

## IZBOR PROMENLJIVE SILE DRŽANJA PRI DUBOKOM IZVLAČENJU

S. Aleksandrović<sup>1)</sup>

### REZIME

*Sila držanja je značajan parametar koga je moguće menjati za vreme trajanja procesa dubokog izvlačenja. Promenljiva sila držanja omogućava uticaj na ponašanje komada, kao i na konačne rezultate procesa.*

*U radu se daje originalni postupak odredjivanja jednog tipa zavisnosti promenljive sile držanja i deo eksperimentalnih rezultata primene na karoserijskom čeličnom limu. Eksperiment je realizovan na specijalnom laboratorijskom kompjuterskom uređaju. Daje se uporedni prikaz sa rezultatima za konstantnu silu držanja definisanu na klasičan način. Prate se kvalitativni pokazatelji (dubina izvlačenja, karakteristike komada), distribucije deformacija, sila izvlačenja, uticaji na graničnu deformabilnost.*

### 1. UVOD

Uobičajeno je da intenzitet sile držanja ( $F_D$ ) pri dubokom izvlačenju tankih limova ima konstantnu vrednost tokom procesa. Ona se određuje najčešće preko empirijskih preporuka, pri čemu se usvaja specifični pritisak držača ( $q$ ). Množenjem sa početnom površinom kontakta dobija se konstantna sila držanja. U savremenoj industriji plastičnog oblikovanja lima uvode se nove tehnike i teži ka potpunijem upravljanju procesom dubokog izvlačenja i njegovim rezultatima. Sila držanja ima povoljnu osobinu da se može menjati tokom procesa, što je karakteristika još jedino zateznih rebara promenljive visine /1, 2/. Iz toga proizilazi njen značaj kao upravljajuće veličine. Ovakav pristup ima puno opravdanje pre svega zbog primene novih generacija materijala koje imaju znatno lošiju obradivost u odnosu na klasične niskouglenične limove (limovi od Al legura, nerđajućih čelika, limovi povišene čvrstoće, ukrojeni, laserski zavareni, tzv. „taylored” limovi itd.). Takodje, savremena velikoserijska proizvodnja (naročito u automobilskoj industriji) zahteva ovladavanje procesom oblikovanja u većoj meri nego do sada, jer nije moguće ručno vršiti često potrebne sitnije ili krupnije korekcije tokom proizvodnje.

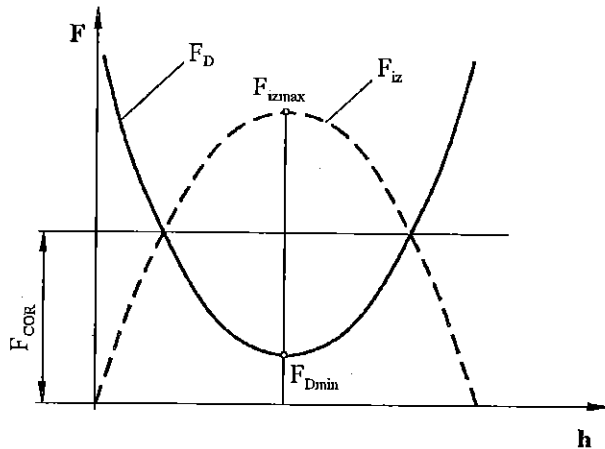
Iz prethodno pobrojanih razloga tokom zadnje decenije intenzivno se istražuju mogućnosti uticaja promenljive sile držanja (PSD) /1, 2/. Osnovno je pitanje: koja zavisnost sile držanja od hoda izvlačača (ili vremena) omogućuje povoljne efekte na tok i rezultat procesa? Opšte prihvaćenih postavki nema i pored značajnih rezultata opsežnih eksperimentalnih istraživanja uz primenu često vrlo složenih merno upravljačkih sistema /1, 2/. U temeljitom istraživanju /3/ predložen je metod definisanja PSD koji će u kratkim crtama biti izložen u ovom radu.

<sup>1)</sup> Mr Srblav Aleksandrović, asistent Mašinski fakultet, Kragujevac

## 2. DEFINISANJE ZAVISNOSTI PROMENLJIVE SILE DRŽANJA

Uspešan rezultat procesa dubokog izvlačenja mogu da poremete dva najbitnija defekta: pojava nabora na obodu i pojava pukotine u kritičnoj zoni (razaranje). Predložena funkcionalna zavisnost sile držanja od hoda (sl. 1) nazvana je kombinovana zbog svog opadajuće-rastućeg karaktera. Formirana je sa sledećim ciljevima:

- u prvoj fazi procesa dovoljno velikim intenzitetom sprečiti nabore,
- tokom trajanja procesa postići, u izvesnom smislu, rasterećenje na držaču s obzirom na silu izvlačenja,
- u poslednjoj fazi dovoljnim intenzitetom kompenzovati pojavu nabora i težnju ka povećanju debljine lima.



Sl. 1 Princip definisanja kombinovane sile držanja

U periodima procesa gde sila izvlačenja raste,  $F_D$  treba da opada i obrnuto. Maksimum sile izvlačenja treba da prati minimum sile držanja.

S obzirom na prethodne ciljeve došlo se do ideje da se funkcija sile držanja dobije na osnovu funkcionalne zavisnosti sile izvlačenja po principu simetričnog preslikavanja oko pogodno izabrane horizontalne ose simetrije (sl. 1). Položaj te prave određen je konstantnim intenzitetom korekzione sile  $F_{COR}$  koja se dobija na osnovu uslova da ordinata minimuma krive  $F_D$  bude iznad minimalnog intenziteta sile držanja određenog empirijski sa graničnog dijagrama zavisnosti dubine izvlačenja od sile držanja ( $h \square F_D$ ), s obzirom na pojavu

nabora. Apscisa tačke minimuma treba da odgovara apscisi maksimuma krive sile izvlačenja dobijene eksperimentalno za konkretan komad.

Prema tome, da bi se dobila tražena kombinovana zavisnost PSD potrebno je uraditi granični dijagram  $h \square F_D$  i snimiti zavisnost sile izvlačenja od hoda (najjednostavnije je to izvesti konstantnom silom držanja). Posle toga se analitički definiše funkcija kombinovane PSD. U odgovarajućim slučajevima eksperimentalni deo može da izostane.

Da bi se došlo do funkcionalne zavisnosti PSD treba odrediti funkciju zavisnosti sile izvlačenja od hoda izvlačaća ili drugog pogodnog parametra (na pr. vremena). Sledeća analiza izvedena je za cilindrični komad na osnovu klasične teorije /3/ uz izvesne korekcije. Pristup je empirijsko-analitički i primenljiv je i na prizmatične komade kvadratnog preseka.

Sila izvlačenja može da se izrazi kao:

$$F_{iz} = A \cdot \sigma_{viz} \quad (1)$$

gde je  $A \approx d \cdot \pi \cdot s$  površina nosećeg poprečnog preseka, a  $\sigma_{viz}$  ukupan napon dubokog izvlačenja koji može da se definiše preko poznatog izraza:

$$\sigma_{viz} = (\sigma_r + \sigma_{trd}) k_\mu + \sigma_{savis} \quad (2)$$

$\sigma_r$  je komponenta koja se odnosi na radialni zatežući napon na obodu.  $\sigma_{trd}$  je komponenta usled trenja na obodu prouzrokovanog silom držanja.  $k_\mu$  je faktor koji uzima u obzir trenje na zaobljenju ivice otvora matrice.  $\sigma_{savis}$  je napon usled savijanja i ispravljanja pri klizanju lima preko radijusa matrice. Imajući u vidu prethodni izraz, pogodno je ukupnu silu izvlačenja podeliti na odgovarajuće komponente:

$$F_{IZ} = F_{OBL} + F_{TRD} + F_{TRM} + F_{SAVIS} \quad (3)$$

Sila oblikovanja, koja se odnosi na deformisanje oboda (odgovara naponu  $\sigma_r$ ) iznosi:

$$F_{OBL} = A \cdot 1,15 \cdot \bar{K} \cdot \ln \frac{d}{D_0} \quad (4)$$

$$\sigma_r = 1,15 \cdot \bar{K} \cdot \ln \frac{\rho}{m} \quad (5)$$

Konstante koje definišu geometriju komada su: prečnik komada  $d$ , poluprečnik komada:

$$r = r_u = \frac{d}{2},$$

prečnik i poluprečnik razvijenog stanja:  $D_0$  i  $R_0 = \frac{D_0}{2}$ , koeficijent izvlačenja:

$$m = \frac{r}{R_0} = \frac{d}{D_0}.$$

Nezavisno promenljiva (argument) je relativno smanjenje oboda:  $\rho = \frac{R}{R_0} = \frac{D}{D_0}$ .  $R$  i  $D$  su

trenutne (tekuće) vrednosti poluprečnika i prečnika oboda. Na početku procesa  $\square=1$ , a na kraju  $\square=m$ .

$\bar{K}$  je srednja vrednost deformacionog otpora. Može da se izrazi u funkciji srednje prirodne deformacije  $\bar{\varphi}$ .

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\varphi_{iM} + \varphi_{iO}) \quad (6)$$

$\square_{iO}$  je deformacija na ivici oboda:

$$\varphi_{iO} = \ln \frac{R_0}{R} = \ln \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

Deformacija na ivici matrice  $\square_{iM}$  iznosi:

$$\varphi_{iM} = \ln \frac{\sqrt{1+m^2-\rho^2}}{m} \quad (8)$$

Na osnovu prethodna tri izraza sledi:

$$\bar{\varphi} = 0,5 \cdot \ln \frac{\sqrt{1+m^2-\rho^2}}{m \cdot \rho} \quad (9)$$

Funkciju  $\bar{K} = K(\bar{\varphi})$  najpogodnije je izraziti u linearnoj formi. Samo na taj način se konačna kriva sile izvlačenja po svom obliku približava krivoj dobijenoj eksperimentalno. Posle niza proba došlo se do sledeće zavisnosti:

$$\bar{K} = c \cdot \bar{\varphi}; c = \frac{R_M}{\varphi_M} \quad (10)$$

$R_M$  je zatezna čvrstoća, a  $\square_M$  maksimalna ravnomerna prirodna deformacija u testu jednoosnog zatezanja (jednaka je  $n$  faktoru).

Kad se izrazi (9) i (10) uključe u izraz (5) dobija se:

$$\sigma_r = 0,575 \cdot \frac{R_M}{\varphi_M} \ln \frac{\sqrt{1+m^2-\rho^2}}{m \cdot \rho} \ln \frac{\rho}{m} \quad (11)$$

Sila trenja na obodu, s obzirom na kontakt sa obe strane lima, iznosi:

$$F_{TRD} = 2 \cdot \mu \cdot F_D \quad (12)$$

Odgovarajući napon je:

$$\sigma_{ird} = \frac{2\mu F_D}{d\pi s} \quad (13)$$

Faktor trenja  $k_{\square}$  u izrazu (2) ima vrednost:  $k_{\mu} = e^{\frac{\mu\pi}{2}}$  (14)

Sila trenja na radijusu matrice može da se izrazi kao:

$$F_{TRM} = (F_{OBL} + F_{TRD}) \left( e^{\frac{\mu\pi}{2}} - 1 \right) \quad (15)$$

Sila savijanja i ispravljanja lima oko radijusa matrice i njoj odgovarajući napon su:

$$F_{SAVIS} = A \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad (16)$$

$$\sigma_{savis} = \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad (17)$$

U prethodnim izrazima  $r_M$  je radijus matrice.

Imajući u vidu izraze (1) do (17) i usvajajući da su koeficijenti trenja na držaču i radijusu matrice jednaki (što odgovara realnosti) dobija se sledeći izraz za silu izvlačenja:

$$F_{IZ} = d\pi s \left[ \left( 0,575 \frac{R_M}{\phi_M} \ln \frac{\sqrt{1+m^2-\rho^2}}{m \cdot \rho} \ln \frac{\rho}{m} + \frac{2\mu F_D}{d\pi s} \right) e^{\frac{\mu\pi}{2}} + \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \right] \quad (18)$$

Pored geometrijskih konstantnih parametara ( $d$ ,  $s$ ,  $m$ ,  $r_M$ ), karakteristika materijala ( $R_M$  i  $\phi_M$ ) u izrazu (18) figurise koeficijent trenja  $\mu$  i sila držanja  $F_D$ . Za silu  $F_D$  uzima se konstantna vrednost na osnovu empirijskih preporuka ili sa graničnog dijagrama nabora i razaranja  $h\phi F_D$ . Za potrebe eksperimenta pogodno je relativno smanjenje oboda dovesti u vezu sa vremenom. Uz pretpostavku o linearnoj vezi dobija se:

$$\rho = 1 - \frac{1-m}{T_{max}} t \quad (19)$$

S obzirom na princip prikazan na sl. 1 i izraz (18) konačno se funkcija kombinovane PSD dobija u obliku:

$$F_D = 2F_{COR} - F_{IZ} \quad (20)$$

Prethodni izrazi mogu da se primene i na prizmatične komade kvadratnog preseka, s tim što se umesto prečnika  $d$  uzima ekvivalentni prečnik  $d_e$ . Praktično, površina poprečnog preseka izvlačka svodi se fiktivno na površinu kruga.

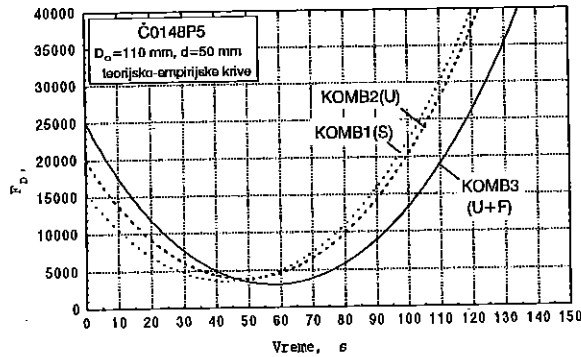
### 3. REZULTATI EKSPERIMENTA

Eksperiment je izveden na specijalnoj laboratorijskoj aparaturi čiji glavni delovi su hidraulična presa za ispitivanje limova ERICHSEN 142/12 i merno upravljački kompjuterski sistem, koji omogućava merenje sile izvlačenja, sile držanja, visine nabora na obodu i upravljanje silom držanja. Moguće je ostvariti praktično, proizvoljnu zavisnost sile držanja od vremena /3/.

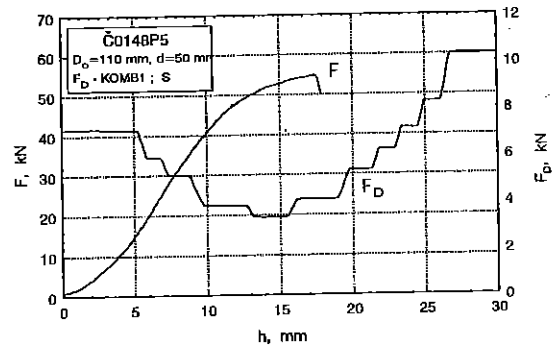
Ovde će biti prikazan deo rezultata dobijenih uz primenu kombinovane sile držanja pri izvlačenju cilindričnog komada od klasičnog niskougljeničnog čeličnog karoserijskog lima debljine 0,8 mm. Detalji vezani za karakteristike materijala dati su u /3/. Geometrija komada je definisana prečnikom komada  $d=50$  mm i stepenom izvlačenja 2,2 (koeficijent izvlačenja  $m=0,454$ ).

S jedne strane definisana je konstantna sila držanja (KSD) na osnovu empirijskih preporuka iz literature  $F_D=13,72$  kN /3/, a s druge, tri zavisnosti kombinovane PSD prema izrazima

datim u prethodnom poglavlju. Svaka od krivih (sl. 2) odnosi se na jedan tip kontaktnih uslova (suve površine, primena ulja, primena ulja i folije).



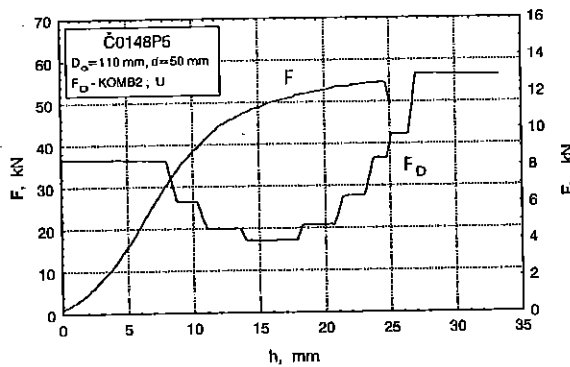
Sl. 2 Zavisnosti kombinovane PSD



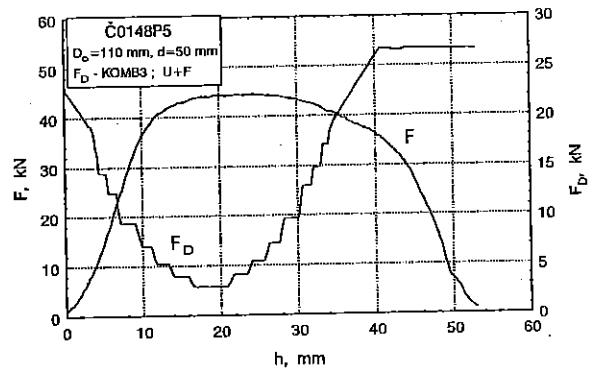
Sl. 3 Sila izvlačenja i sila držanja KOMB1

Ostvareni efekti prate se preko: dijagrama zavisnosti sile izvlačenja od hoda, dubine izvlačenja sa kvalitativnom ocenom o naborima i razaranju na komadu, distribucije deformacija u koordinatnom sistemu glavnih deformacija u ravni lima ( $\square_1 \square_2$ ) i distribucije stanjenja zavisno od položaja na komadu.

Na slikama 3 do 5 prikazane su izmerene krive sile izvlačenja uporedo sa ostvarenim silama držanja. U uslovima jako izraženog trenja (suve površine) sa PSD KOMB1 maksimalna dubina izvlačenja se povećava za 32,3 % u odnosu na računsku KSD. U mešovitom režimu trenja (ulje) povećanje dubine iznosi 10,8% (KOMB2). Primenom sile držanja KOMB3 dobija se puna dubina komada, ali od dubine č38 mm primetni su manji nabori koji se tokom procesa pglaju.

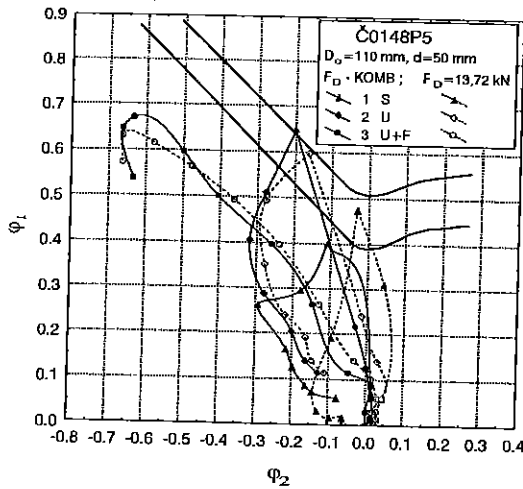


Sl. 4 Sila izvlačenja i sila držanja KOMB2

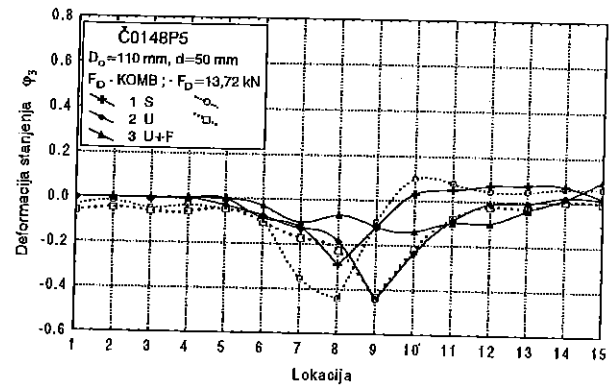


Sl. 5 Sila izvlačenja i sila držanja KOMB3

Sl. 6 prikazuje distribucije deformacija u ravni lima. Vrlo jasno su izraženi uticaji kako sile držanja tako i trenja. U slučaju suvih površina sila držanja KOMB1 rezultira povoljnijom distribucijom. Petlja je šira, čime je smanjen gradijent stanjenja, što se direktno vidi na sl. 7. Kao posledica dolazi znatno povećanje dubine komada. Sa smanjenjem trenja smanjuje se i uticaj sile držanja. U uslovima veoma malog trenja (ulje i folija) promena u distribucijama praktično nema. Primena ulja dovodi do malih poboljšanja uz primenu sile KOMB2.



Sl. 6 Distribucija deformacija pri PSD KOMB



Sl. 7 Distribucije deformacije stanjenja (KOMB)

## ZAKLJUČAK

Zahvati u oblasti primene promenljivih sila držanja pri dubokom izvlačenju mogu da rezultiraju značajnim poboljšanjima performansi procesa i kvaliteta komada.

Konkretno izvedeni eksperimenti sa primenom originalno koncipirane tzv. kombinovane zavisnosti na cilindričnom komadu, daju značajna poboljšanja u uslovima jakog trenja na obodu (veća dubina komada, povoljnije distribucije deformacija). Uporedjenja su vršena u odnosu na primenu konstantne sile držanja definisane po već klasičnim empirijskim preporukama.

## ABSTRACT

### THE CHOICE OF THE VARIABLE BLANK HOLDING FORCE IN DEEP DRAWING

*Blank holding force is significant parameter which is possible to change during the process of deep drawing. Variable blank holding force (VBF) enable to influence on work part behaviour and also on final results of the process.*

*Presented in the article is original way of one kind of VBF dependence determination and part of experimental results obtained with low carbon autobody steel sheet metal. Experiment is realized on special laboratory researching equipment with computer based control. Given is comparative view of results in conditions of constant blank holding force defined on classic way.*

## LITERATURA

- /1/ Siegert K. et al. : Closed loop control system for blank holder forces in deep drawing, Annals of the CIRP, Vol. 44/1/1995., pp. 251-254.
- /2/ Siegert K., Ziegler M., Wagner S. : Closed loop control of the friction force. Deep drawing process, Journal of Mater. Proc. Technol. 71 (1997), pp. 126-133.
- /3/ Aleksandrović S. : Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2000.