



## DUBOKO IZVLAČENJE PRI PROMENLJIVOJ SILI DRŽANJA I SLOŽENOJ ISTORIJI DEFORMISANJA

Srbislav Aleksandrović<sup>1</sup>, Milentije Stefanović<sup>1</sup>, Tomislav Vujinović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mašinski fakultet Kragujevac

<sup>2</sup> Čajavec MEGA, Banja Luka, Republika Srpska, BiH

**Rezime:** U radu se daju rezultati eksperimentalnih ispitivanja jednostrano prevučenog lima (galvanska prevlaka od cinka) debljine 0,8 mm. Geometrija komada je cilindrična prečnika 50 mm a razvijeno stanje prečnika 110 mm. Za ovu geometriju definisana je funkcionalna zavisnost promenljive sile držanja (PSD) od hoda empirijsko-analitičkom procedurom. Funkcija je definisana prema uslovu održanja konstantnog specifičnog pritiska držača (opadajuća zavisnost PSD). U prvom slučaju primenjena je PSD u uslovima monotonog deformisanja (jednofazni proces) i sa tri kontaktne stanja (suvo, korišćenje ulja i korišćenje ulja sa polietilenskom folijom). U drugom slučaju izveden je dvofazni postupak koji u prvoj fazi ima jednoosno zatezanje čiji pravac se poklapa sa pravcem valjanja, a u drugoj. fazi duboko izvlačenje. Efekti PSD i istorije deformisanja prate se preko distribucija glavnih deformacija u ravni lima, deformacija stanjenja, dubina i sila izvlačenja. U zaključku treba istaći da opadajuća PSD dovodi do unapređenja rezultata procesa pri monotonom deformisanju. Kod nemonotonog postupka opadajuća sila držanja ne dovodi do većih promena dubina izvlačenja, ali su primetne povoljnije distribucije deformacija.

**Ključne reči:** duboko izvlačenje, nemonotono deformisanje, promenljiva sila držanja

## DEEP DRAWING IN CONDITIONS OF VARIABLE BLANK HOLDING FORCE AND COMPLEX STRAIN PATH

**Abstract:** In this paper results of experimental investigations of galvanized sheet metal zinc coated at one side (marked TyZn1) will be given. Material is 0,8 mm thick. Work piece is of a cylindrical geometry with diameter 50 mm. Blank diameter is 50 mm. Blank diameter is 110 mm. For that geometry, variable holding force (VBF) dependence was obtained by empirically-analytical procedure. Functions were obtained at given condition of constant specific holder pressure (VBF decreasing dependence). In the first case, VBF was applied, with change of contact conditions (dry, oil, and oil plus polyethylene foil) without strain history change (one phase procedure). In the second case, two phase procedure was performed. At first phase sheet metal has undergone uniaxial tension towards rolling direction. At the second phase, out of the strained sheet metal blanks were cut out for the operation of deep drawing. The effects of the VBF and variable strain history influence are monitored through principle plain strains distributions, thinning strain distributions, depth and drawing force. In the conclusion we should emphasise that decreasing VBF shows obvious advantages in case without strain history change. With tension at the first stage, decreasing holding force does not bring to improvement concerning the drawing depth, but more uniform thinning strain distributions is obvious.

**Key words:** deep drawing, nonmonotonous forming, variable blank holding force

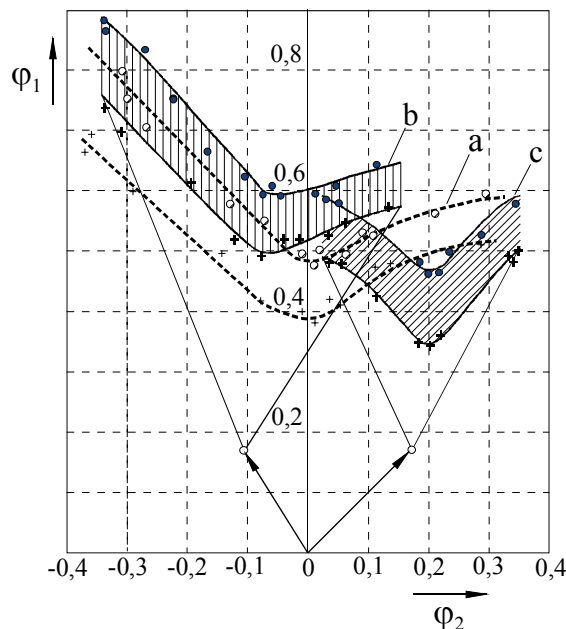
### 1. UVOD

Duboko izvlačenje predstavlja jednu od dominantnih tehnologija u savremenoj industriji uopšte, a centralno mesto zauzima u okviru tehnologija namenjenih preradi limova. Prethodne tvrdnje moguće je dokazati posredno preko količina proizvedenih limova u svetu. Procenjena proizvodnja svih vrsta limova (hladno valjanih, toplo valjanih i prevučenih) u 2003. godini iznosila je 204 500 000 tona (web sajtovi, [1]). Registrovani izvoz ovih polufabrikata u 2002. g. iznosio je 107 100 000 tona (web sajtovi, [2]). Produkcija aluminijumskih limova samo u zapadnoj Evropi 2004. g. iznosila je 4 157 000 tona (web sajtovi, [3]).

Trenutno stanje razvoja tehnologije dubokog izvlačenja karakterišu naponi da se ostvari potpuno upravljanje procesom. Realizovani su različiti kompjuterski upravljani sistemi često veoma velike složenosti [1, 2]. U svakom od njih upravljačka dejstva izvode se samo na dva načina: preko trenja na obodu (ključan parametar sila držanja) i preko upravljanja klizanjem lima na obodu (parametar je visina zateznih rebara). To su jedina dva

parametra kojima je moguće upravljati za vreme trajanja procesa. Kvantifikovanje stepena njihovog uticaja na rezultate procesa je složen zadatak. Ovaj rad razmatra uticaj sile držanja, ali paralelno sa ostvarivanjem složene istorije deformisanja preko dvofaznog nemonotonog procesa.

Matematički opis i razumevanje procesa plastičnog deformisanja relativno su jednostavniji za monotone postupke [3, 4]. Međutim, realni procesi se najčešće izvode u uslovima koji odstupaju od proporcionalnog deformisanja. To je naročito izraženo u višefaznim (višeoperacionim) postupcima. Veoma je pogodno uticaj složenih putanja deformisanja prikazati na dijagramu granične deformabilnosti (DGD). Tu se neposredno vidi kakve promene na graničnim krivama izaziva odgovarajući nemonotoni tok procesa. Sl. 1 daje prikaz tri para graničnih krivih (lokalizacija-donja kriva, razaranje-gornja kriva) za niskougljenični čelični lim sa jednostranom galvanskom prevlakom od cinka debljine 0,8 mm, koji je korišćen i u narednim eksperimentima vezanim za ovaj rad. Isprekidanim linijama date krive (a) odnose se na monotoni jednofazni postupak. Za svaku tačku krive putanja deformisanja je prava linija. Krive označene sa b rezultat su dvofaznog nemonotonog procesa, pri čemu se svaka tačka dobija putanjom deformisanja koja u prvoj fazi ima jednoosno zatezanje, a u drugoj prave u prikazanom rasponu. Sa c su označene krive za, takođe, dvofazni postupak ali koji u prvoj fazi ima čisto dvoosno zatezanje (biaxial tension). Važno je istaći da složena istorija deformisanja primetno menja položaj graničnih krivih odnosno utiče na vrednosti graničnih deformacija. Za prvi postupak (b) krive su pomerene levo i nešto su iznad krivih osnovnog dijagrama DGD. Za drugi postupak (c) krive su pomerene udesno sa sličnim vrednostima graničnih deformacija kao kod osnovnog DGD. Može se zaključiti da prethodno jednoosno zatezanje povoljnije



**Slika 1:** Dijagram granične deformabilnosti pri složenim dvofaznim istorijama

utiče na položaj krivih DGD u odnosu na dvoosno zatezanje.

## 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperiment je planiran tako da u prvom delu omogući ispitivanje karakteristika materijala, u drugom delu - prethodno jednoosno zatezanje širokih traka lima i u trećem duboko izvlačenje uz primenu promenljive sile držanja (PSD) za vreme procesa oblikovanja. (during the forming process). Eksperimentalna oprema je detaljnije data u [3, 5], a ovde treba naglasiti mogućnost dobijanja promene sile držanja zavisno od vremena (ili dubine izvlačenja) u bilo kojoj formi analitičke ili diskretne zavisnosti.

Jednoosno su zatezane trake širine 130 mm i merne dužine 500 mm, do deformacije  $\phi_1=9,5\%$  i  $\phi_2=-4,75\%$ . Iz takvih traka prosecana su razvijena stanja prečnika 110 mm za duboko izvlačenje u drugoj fazi.

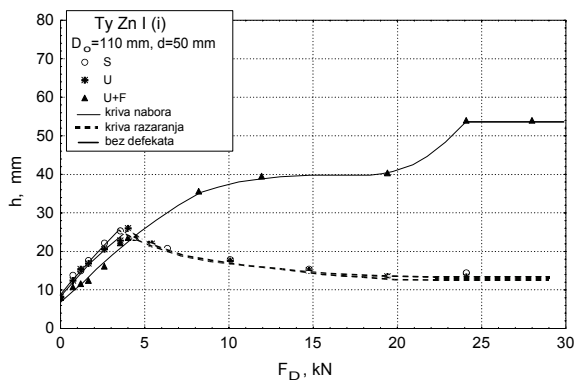
Geometrija komada za duboko izvlačenje je cilindrična, prečnika 50 mm sa stepenom izvlačenja 2,2. Primenjena su tri kontaktna stanja tj. tipa trenja: suvo (oznaka S), mešovito (ulje, oznaka U) i kvazi-hidrodinamičko (ulje i PET folija, oznaka U+F). Korišćena je opadajuća PSD. Primena konstantne sile držanja (KSD) služi kao osnova za upoređenje. Uporedo je realizovan jednofazni (monotoni) i dvofazni (nemonotoni) proces izvlačenja.

Materijal komada je galvanskim putem jednostrano pocinkovan niskougljenični čelični lim debljine 0,8 mm namenjen izradi spoljašnjih delova karoserije automobila. U ovom radu korišćiće se oznaka TyZnI. Ima zateznu čvrstoću  $R_M=311,8$  MPa; granicu tečenja  $R_P=199,8$  MPa i krivu ojačanja u formi eksponencijalne aproksimacije  $K=537,6\phi^{0,221}$  MPa. Potpuni geometrijski podaci su: nominalni prečnik komada  $d=50$  mm; visina  $h=52,5$  mm;

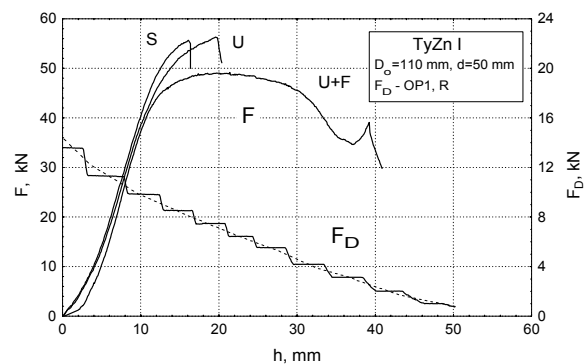
debljina lima  $s=0,8$  mm; radijus dna  $r=6,5$  mm; radijus zaobljenja matrice  $r_M=3,5$  mm; prečnik razvijenog stanja  $D_0=110$  mm.

Veoma ilustrativan prikaz uticaja sile držanja na rezultate procesa dubokog izvlačenja daju dijagrami zavisnosti dubine izvlačenja od sile držanja sa graničnim krivama nabora i razaranja. Sl. 2 jasno pokazuje efekte kontaktnih uslova, daje granične dubine izvlačenja prema kriterijumu pojave nabora i razaranja i ukazuje na uticaj sile držanja. Dubina izvlačenja je ključni tehnološki parametar. Veća dubina izvlačenja uz zadovoljene zahteve u pogledu eventualnih defekata (devijacije oblika i dimenzija, kvalitet površine) označava uspješnije izveden proces oblikovanja. Za krive na sl. 2 prevlaka je okrenuta prema izvlačkaču. Granični dijagrami zavisnosti dubine izvlačenja od sile držanja pružaju mogućnost optimizacije konstantne sile držanja uz bitno poboljšanje rezultata procesa [3]. Za dobijanje ovih dijagrama potrebne su serije komada (jedna tačka, jedan radni komad) i odgovarajuća laboratorijska oprema. Kvalitetni softveri za simulaciju mogu da budu veoma korisni.

Konstantna sila držanja (CBF) definisana je kao srednja vrednost 9 najčešće korišćenih preporuka iz literature [3]. U ovom slučaju njen intenzitet je 13928,5 N (nominalni specifični pritisak držača  $q=2,05$  MPa).



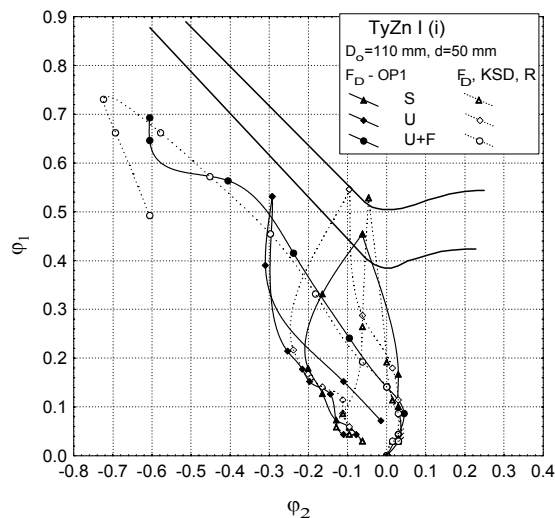
Slika 2: Zavisnost dubine od sile izvlačenja – granične krive nabora i razaranja



Slika 3: Zavisnost sile izvlačenja i sile držanja od hoda

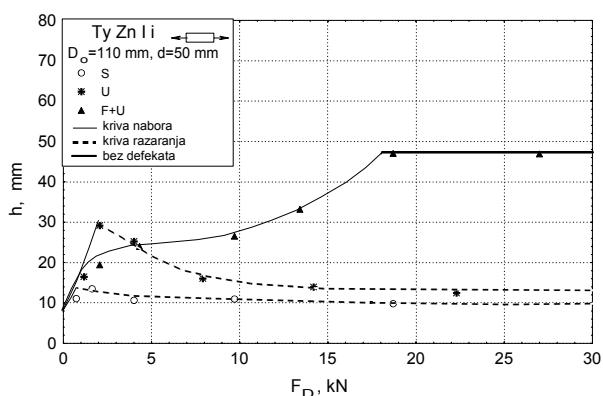
Za promenljivu silu držanja (VBF) izabrana je opadajuća zavisnost definisana na osnovu principa održanja konstantne vrednosti specifičnog pritiska  $q$ . Tokom procesa kontaktna površina na držaču opada i u skladu sa tim potrebno je da opada i intenzitet sile držanja. Relativno jednostavnim geometrijskim transformacijama moguće je doći do funkcije koja daje zavisnost površine oboda od vremena [3]. Pretpostavlja se (što odgovara realnosti) linearna veza prečnika oboda i vremena ( $t$ ) i hoda izvlačkača i vremena. Konačan oblik opadajuće funkcije sile držanja je:

$$F_D = 13928.5 - 120.37 \cdot t + 0.1875 \cdot t^2, \text{ N}$$



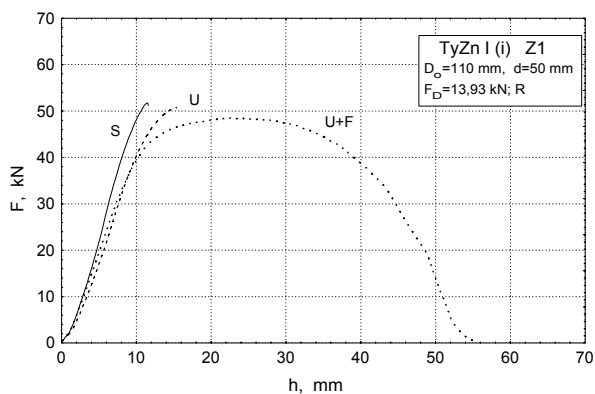
Slika 4: Uporedni prikaz distribucija deformacija u ravni

Rezultati procesa znatno detaljnije mogu da se sagledaju na dijagramima distribucija deformacija (sl. 4). Distribucije na sl. 4 date isprekidanim linijama odnose se na primenu KSD, a punom na deformisanje pri PSD, obe za uslove monotonog deformisanja. Pri najmanjem trenju (U+F) KSD daje nešto bolje rezultate iako se pojavljuju manji nabori koji ipak mogu da se isprave prolaskom kroz otvor matrice. Ako se koristi opadajuća PSD nabori su veliki i proces mora da se prekine. Sa sl. 2 jasno se vidi da u oba slučaja nije dovoljan intenzitet sile držanja za izbegavanje nabora. U uslovima jačeg trenja petlje distribucija za primenu PSD su pomerene na dole i ulevo (sigurnija oblast oblikovanja sa većom rezervom plastičnosti) što objašnjava zašto su postignute dubine veće.

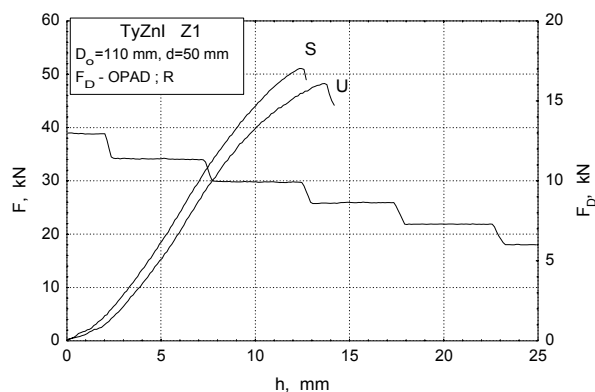


Slika 5: Granični dijagram nabora i razaranja za nemonotoni postupak

Sl. 5 daje zavisnost dubine izvlačenja od sile držanja, odnosno granične krive nabora i razaranja pri složenoj istoriji (dvofaznom procesu). Ako dijagram uporedimo sa sl. 2 zapaža se bitna razlika. U slučaju monotonog postupka razlika između krivih pri graničnom (S) i mešovitom (U) trenju nije izražena, dok je na sl. 5 ona znatna. Pri jačem trenju proces se odvija u teškim uslovima i postižu se veoma male dubine.



Slika 6: Sile izvlačenja za nemonotoni postupak pri konstantnoj sili držanja

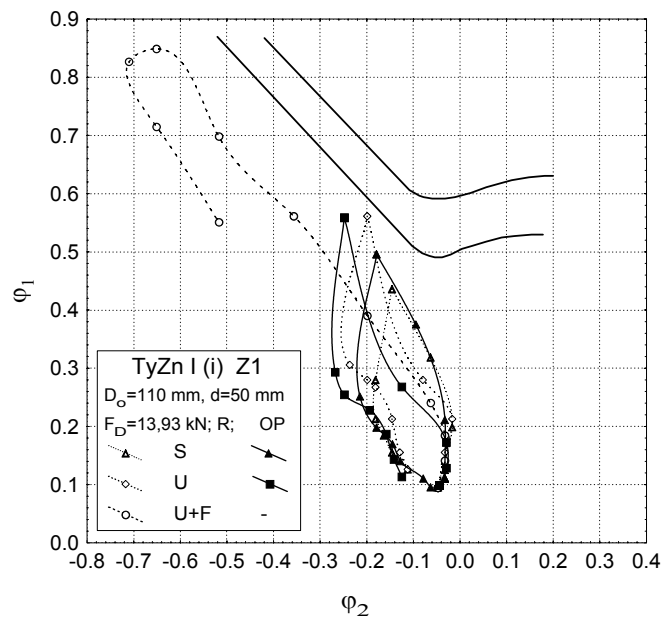


Slika 7: Sile izvlačenja i opadajuća sila držanja pri nemonotonom postupku

Sl. 6 daje očekivani rezultat. Pri najmanjem trenju (U+F) javljaju se mali nabori na kraju hoda sa kojima je moguće proces dovesti do kraja. Potvrđuje se [3, 4] da pri kvazi-hidrodinamičkom trenju treba delovati samo silom dovoljno velikog intenziteta da sigurno spreči nabore. Prekoračenje ne prouzrokuje bitne promene. Zato će na narednim slikama biti prikazani samo slučajevi sa intenzivnijim trenjem (S i U). Opadajuća PSD (sl. 7) ne dovodi do značajne promene kao u slučaju monotonog deformisanja. Dubine su slične kao i sa KSD. Objašnjenje treba tražiti u činjenici da promena sile držanja nije ni došla do punog izražaja jer se funkcija formira na hodu koji odgovara punoj dubini komada (oko 55 mm). Prevagu je odneo uticaj deformisanja u prethodnoj fazi, tako da se razaranja događa pri veoma malim dubinama.

Sl. 8 ilustrativno prikazuje efekte PSD. U slučaju opadajuće PSD petlje distribucija su uske, u nepovoljnom odnosu prema graničnim krivama dijagrama granične deformabilnosti i bitno se ne razlikuju od distribucija za

slučaj sa KSD. Na osnovu sl. 7 i sl. 8 očigledno je da opadajuća forma PSD pri nemonotonom postupku deformisanja ne dovodi do unapređenja rezultata procesa dubokog izvlačenja. Teški uslovi deformisanja i relativno veliki početni intenzitet sile držanja stvaraju okolnosti za relativno brzo razaranje.



Slika 8: Distribucije deformacija u ravni za nemonotoni postupak pri konstantnoj i opadajućoj sili držanja

### 3. ZAKLJUČAK

U ovom radu su eksperimentalnim istraživanjem dodirnuti složena pitanja plastičnog deformisanja pri složenoj istoriji, odnosno nemonotonim procesima na primeru dubokog izvlačenja prevučeni limova. Paralelno je primenjena promenljiva sila držanja za vreme trajanja procesa. Realizovan je dvofazni nemonotoni postupak sa jednoosnim zatezanjem u prvoj fazi i primenjena (pored konstantne) promenljiva sila držanja opadajućeg karaktera.

Nemonotoni postupak naglašava uticaj trenja. Manja promena režima trenja jače se manifestuje na odvijanje procesa nego pri monotonom procesu. Vidljiv je uticaj ojačanja iz prve faze, ali i stanjenja. Sila držanja ima znatan uticaj na proces i može da utiče na dobijanje većih dubina izvlačenja. Kad je reč o konstantnim silama držanja, empirijski određene su inferiorne u odnosu na mogućnost optimizacije preko graničnih dijagrama nabora i razaranja. Promenljive sile držanja zahtevaju relativno složen kompjuterski upravljački sistem ali pružaju mogućnost značajnih unapređenja. U ovom radu je pokazano da predložena opadajuća zavisnost može kvalitativno da unapredi rezultate pri monotonom procesu oblikovanja ali pri otežavajućim uslovima dvofaznog nemonotonog procesa ne dovodi do poboljšanja. To usmerava ka korišćenju drugih tipova promenljivih sila držanja.

### LITERATURA

- [1] E. Doege, H. -J. Seidel, B. Griesbach and J. -W. Yun: Contactless on-line measurement of material flow for closed loop control of deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, Vol.130-131, 2002, pp. 95-99.
- [2] Tetsuya Yagami, Ken-ichi Manabe, Ming Yang and Hiroshi Koyama: Intelligent sheet stamping process using segment blankholder modules Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, 2004, pp. 2099-2105.
- [3] Aleksandrović S.: Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2000.

- [4] Stefanović M.: Tribologija dubokog izvlačenja, Jugoslovensko društvo za tribologiju I Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1994.
- [5] Aleksandrović S., Stefanović M.: Defining of variable blank holding force in deep drawing, Journal for technology of plasticity, Novi Sad, Vol. 25 (2000), N<sup>o</sup> 1–2, pp. 59–69.

#### **WEB SAJTOVI**

1. [www.teckcominco.com](http://www.teckcominco.com)
2. [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)
3. [www.alunet.net](http://www.alunet.net)