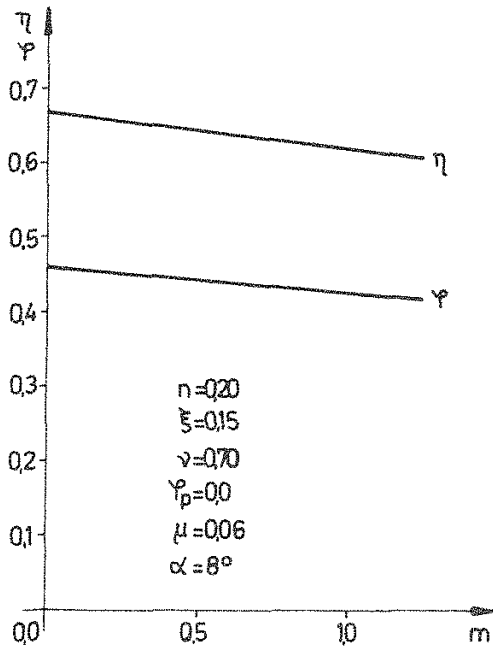
S1.6

postiže se u prvoj operaciji u prethodno nedeformisanom stanju materijala ($\phi_p=0$), koje karakteriše i najveća deformabilnost. U sledećim operacijama, sa povećanjem ϕ_p znatno se smanjuje stepen iskorišćenja.

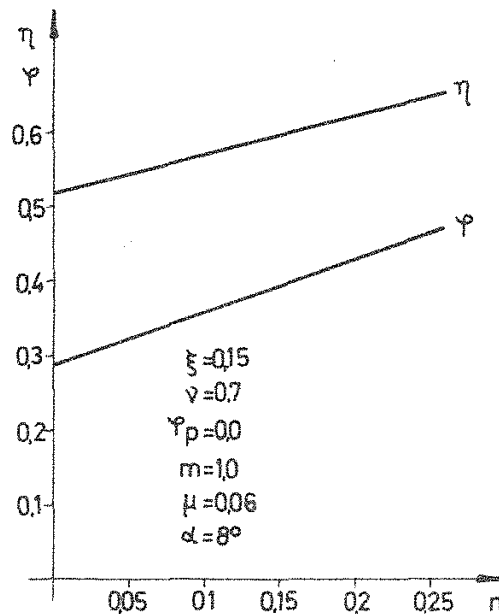
Veliki uticaj na stepen iskorišćenja pokazuje relativni napon vučenja v (sl.6). Interesantno je da η pokazuje znatno blaži rast posle vrednosti $v=0.7$, što upravo odgovara maksimalnoj vrednosti relativnog napona sa kojom se u realnim uslovima može raditi. Teorijski najvećem relativnom

naponu vučenja $v=1.0$ odgovara maksimalna vrednost stepena iskorišćenja η_g , analogno maksimalnoj deformabilnosti (granici deformabilnosti) ϕ_g .

Povećanje relativne dužine kalibrirajućeg dela kanala alata m neznatno utiče na smanjenje stepena iskorišćenja (sl.7), dok se sa povećanjem eksponenta deformacionog oja-



S1.7



S1.8

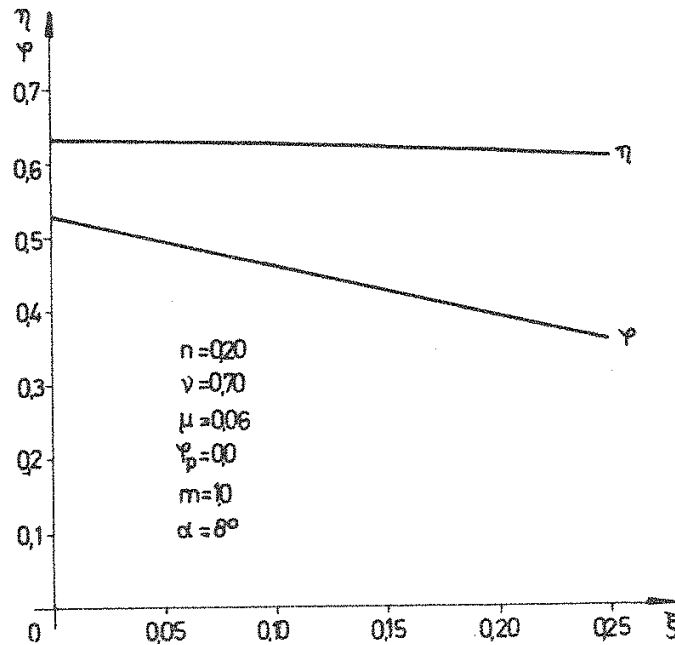
čavanja n veličine η u izvesnoj meri povećava (sl.8). Ovo povećanje je manje izraženo kod sledećih operacija obrade ($\phi_p > 0$).

Zavisnost η od relativnog napona protivzatezanja ξ prikazana je na sl.9.

Uočava se da povećanje protivzatezanja ne utiče na pad stepena iskorišćenja i pored toga što deformabilnost materijala (ϕ) u tom slučaju znatnije opada.

Na osnovu poredjenja zakonitosti promene stepena iskorišćenja deformacionog rada i stepena deformacije, prema prethodnim dijagramima, može se konstatovati da je zakonitost promene oba pokazatelja vrlo slična u slučaju zavisnosti od parametara α , μ , ϕ_p , m i n . U slučaju parametara ξ i v ova zakonitost je u izvesnoj meri različita što se vidi

na sl.6 i sl.9.



Sl.9

4. ZAKLJUČAK

Analiza stepena iskorišćenja deformacionog rada pomoću računara omogućila je celovito sagledavanje uticaja svih parametara na iskorišćenje energije u toku procesa obrade vučenjem.

Najveći uticaj na stepen iskorišćenja pokazuje kontaktno trenje, relativni napon vučenja i ugao konusa alata.

Stepen iskorišćenja naglo opada sa povećanjem kontaktnog trenja, dok sa porastom relativne dužine kalibrirajuće zone, relativnog protivzatežućeg napona i stepena prethodne deformacije pokazuje blago opadanje.

Izraženiji porast stepena iskorišćenja ostvaruje se sa povećanjem eksponenta deformacionog ojačavanja, dok se najveći porast postiže sa povećanjem relativnog napona vučenja.

Maksimalna vrednost stepena iskorišćenja ostvaruje se sa optimalnim uglom konusa alata.

LITERATURA

- |1| Trbojević, I.: Određjivanje funkcije stepena deformacije u procesu obrade vučenjem, Zbornik radova XVI Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Mostar, 1982.
- |2| Trbojević, I.: Analiza deformabilnosti materijala pri hladnoj obradi vučenjem - pomoću funkcije stepena deformacije, Obrada deformisanjem u mašinstvu, br.1-2. god. 8, Novi Sad, 1983.
- |3| Avitzur, V.: Metal forming - Processes and analysis, New York, 1968.
- |4| Parezanović, N.: Algoritmi i programski jezik FORTRAN IV, Beograd, 1972.
- |5| Obradović, D.: Numerička analiza, Novi Sad, 1979.
- |6| Trbojević, I.: Prilog istraživanju optimalnih geometrijskih parametara konusno-konvergentnog alata za obradu metala vučenjem, mag.rad, Novi Sad, 1981.