



RASTUĆA SILA DRŽANJA KAO TRIBOLOŠKI FAKTOR PRI DUBOKOM IZVLAČENJU PREVUČENIH LIMOVA U USLOVIMA NEMONOTONOG DEFORMISANJA

Doc. dr Srbislav ALEKSANDROVIĆ, Mašinski fakultet Kragujevac

Prof. dr Milentije STEFANOVIĆ, Mašinski fakultet Kragujevac

Mr Tomislav VUJINOVIĆ, dipl. ing., Rudi Čajavec, Banja Luka, REPUBLIKA SRPSKA

INCREASING BLANK HOLDING FORCE AS TRIBOLOGIC FACTOR AT PURE DEEP DRAWING OF COATED SHEETS IN CONDITIONS OF NONMONOTONOUS FORMING

Abstract

Blank holding force (BHF) is normal force for friction on the work part flange and very significantly influences the deep drawing process.

Presented in the paper are analyze of variable increasing BHF influence during the process. The experimental researches were performed on a special laboratory computer device. Two type of drawing process are realized: monotonous and two-phased nonmonotonous with uniaxial tension at first phase.

Influence of increasing BHF, forming history and contact conditions (dry surfaces, use of oil and use of foil with oil) monitored are through: strain distributions (thick strain and sheet plane strains), change of forming limit, drawing force dependence on punch travel and work piece macro properties: drawing depth, appearance of wrinkles or tears.

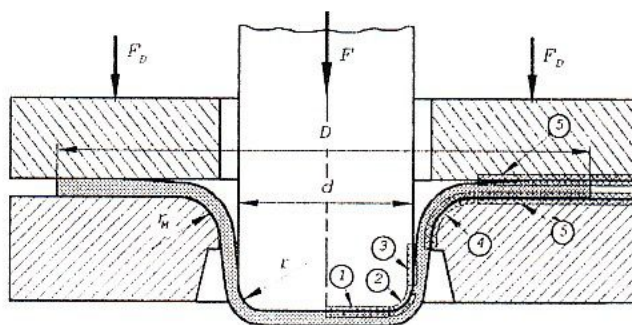
Observed is important possibility of influence on deep drawing process course and results, by using increasing BHF.

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

1. UVOD

Duboko izvlačenje je prema brojnim kriterijumima jedna od dominantnih tehnologija u industriji prerade metala.

U okviru napora ka potpunom ovladavanju procesom i njegovim rezultatima tribološki faktori stoje ravnopravno prema ostalim činiocima (materijal, alat, mašina) [1]. Osim toga postoje i dopunske karakteristike koje čine tribološke uticaje posebno značajnim. Pre svega to je mogućnost simultane promene tokom trajanja samog procesa [2]. Sa ovog aspekta naročito treba istaći silu držanja koja predstavlja normalnu silu za trenje na obodu. Ilustrativan je podatak da potpunom eliminacijom trenja na obodu (zona 5 na sl. 1) ukupna deformaciona sila izvlačenja može u nekim slučajevima da opadne i oko 50% , a eliminacijom trenja na zaobljenju matrice (zona 4 na sl. 1) oko 20% [3]. Evidentno, upravljanje silom držanja tokom procesa omogućava upravljanje trenjem na obodu, a time značajan uticaj na tok i rezultate procesa.



Slika 1. Zone trenja pri dubokom izvlačenju

Otvoreno je pitanje kakav je optimalan zakon promene zavisnosti sile držanja od hoda izvlačaća u datim uslovima. U brojnim istraživanjima primenjuju se različiti pristupi. S jedne strane koriste se veliki komercijalni softverski paketi za simulaciju procesa plastičnog oblikovanja. Takvim simulacijama (umesto eksperimenata) se po sistemu proba greška korekcija sagledavaju efekti različitih uticaja, pa i promenljivih sila držanja (PSD). Izvestan problem predstavlja nemogućnost potpuno uspešnog

modeliranja veoma složenih fenomena plastičnog oblikovanja limova [4]. Pored toga razni autori specifičnim numeričkim modeliranjima [na pr. 5] pokušavaju da dobiju optimizirane zavisnosti PSD. I pored nesumnjivog značaja numeričkih simulacija nezamenljivu ulogu ima eksperimentalni pristup. Glavne teškoće pri tome su sledeće:

a) nepostojanje teorijski definisanih optimalnih zavisnosti PSD ili sile trenja na obodu,

b) tehnički problemi oko merenja promene debljine lima u kritičnoj zoni komada simultano tokom eksperimenta.

I pored toga, savremeni merno upravljački sistemi [6] omogućavaju izvođenje složenih eksperimenata uz značajne rezultate.

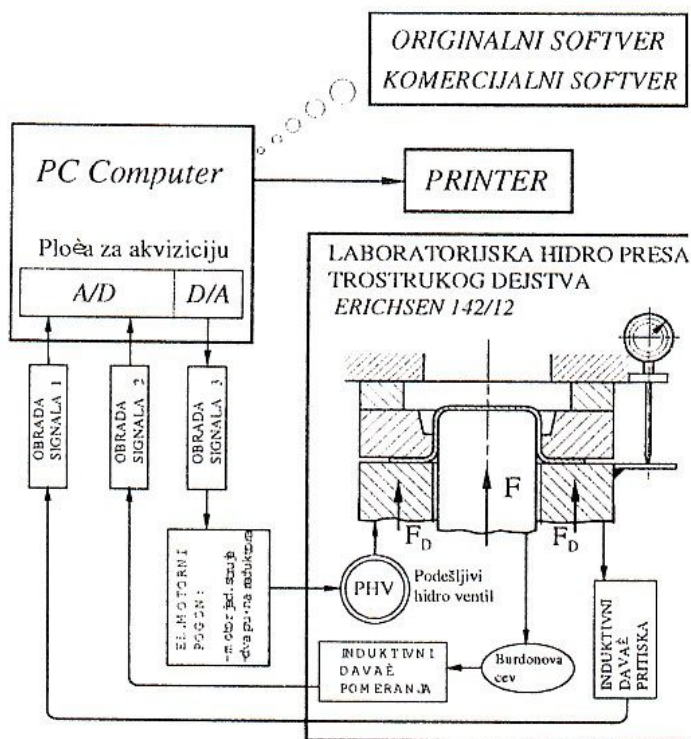
U okviru istraživanja koja se izvode na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu [7, 8] formirana je merno upravljačka kompjuterska aparatura za istraživanje uticaja PSD na proces dubokog izvlačenja. Deo tih istraživanja prezentiran je u ovom radu.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

2.1 Oprema i osnovni podaci o eksperimentu

Laboratorijsku aparaturu čine dve osnovne celine: hidraulična presa za ispitivanje limova ERICHSEN 142/12 i merno upravljački računarski sistem izveden kao dogradnja (sl. 2).

Presa je trostrukog dejstva (izvlačenje, držanje, izbacivanje) sa mernim opsegom sile glavnog dejstva 0-130 kN i držanja 0-32 kN. Maksimalna brzina deformisanja pod opterećenjem je 200 mm/min. Maksimalni prečnik izvlačkača je 50 mm, a maksimalni stepen izvlačenja 2,4. Bez ulaska u



Slika 2. Struktura eksperimentalne aparature

detalje [8, 9] treba naglasiti da sa instaliranim davačimai sistemom za akviziciju i upravljanje aparatura može da ostvari bilo kakvu zadatak zavisnost PSD uz merenje i vizuelno praćenje tokom procesa, stvarne sile držanja (uporedo sa zatom zavisnošću) i sile izvlačenja. Sve potrebne veličine se memorišu za eventualnu naknadnu obradu. Mehanički je moguće meriti visinu nabora na obodu sa tačnošću očitavanja 0,01 mm.

Klasično razmatranje uticaja trenja na proces dubokog izvlačenja podrazumeva odgovarajuću konstantnu vrednost intenziteta sile držanja uz što je moguće veće smanjenje trenja u zonama 4 i 5 (sl. 1). Zone 1, 2 i 3 su od nešto manjeg značaja, ali se pokazalo da porast trenja u zonama 1 i 2 daje povoljne rezultate. Kritično mesto s obzirom na stanjenje lima i eventualnu pojavu pukotine je prelaz između zona 2 i 3.

Pri konstantnoj sili držanja kontaktni pritisak raste saglasno smanjivanju kontaktne površine u zoni 5. Korišćenje PSD ima smisla ako je režim trenja na obodu granični ili mešoviti. Pri "kvazi-hidro-dinamičkom" režimu (primena viskoznijih maziva uz različite folije) trenje je minimalno pa sila držanja kao normalna sila bitno ne utiče na silu trenja, a time ni na proces oblikovanja. Osnovni problem za primenu PSD predstavlja nepoznavanje najpogodnijih zavisnosti u pojedinim fazama procesa ni u teorijskom ni u eksperimentalnom smislu. Praktično, ne zna se kako treba menjati silu držanja (odnosno silu trenja) tokom procesa da bi se unapredile performanse procesa (dubina izvlačenja do kritičnog defekta, distribucije deformacija, granična deformabilnost).

Rezultati istraživanja izloženi u ovom radu direktno se nadovezuju na rad [9]. Ovde je osnovna ideja razmatranje uticaja PSD i promenljivih kontaktnih uslova u kombinaciji sa složenom istorijom deformisanja (nemonotoni postupak) na proces dubokog izvlačenja jednostrano galvanski pocinkovanog lima debljine 0,8 mm. U radu [9] razmatra se monotono deformisanje. Karakteristike materijala detaljno su date u [8]. Geometrija komada je cilindrična (čisto duboko izvlačenje) prečnika 50 mm i stepena izvlačenja 2,2. Radijus čela izvlačkača je 6,5 mm, a matrice 3,5 mm. Brzina deformisanja je 20 mm/min. Nemonotonost je postignuta dvofaznim procesom. U prvoj fazi izvodi se jednoosno zatezanje traka širine 130 mm i merne dužine 500 mm na specijalnom uređaju [8]. Stepent deformisanja je 10 %, a zatezanje se poklapa sa pravcem valjanja. Iz zategnutih traka prosecaju se razvijena stanja i izvlače u drugoj fazi. Pri je tome pocinkovana strana okrenuta prema izvlačkaču [9].

Eksperiment je planiran tako da se, s jedne strane, izvlačenje izvode u uslovima konstantne sile držanja (KSD), odabrane na odgovarajući način i, s druge strane, primenom rastuće zavisnosti PSD. Kontaktni uslovi diktirani su: suvim kontaktnim

površinama, primenom ulja za duboko izvlačenje i primenom ulja i polietilenske folije. U trećem slučaju trenje je veoma malo, tako da PSD nema bitnog uticaja na proces, ali je time postavljen reper potreban zbog upoređenja.

Intenzitet KSD određen je posle analize 9 preporuka iz literature [8], kao odgovarajuća jedinstvena srednja vrednost, koja ovde iznosi 13928,5 N.

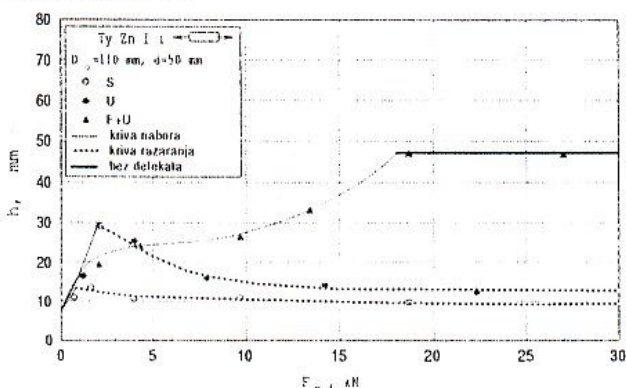
Monotono rastuća zavisnost PSD definisana je na osnovu eksperimentalnih istraživanja, kao minimalna sila držanja dovoljna za sprečavanje nabora na obodu. Obradom obimnih eksperimentalnih rezultata dobijena je sledeća funkcionalna veza [8]:

$$F_D = 1,175 \cdot F_{Dmax} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{h}{h_{max}}\right) \quad (1)$$

F_{Dmax} je maksimalna vrednost KSD prema empirijskim preporukama, h je hod izvlačka, a h_{max} maksimalna dubina izvlačenja. Druga varijanta definisanja F_{Dmax} je korišćenje graničnih krivih nabora i razaranja (sl. 3). Bira se sila držanja s obzirom na kontaktne uslove, pri kojoj se postiže najveća dubina. Pokazalo se da je povoljno tu silu povećati do 10 % radi sigurnog eliminisanja nabora.

2.2 Rezultati eksperimenta

Upoređenjem graničnih krivih sa slike 3 i odgovarajućih za monotoni proces [8, 9] zapaža se značajna razlika.



Slika 3. Granični dijagram nabora i razaranja

Sa povećanjem trenja razlika između odgovarajućih krivih je sve veća. Pri suvom trenju oblast nabora je veoma uska, a maksimalna dubina komada približno duplo manja u odnosu na monotono deformisanje. I ovde se potvrđuje poznat efekat znatno pojačanog uticaja triboloških uslova pri nemonotonim procesima oblikovanja.

Konačan oblik rastuće funkcije PSD (1) je:

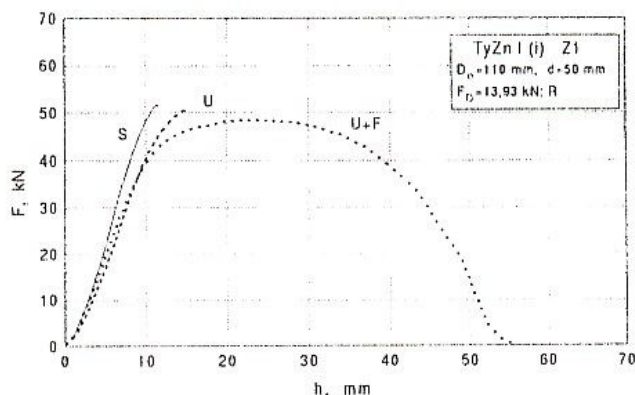
$$F_D = 16253 \sin(0,00952 t), \text{ N} \quad (2)$$

Za F_{Dmax} je usvojena izabrana KSD $F_{Dmax} = 13928,5$ N. Argument sinusne funkcije je u radijanima, a t je vreme u sekundama. Pretpostavljena je linearna veza između hoda izvlačka i vremena što u uslovima konstantne brzine deformisanja odgovara realnosti [8].

U ovom radu pratiće se prvenstveno efekti primene PSD definisane izrazom (2) komparativno sa primenom KSD, u uslovima nemonotonog procesa čije su osobine prethodno opisane. Prate se:

- kvalitativne karakteristike komada (dubina izvlačenja, pojava nabora, pojava razaranja),
- distribucije glavnih deformacija u ravni lima i njihov položaj prema krivama granične deformabilnosti,
- distribucije deformacije stanjenja zavisno od lokacije na komadu i
- dijagrami zavisnosti sila izvlačenja i sila držanja zavisno od hoda izvlačka, odnosno vremena.

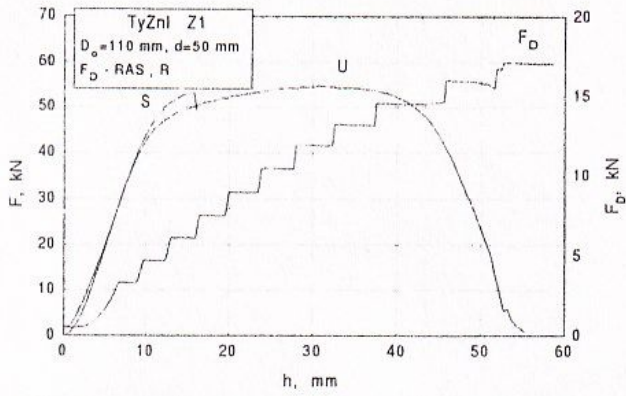
Na slikama 4 i 5 vidi se, u izvesnom smislu, tok i rezultat procesa. Primenom rastuće PSD pri suvom trenju dubina poraste za 33 % u odnosu na KSD. U uslovima mešovito trenja (primena ulja za duboko izvlačenje) efekat je izuzetno povoljan. Sa KSD ostvarena dubina je svega oko 15 mm pre razaranja. Korišćenjem PSD rastućeg karaktera ostvaruje se puna dubina, odnosno uspešan komad. Registrovani su jedino zanemarljivo mali nabori na obodu, koji su prolaskom kroz otvor matrice ispeglani. Potpunim razdvajanjem kontaktnih površina na obodu mazivom i folijom uz primenu KSD dobija se uspešan komad. Pri ovako minimiziranom trenju sklonost ka pojavi nabora se jako povećava pa je potrebno koristiti ynatno veće intenzitete KSD. Sa praktičnog stanovišta, treba naglasiti da je u ovom slučaju relativno komplikovana priprema kontaktnih površina.



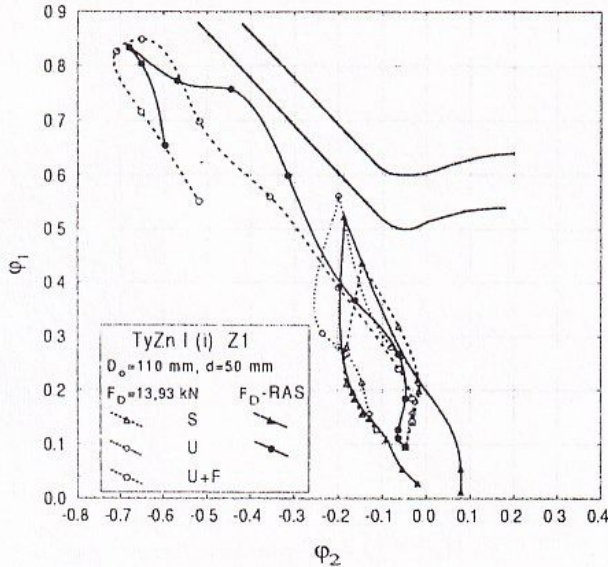
Slika 4. Sile izvlačenja pri KSD

Slika 6 prikazuje distribucije deformacija u ravni lima i njihov odnos prema krivama granične deformabilnosti koje su definisane s obzirom na nemonotonost procesa oblikovanja. Uočavaju se kvalitativno bolji rezultati primenom PSD.

Dve petlje distribucija na komadima dobijenim uz rastuću PSD (pune linije ispod krivih granične deformabilnosti na sl. 6) pri suvom i mešovitom režimu podmazivanja, ilustrativno pokazuju ostvarena poboljšanja. Pri suvom trenju, iako je došlo do razaranja, petlja pokriva širu zonu ϕ_2 (od 0,08 do - 0,2), što govori o ravnomernijem deformacionom polju. U slučaju mešovito trenja, razvijenoj širokoj petlji komada koji je uspešno doveden do pune dubine nije potreban komentar.

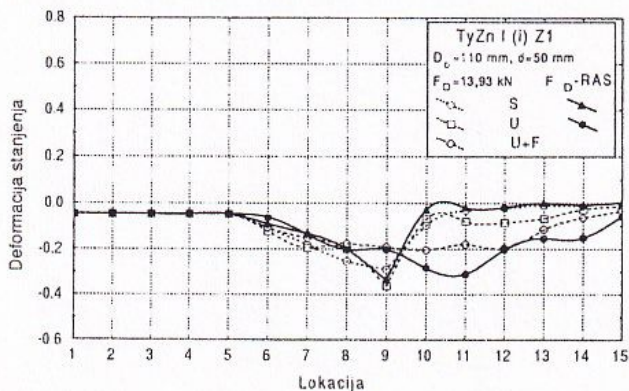


Slika 5. Sile izvlačenja i stvarna rastuća sila držanja



Slika 6. Distribucije glavnih deformacija u ravni lima

Za duboko izvlačenje uvek je bitnije steći uvid u raspodelu deformacije stanjenja lima, zato što se neposredno vidi do koje je mere proces oblikovanja bio kritičan. Pri suvom trenju, iako je dubina izvlačenja veća za više od trećine ako se primeni rastuća PSD raspodela stanjenja je skoro identična (sl. 7), što znači da je za dostizanje kritične (granične) vrednosti deformacije (koja se nije bitno izmenila) bilo potrebno znatno više vremena.



Slika 7. Distribucije deformacije stanjenja

Zanimljiva i poučna je i slika distribucije stanjenja pri mešovitom trenju (primena ulja). Maksimalna deformacija je skoro ista kao i kritična pri suvom trenju, ali je postignuta ravnomernost koja rezultira uspešnim komadom.

Čini se da su pojedine faze procesa u prethod-

nom slučaju tako usklađene s obzirom na efekat ojačanja, uticaj trenja na klizanje pojedinih zona i strukturne osobine materijala, da je stanjenje ravnomerno, bez lokalizacije deformisanja što rezultira uspešnim komadom.

3. ZAKLJUČAK

Kao u mnogobrojnim dosadašnjim istraživanjima (od kojih su neka pomenuta i ovde [2, 6, 7, 8, 9]) i u ovom se nedvosmisleno pokazalo da promenljiva sila držanja pri dubokom izvlačenju (u ovom slučaju u svojoj rastućoj varijanti) može da dovede do značajnih rezultata. Naročito u režimu mešovitog trenja rastuća PSD dovodi do izrazitog poboljšanja performansi procesa (veća dubina izvlačenja, znatno povoljnije distribucije deformacija). Mehanizam delovanja promenljive sile držanja u okviru vrlo složenog procesa plastičnog oblikovanja pri dubokom izvlačenju nije objašnjen. Ipak, do sada objavljeni rezultati istraživanja na fenomenološkom nivou (u koje spada i ovo) pokazuju značajne mogućnosti. To je posebno važno sa tehnološkog aspekta pri obradi teže obradivih limova (čelični limovi novih generacija, legure aluminijuma).

4. LITERATURA

1. M. Stefanović: Tribologija dubokog izvlačenja, Jugoslovensko društvo za tribologiju i Mašinski fakultet u Kragujevcu, monografija, 1994.
2. S. Wagner: Tribology in drawing car body parts, 11 th International colloquium, Technische Academie Esslingen, Proc., Vol. III, 1998.
3. W. Emmens: Tribology of Flat Contacts and its Application in Deep Drawing, PhD Thesis, University Twente, Netherlands, 1997.
4. A. Makinouchi, C. Teodosiu: Numerical methods for prediction and evaluation of geometrical defects in sheet metal forming, Comp. fluid and Solid Mechanics, 2001., pp. 21 25.
5. K. Osakada, C.C. Wang, K. Mori: Controlled FEM simulation for determining history of blank holding force in deep drawing, Annals of CIRP 44 1 (1995), pp. 243 246.
6. Siegert at al.: Closed loop control system for blank holder forces in deep drawing, Ann. of CIRP 44 1 (1995), pp. 251 254.
7. S. Aleksandrović, M. Stefanović: Mogućnost tribo loških uticaja na duboko izvlačenje preko promenljive sile držanja, YUTRIB 99.
8. S. Aleksandrović: Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2000.
9. T. Vujinović, S. Aleksandrović, M. Stefanović: Uticaj promenljivog kontaktnog pritiska na držaču na obradivost prevučениh limova dubokim izvlačenjem, 28. SPMJ, Kraljevo 2000, Zbornik s. 2.13 2.18.