

UDK 539.374:621.98.01

Analiza deformacij pri globokem vlečenju brez zadrževala pločevine

ZLATKO KAMPUŠ – FRANC GOLOGRANC

1. UVOD

Proces globokega vlečenja brez zadrževala pločevine je odvisen od relativnega premera vlečenja d_0/s_0 . Pri razmerjih $d_0/s_0 \leq 30-90$ je stabilnost pločevine že tako velika, da ni nevarnosti, da bi se nagubala, zato pločevinasto zadrževalo ni potrebno [1]. V primerjavi z globokim vlečenjem z zadrževalom pločevine se dosežejo večja izhodiščna vlečna razmerja, potrebno je manjše število preoblikovalnih operacij, manjša preoblikovalna sila in poraba energije s preprostejšim orodjem in na preprostejšem preoblikovalnem stroju.

Z izračunom deformacije stene lončka se je v večji meri ukvarjal le prof. Shawki [2]. S poenostavljenim zakonom teorije plastičnega tečenja, ki upošteva končne deformacije, je izračunal in s preizkusi preveril deformacije debeline stene po končanem globokem vlečenju na robu obdelovanca.

Za natančnejše načrtovanje tehnoloških postopkov pa je treba poznati deformacije po celotnem plašču obdelovanca. V članku je prikazana analiza deformacije stene na poljubnem delu plašča obdelovanca med preoblikovanjem in potrditev izračuna s preizkusi. Deformacije so izračunane z uporabo teorije plastičnega tečenja, ki upošteva tudi pot, po kateri se pride do končnega stanja.

2. OZNAČBE

B	— trenutna vrednost napetostnega koeficienta,
$d\varepsilon_t, d\varepsilon_r, d\varepsilon_n$	— diferenciali logaritmičnih deformacij,
d_0, d_1	— premer pestiča,
$e_{i,j}$	— deviator deformacij,
R	— polmer lončka med vlekom,
R_0	— polmer rondela,
R_x	— izhodiščni polmer za opazovan točko na lončku,
r	— tekoči polmer,
r_0, r_1	— notranji polmer lončka,
r_x	— tekoči polmer točke,
s	— debelina,
s_{ij}	— deviator napetosti,
s_0	— izhodiščna debelina,
β_0	— izhodiščno vlečno razmerje,
μ	— koeficient trenja,

σ_f	— preoblikovalna trdnost,
$\sigma_{f, sr}$	— srednja preoblikovalna trdnost,
$\sigma_n, \sigma_r, \sigma_t$	— napetosti v steni lončka,
$\varphi_t, \varphi_r, \varphi_n$	— logaritemske deformacije v glavnih smereh.

3. OSNOVE

Tudi za globoko vlečenje brez zadrževala pločevine lahko zapišemo, da je vsota logaritmskih deformacij v treh, medsebojno pravokotnih smereh enaka 0:

$$\varphi_t + \varphi_r + \varphi_n = 0$$

Tangencialno deformacijo, ki je tudi največja glavna deformacija, lahko izračunamo iz spremembe obsega obdelovanca; deformacijo v smeri dolžine stranice, ali normalno deformacijo, pa je treba izračunati iz zveze med napetostmi in deformacijami v posameznih točkah.

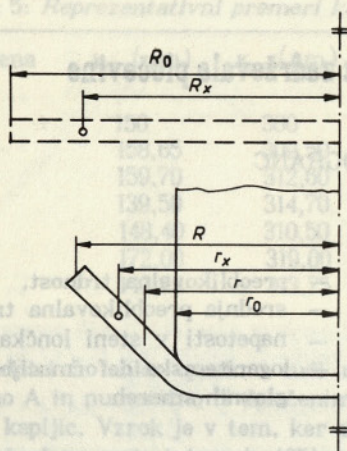
4. IZRAČUN TANGENCIALNE DEFORMACIJE

Tangencialno deformacijo opazovanih točk s polmerom r_x , ki so pred vlečenjem oddaljene od središča rondela za R_x (sl. 1) lahko popišemo z:

$$\varphi_{t, r=r_x} = \int_{R_x}^{r_x} \frac{dl}{l} = \ln \frac{r_x}{R_x} = \ln \frac{\sqrt{r_0^2 + (R_x^2 - r_0^2) \frac{R^2 - r_0^2}{R_0^2 - r_0^2}}}{R_x} \quad (4.1).$$

Polmer r_x je odvisen od polmera R_x in ga ob predpostavki, da se debelina ne spreminja lahko izračunamo iz prostornine:

$$r_x = \sqrt{r_0^2 + (R_x^2 - r_0^2) \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r^2}} \quad (4.2).$$



Sl 1. Prikaz potovanja opazovane točke.

Če uvedemo za izhodiščno vlečno razmerje točke R_x označbo:

$$\beta_x = \frac{R_x}{r_0},$$

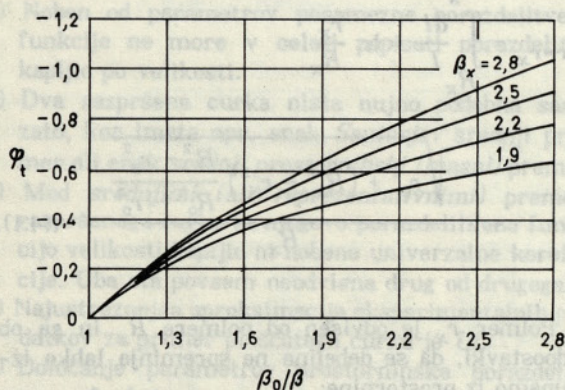
lahko zgornjo enačbo zapišemo:

$$\varphi_{t, r=R_x} = \ln \frac{\sqrt{1 + (\beta_x^2 - 1) \frac{\beta^2 - 1}{\beta_0^2 - 1}}}{\beta_x} \quad (4.3).$$

Po končanem vlečenju je deformacija na ro-
bu obdelovanca (največja):

$$\varphi_{t, r=R} = \ln \frac{r_0}{R_0} \quad (4.4).$$

$$\varphi_{t, r=R} = \ln \frac{1}{\beta_0} \quad (4.5).$$



Sl. 2. Diagram spreminjanja tangencialne logaritem-
ske deformacije φ_t za štiri različna razmerja β_x v
odvisnosti od razmerja β_0/β .

$$\beta_0 = R_0/r_0 = 2.8. \quad \beta = R/r_0. \quad \beta_x = R_x/r_0.$$

V diagramu na sliki 2 je prikazano, kako se spreminja tangencialna deformacija na štirih različnih mestih stranice lončka med vlečenjem pri izhodiščnem vlečnem razmerju $\beta_0 = 2,8$.

5. IZRAČUN NORMALNE DEFORMACIJE

Normalno deformacijo in s tem debelino stranice lončka s lahko izračunamo iz zveze med napetostmi in deformacijami.

Po Levy-Missesovi teoriji plastičnega tečenja lahko zapišemo:

$$de_{i,j} = d\lambda s_{i,j} \quad (5.1)$$

in v komponentni obliki

$$d\varepsilon_r = d\lambda(\sigma_r - \sigma_m)$$

$$d\varepsilon_t = d\lambda(\sigma_t - \sigma_m)$$

$$d\varepsilon_n = d\lambda(\sigma_n - \sigma_m)$$

Ker je $\sigma_m = (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_n)/3$, lahko tudi zapišemo

$$d\varepsilon_r = d\lambda(2\sigma_r - \sigma_t - \sigma_n)/3$$

$$d\varepsilon_t = d\lambda(2\sigma_t - \sigma_r - \sigma_n)/3$$

$$d\varepsilon_n = d\lambda(2\sigma_n - \sigma_r - \sigma_t)/3$$

$$d\varepsilon_n = ds/s \quad \text{in} \quad d\varepsilon_t = dr/r$$

$$\frac{ds}{s} = \frac{2\sigma_n - \sigma_r - \sigma_t}{2\sigma_t - \sigma_r - \sigma_n} \frac{dr}{r}$$

in

$$\int_{s_0}^s \frac{ds}{s} = \int_{R_x}^{r_x} \frac{2\sigma_n - \sigma_r - \sigma_t}{2\sigma_t - \sigma_r - \sigma_n} \frac{dr}{r} \quad (5.2).$$

Ko vstavimo v enačbo (5.2) vrednosti za napetosti in upoštevamo pogoj plastičnosti [3], [4]

$$\sigma_r = B\sigma_{fsr} \left(\frac{\tan \alpha}{\mu} + 1 \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\mu/\tan \alpha} \right] = B\sigma_{fsr} A \quad (5.3),$$

pri čemer je

$$A = \left(\frac{\tan \alpha}{\mu} + 1 \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\mu/\tan \alpha} \right]$$

$$\sigma_t = \sigma_r - B\sigma_f \approx B\sigma_{fsr}(A - 1) \quad (5.4),$$

dobimo po ureditvi:

$$\int_{s_0}^s \frac{ds}{s} = \int_{R_x}^{r_x} \frac{2(A-1) \cdot \cos \alpha \cdot s + r}{r(A-2) - (A-1) \cdot \cos \alpha \cdot s} \frac{dr}{r} \quad (5.6).$$

V enačbi za σ_r je $R = f(r)$. Izračunamo ga:

$$R = \sqrt{\frac{(r^2 - r_0^2)(R_0^2 - r_0^2)}{R_x^2 - r_0^2} + r_0^2} \quad (5.7).$$

Največkrat nas zanima debelina na robu lončka po končanem vlečenju. Radialna napetost je na robu ves čas enaka 0. S primerno ureditvijo enačbe (5.6) dobimo:

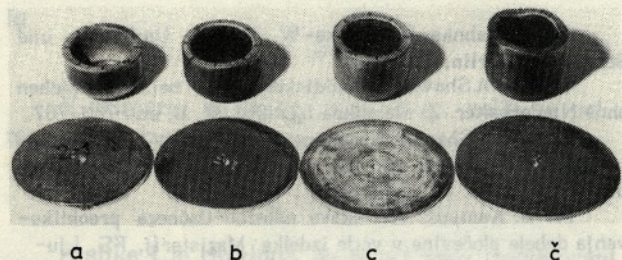
$$\int_{s_0}^{s_{\max}} \frac{ds}{s} = \int_{R_0}^{r_0} \frac{2 \frac{s}{r} \cos \alpha - 1}{2 - \frac{s}{r} \cos \alpha} \frac{dr}{r} \quad (5.8).$$

Enačbi (5.6) oziroma (5.8) sta rešljivi le po numerični poti.

6. REZULTATI PREIZKUSOV

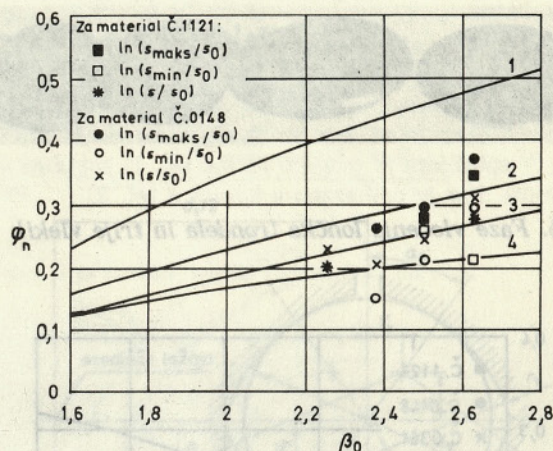
Vse roncle so bile iz 5 mm debele jeklene pločevine Č.0148, Č.0361 in Č.1121. Preizkusi so bili opravljeni v Laboratoriju za preoblikovanje na FS z eksperimentalnim orodjem s pestičem s premerom 40 mm in matrico z vstopno odprtino v obliki traktrise z najmanjšim premerom 55 mm. Med preoblikovanjem smo mazali z oljem Hidraol 50, Metalfomom, del rondel pa je bilo fosfatiranih in namiljenih.

Ker nas v praksi največkrat zanima deformacija stene na robu lončka po vlečenju, smo te preizkuse tudi najbolj natančno obdelali. Preoblikovani so bili lončki z izhodišnimi vlečnimi razmerji $\beta_0 = 2,25, 2,375, 2,5$ in $2,625$ (sl. 3).



Sl. 3. Roncle in lončki, preoblikovani z izhodišnim vlečnim razmerjem β_0 .

a : $\beta_0 = 2,25$. b : $\beta_0 = 2,375$. c : $\beta_0 = 2,5$. d : $\beta_0 = 2,625$.



Sl. 4. Primerjava izmerjenih in teoretičnih logaritmskih deformacij φ_n na robu lončka po vlečenju za različna vlečna razmerja β_0 .

Premer pestiča $d_1 = 40$ mm, debelina pločevine $s_0 = 5$ mm.

Krivulje: 1 - $s = s_0 \sqrt{\beta_0}$. 2 - po enačbi (5.6).

3 - $s = (s_0 \sqrt{\beta_0} + 1) / 2$. 4 - po literaturi [2].

V diagramu na sliki 4 je prikazana primerjava izmerjenih deformacij na robu lončka in izračunanih deformacij. Pri vlečnih razmerjih, večjih od 2,4, je zaradi ravninske anizotropije debelina stene neenakomerna, zato so v diagramu prikazane največja, najmanjša in deformacija srednje debeline, izmerjene na osmih mestih roba lončka. Za primerjavo je v diagramu vrisana tudi krivulja, izračunana po enačbi, ki jo je predlagal Shawki [2], in krivulja, računana po znani enačbi [1]

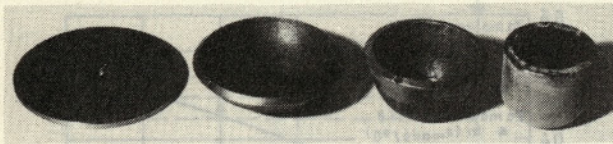
$$s = s_0 \sqrt{\beta_0}.$$

Iz diagrama je razvidno, da enačba (5.6) z zadovoljivo natančnostjo popisuje deformacije na robu lončka po končanem vlečenju. Pomanjkljivost te enačbe je njen, za prakso nekoliko težji izračun. Zato za lončke, ki so po geometrijski obliki podobni eksperimentalnim, predlagava, da se debelina roba lončka po vlečenju izračuna po enačbi

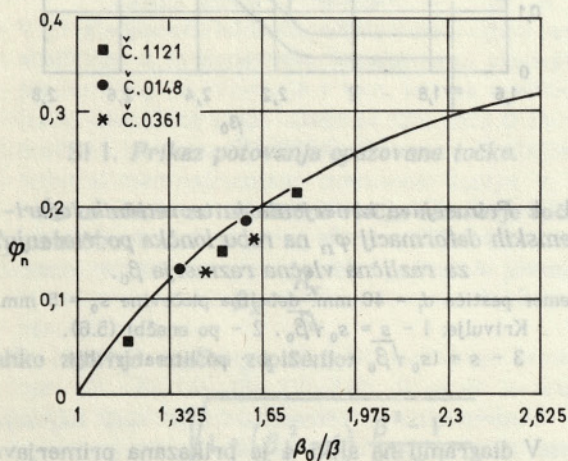
$$s = \frac{s_0}{2} (\sqrt{\beta_0} + 1) \quad (6.1).$$

S slike je razvidno, da se deformacije, računan po tej enačbi, zelo dobro približujejo dejanskim.

Za primerjavo spreminjanja dejanske deformacije na robu obdelovanca med vlečenjem s teoretičnim izračunom so se preoblikovali lončki z izhodišnim vlečnim razmerjem $\beta_0 = 2,625$. Proces globokega vlečenja je bil v različnih fazah preoblikovanja ustavljen (sl. 5) in izmerili smo deformacijo na robu lončka. Iz diagrama na sliki 6 je razvidno, da se izračunane deformacije dobro ujemajo z dejanskimi.

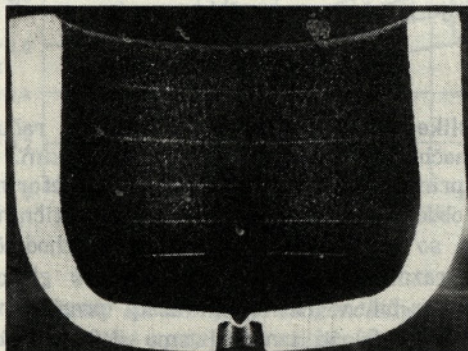


Sl. 5. Faze vlečenja lončka (rondela in trije vleki).

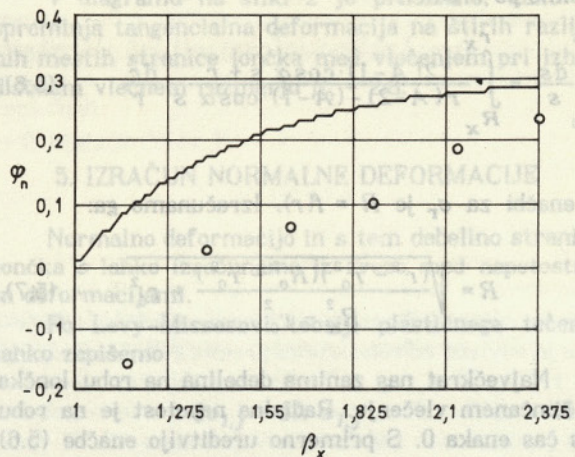
Sl. 6. Logaritemska deformacija φ_n roba lončka med preoblikovanjem v odvisnosti od razmerja β_0/β_1 .

Premer pestiča $d_1 = 40$ mm, debelina pločevine $s_0 = 5$ mm. Vlečni razmerji: $\beta_0 = 2.625$. $\beta_0/\beta = R_0/R$.

Za meritev deformacij vzdolž stene lončka po končanem vlečenju smo na rondelo narisali koncentrične kroge s polmerom R_x . Po vlečenju smo na prerezanem lončku na mestu prereza koncentričnih krogov izmerili debelino stene (sl. 7). Po pričakovanju so največji odstopki teoretičnega poteka deformacij od dejanskih blizu prehoda stene lončka v dno, saj v izračunu normalne deformacije ni upoštevan vpliv upogibne napetosti (sl. 8).



Sl. 7. Lonček v prerezu.

Sl. 8. Primerjava izmerjenih in teoretičnih logaritemskih deformacij φ_n vzdolž stene lončka po vlečenju v odvisnosti od izhodiščnega vlečnega razmerja za opazovano točko β_x za jekleno pločevino Č.1121.

Premer pestiča $d_1 = 40$ mm, debelina pločevine $s_0 = 5$ mm.

Vlečni razmerji: $\beta_0 = 2.375$. $\beta_x = R_x/r_1$.

7. SKLEP

Preizkusi so pokazali, da se postavljena teorija za izračun deformacije stene lončka med vlečenjem in po vlečenju dobro ujema z dejansko deformacijo. Največji odstopki so blizu prehoda stene lončka v dno. Pri izračunu bo treba upoštevati deformacije, ki nastanejo zaradi upogibnih napetosti pri dnu lončka. Treba bo tudi analizirati spreminjanje debeline stene obdelovanca glede na njegovo višino.

ZAHVALA

Avtorja se zahvalujeta Tovarni avtomobilov in motorjev TAM, Železarni Jesenice in podjetju Agroprogres za razumevanje in materialno podporo pri izpeljavi te naloge.

LITERATURA

- [1] H. Jahnke-R. Retzke-W. Weber: Umformen und Schneiden. Berlin, 1972.
- [2] G.S.A.Shawki: Wanddickenverlauf beim Tiefziehen ohne Niederhalter. Z. Metallkunde 52/1961, št. 11, str. 763-767.
- [3] G.S.A.Shawki: Spannungen und Kräfte beim niederhalterlosen Tiefziehen mit konischen Ringen. Z. Metallkunde 52/1961, št. 8, str. 532-537.
- [4] Z. Kampuš: Raziskava natezno-tlačnega preoblikovanja debele pločevine v votle izdelke. Magisterij, FS, Ljubljana 1989.

Naslov avtorjev: asist. mag. Zlatko Kampuš, dipl.inž.
prof. dr. Franc Goligranc, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana