

UTICAJ NEMONOTONOSTI DEFORMISANJA I PROMENLJIVIH TRIBOLOŠKIH USLOVA NA OBODU TOKOM PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA

Srbislav Aleksandrović, Mašinski fakultet, Kragujevac
Milentije Stefanović, Mašinski fakultet, Kragujevac
Tomislav Vujinović, Čajavec Mega, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

Abstract

Influence of two types of variable blank holding force (decreasing and increasing character) in two-phase nonmonotonous thin sheet forming process is considered in this paper. First phase is biaxial tension (stretching) and second pure deep drawing. Following properties are monitored: main surface strain distributions, thinning distributions, deformation force change and drawing depth change. Results clearly shows significance of variable blank holding force influence on deep drawing process.

Key words: *thin sheets, deep drawing, friction, variable blank holding force*

1. UVOD

Tehnologija dubokog izvlačenja tankih limova zauzima jedno od dominantnih mesta u savremenoj industriji. Ovu tvrdnju najbolje dokazuju količine utrošenih limova i intenzitet razvoja ovih polufabrikata tokom poslednjih par decenija.

Trenutna istraživanja [1, 2, 3] idu u pravcu pokušaja da se ostvari potpuno upravljanje procesom, odnosno omogući dobijanje komada bez defekata u opštem slučaju. Razvijeni su brojni kompjuterski merno-upravljački sistemi [1, 2, 3] često veoma velike složenosti. Značajnu ulogu u pripremnoj fazi imaju softveri za kompjutersku simulaciju [4] koji sve uspešnije vrše predikciju realnih pojava tokom procesa.

Odvijanje procesa dubokog izvlačenja (sa krutim elementima alata) limitirano je

opasnostima od pojave dva defekta: nabora na obodu i razaranja u kritičnoj zoni (najčešće okolina radijusa na dnu komada). Kvantifikacija ovih pojava vrši se preko sledećih pokazatelja: visine nabora i vrednosti deformacije stanjenja. Merenje prvog parametra zahteva veliku osetljivost i tačnost, ali ne predstavlja posebnu teškoću. U slučaju drugog, postoje problemi identifikovanja kritične zone i veoma preciznog merenja promene debljine lima tokom procesa. Brzina reagovanja i aktiviranja upravljačkih dejstava mora da bude velika. To znači da ulazak u lokalizovano deformisanje veoma brzo vodi pojavi pukotine, kao što se nabori, veće visine od granične, ne mogu otkloniti bez posledica.

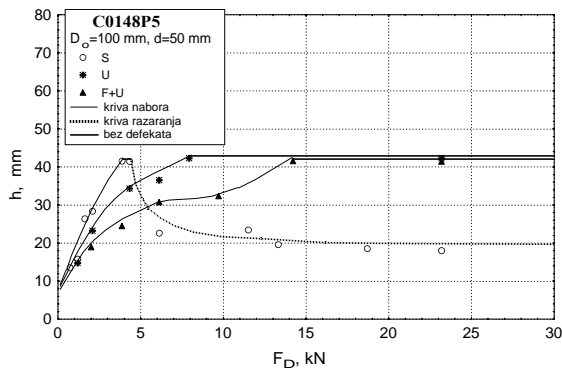
Upravljačka dejstva, [5] tokom procesa mogu da se izvode samo na dva načina: preko trenja na obodu (ključni parametar je promenljiva sila držanja) i preko klizanja i deformisanja oboda (promenljiva visina zateznih rebara).

Prema prethodnom, sila držanja je suštinski važan tribološki parametar i u ovom radu analizira se njen uticaj u specifičnim uslovima konkretnog procesa. Kombinovano se prati uticaj nemonotonosti procesa (plastičnog deformisanja u prethodnoj fazi) i promenljivih uslova trenja, diktiranih promenom sile držanja tokom procesa.

Pošto integralni i zaokruženi sistemi upravljanja, do sada nisu ostvareni, ovakva istraživanja treba da ukažu na suštinu procesa i načine kako prići upravljanju silom držanja, s jedne strane i kakvi se efekti dobijaju, s druge strane.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperiment je zamišljen tako da se primeni, s jedne strane, konstantna sila držanja definisana na dva načina i s druge, promenljiva sila držanja tokom procesa, definisana takođe, na dva načina (monotono opadajućeg i monotono rastućeg karaktera). Paralelno, uključuje se i dvofazni nemonotoni proces deformisanja gde je u prvoj fazi dvoosno zatezanje ("razvlačenje") a u drugoj čisto duboko izvlačenje (oznaka Z2).



Sl. 1: Granični dijagram nabora i razaranja pri monotonom deformisanju

Geometrija komada je cilindrična prečnika 50 mm, sa stepenom izvlačenja 2 (prečnik razvijenog stanja $D_0=100$ mm). Materijal je niskougljenični čelični lim Č0148P5 debljine 0,8 mm (karakteristike su detaljno date u [6]). Pored sile držanja kao tribološkog faktora

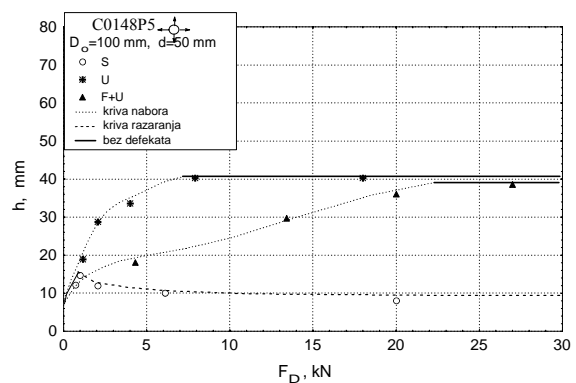
variraju se kontaktne uslovi na držaču (potpuno suve površine, podmazivanje uljem i podmazivanje uljem i PET folijom).

Odabrani stepen izvlačenja je nešto niži od graničnog, čak i u najrigoroznijem slučaju suvih površina. Razlog leži u deformisanju tokom prve faze sa ostvarenom deformacijom od 0,185. Ako bi stepen izvlačenja bio veći, praktično bi bilo nemoguće ostvariti značajniju dubinu izvlačenja.

Sl. 1 pokazuje uspešnost oblikovanja za sva tri kontaktna stanja. Sve tri granične krive imaju zonu pune dubine komada. Ona je najuža za najteže uslove oblikovanja (suvo trenje).

Prvi način definisanja konstantne sile držanja (KSD) je preko literaturnih preporuka i to je, još uvek, najčešći slučaj izbora sile držanja. Korišćeno je nekoliko preporuka i izvršeno osrednjavanje [6]. Dobijena je vrednost $KSD F_D=8568$ N pri specifičnom pritisku držača $q=1,66$ MPa.

Znatno tačniji način određivanja KSD izvodi se sa sl. 1. Na izvestan način, vrši se optimizacija prema kriterijumu maksimalne dubine izvlačenja i za svako kontaktno stanje definiše odgovarajuća KSD. U konkretnom slučaju za uslove suvog trenja $F_D=4,5$ kN; za



Sl. 2: Granični dijagram nabora i razaranja za nemonotono deformisanje

podmazivanje uljem $F_D=8,5$ kN i za primenu ulja i folije $F_D=15$ kN.

Dvofazni, nemonotoni proces oblikovanja nameće potrebu određivanja novog graničnog dijagrama nabora i razaranja (sl. 2) i usvajanja novih optimiziranih vrednosti KSD.

Usvojene su sledeće vrednosti: suvo $F_D=1$ kN; ulje $F_D=8$ kN; ulje i folija $F_D=23$ kN.

Na narednim prikazima literaturno određena KSD biće označena sa R, a optimizirana preko graničnog dijagrama nabora i razaranja sa E.

Promenljiva sila držanja (PSD) opadajućeg karaktera-OPAD [6, 7] definiše se po principu konstantnog specifičnog pritiska na držaču q i ima smisla definisati je samo za nemonotoni proces oblikovanja jer u slučaju jednofaznog i KSD (E varijanta) dovodi do uspešnog oblikovanja (puna dubina izvlačenja) za sva tri kontaktna stanja. Pošto se površina oboda smanjuje tokom procesa, da bi se održala konstantna vrednost q , sila držanja mora da opada srazmerno tom smanjivanju. Postavlja se pitanje koju vrednost za q usvojiti (na osnovu KSD u R ili E varijanti)? Pokazuje se (sl. 4) da KSD u E verziji sama po sebi dovodi do značajnog poboljšanja rezultata procesa, tako da je usvojeno q na osnovu KSD u R verziji i to samo za uslove suvog trenja. Samo na taj način moguće je proceniti efekat primene PSD. Dobijena je [6, 7] sledeća zavisnost:

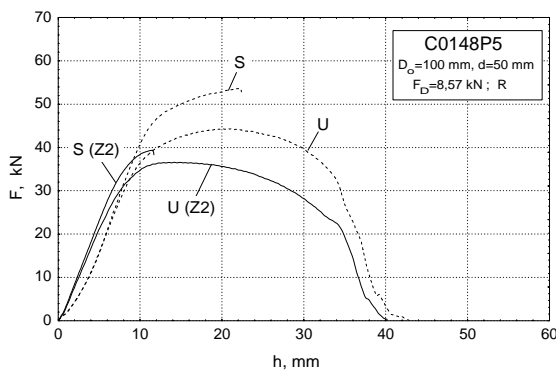
$F_D = 8568 - 95,6t + 0,175t^2$, N. Parametar t je vreme u s.

Zavisnost rastuće PSD (RAST) definiše se kao empirijska funkcija koja prati granične krive nabora na seriji komada sa različitim stepenom izvlačenja [6, 7]. I u ovom slučaju ima smisla definisati zavisnost samo za uslove suvog trenja. Dobijena je sledeća funkcija:

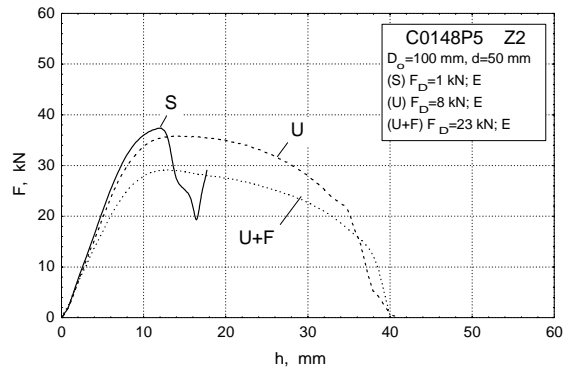
$$F_D = 1007 \sin(0,0123t), \text{ N.}$$

2.1 Rezultati eksperimenta

Sa sl. 3 vidljivo je da relativno veliki stepen deformisanja u prvoj fazi ne utiče naročito otežavajuće na konačan rezultat izvlačenja, ako je trenje manje. To je potpuno očigledno za slučaj podmazivanja uljem i folijom (što i nije razmatrano) ali sličan efekat se pokazuje i pri mešovitom trenju (ulje)-dobija se puna dubina komada. S druge strane, stanjenje lima u prvoj fazi, pri suvom trenju dovodi do drastičnog



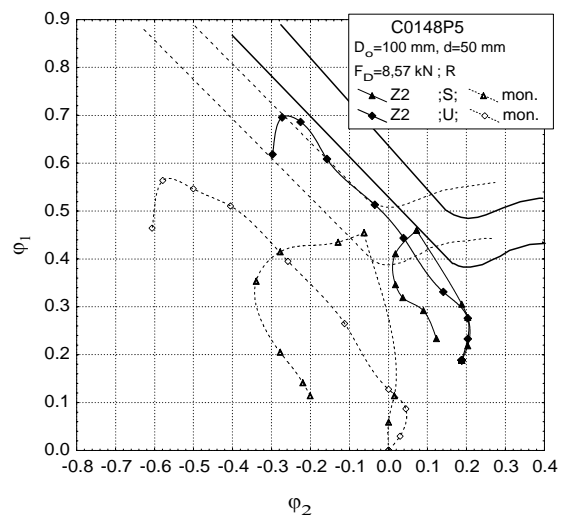
Sl. 3: Sile izvlačenja (monotoni i nemon. - Z2 proces)



Sl. 4: Sile izvlačenja pri KSD (E) i nemonot. procesu

smanjenja dubine izvlačenja.

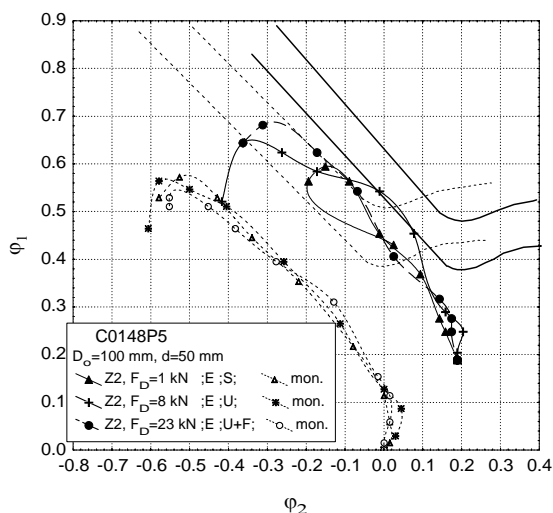
Primenom KSD (E varijanta) na prethodno razvučen lim (Z2) u uslovima smanjenog trenja bez problema se dobija uspešan komad (sl. 4). Pri suvom trenju nema razaranja, ali se na dubini oko 14 mm javljaju veći nabori, uvlače se u otvor matrice i na dubini oko 16 mm sila počinje brzo da raste. Proces je prekinut na dubini od 18



Sl. 5: Distribucije glavnih površinskih deformacija

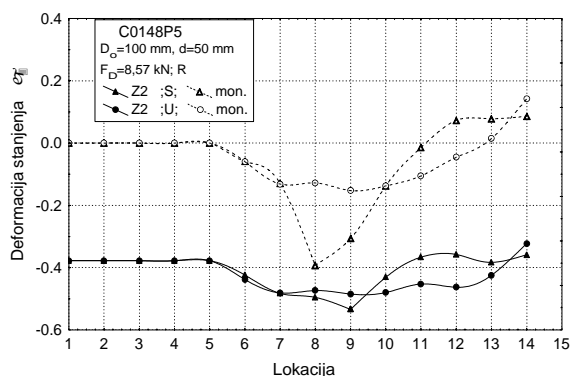
mm jer bi vrlo brzo došlo do razaranja.

Distribucije glavnih deformacija u ravni lima i njihov odnos prema krivama granične deformabilnosti (sl. 5) za slučaj primene KSD (R verzija), pokazuju veću "zalihu plastičnosti" pri monotonom postupku i podmazivanju uljem u odnosu na nemonotoni i istim kontaktnim uslovima. U oba slučaja komad je uspešan. I pri suvom trenju petlja distribucije za monotoni postupak je povoljnija (šira) što sugerise da nemonotonost procesa ima jači uticaj od kontaktnih uslova. Slična zapažanja važe i u slučaju primene KSD- varijanta E (sl. 6).



Sl. 6: Distribucije glavnih deformacija u ravni lima

Vrlo ilustrativan prikaz uticaja deformisanja u prvoj fazi i uslova trenja daju distribucije stanjenja. Na sl. 7 uporedno su date distribucije stanjenja pri KSD (R) za jednofazni (monotoni) i dvofazni (nemonotoni) postupak. Važno je napomenuti da su krive formirane prema ukupnim vrednostima deformacija.

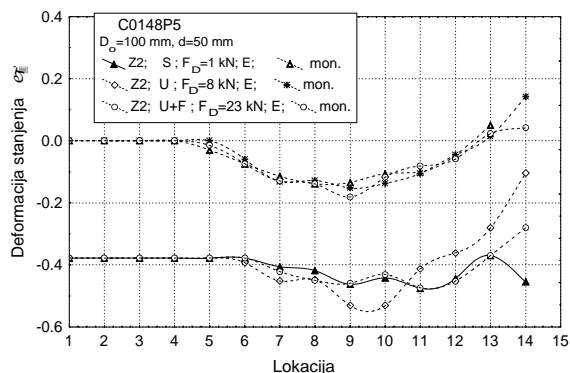


Sl. 7: Distribucija deformacije stanjenja

Intenzitet stanjenja je znatno veći za nemonotoni postupak ali je lokalizacija deformisanja manje izražena u odnosu na jednofazni proces (pri suvom trenju). Međutim, i pored velikog lokalnog gradijenta deformacije dubina izvlačenja za monotoni postupak pri suvom trenju je znatno veća.

Sl. 8 komparativno prikazuje distribucije stanjenja pri KSD u varijanti E. Očigledno je veće stanjenje za dvofazni nemonotoni postupak. Za monotoni postupak vide se tri krive standardne forme za uspešno oblikovane komade. Pri postupku Z2 zanimljiv je položaj

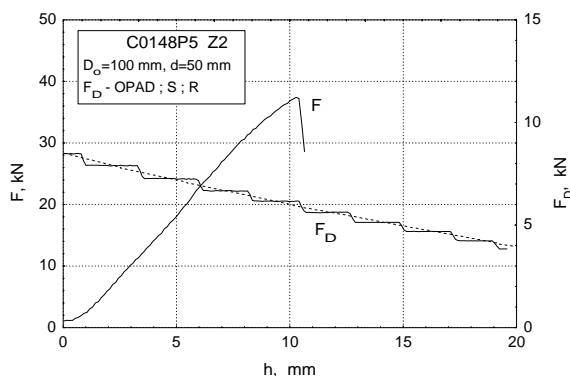
krive koja se odnosi na slučaj pojave nabora (suvo trenje)-leži u zoni nešto manjih deformacija.



Sl. 8: Distribucije deformacije stanjenja

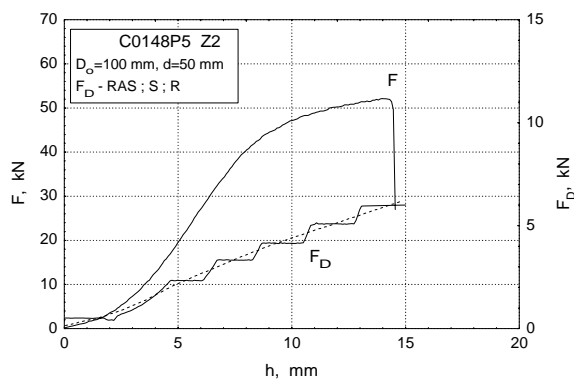
Kako je već naglašeno, najčešći slučaj u tehnološkoj praksi je da se sila držanja bira prema literaturnim (empirijskim) preporukama koje u većini slučajeva ne uzimaju u obzir tribološke uslove što je elementarni nedostatak. Ovde izložen postupak optimizacije KSD preko graničnog dijagrama nabora i razaranja daje dobre rezultate i u konkretnom slučaju postiže se značajno unapređenje rezultata. Da bi se testirao efekat PSD kao osnova je uzeta KSD u R varijanti, koja daje i najlošije rezultate, i to primenjeno na rigorozne uslove nemonotonog procesa deformisanja.

Na sl. 9 prikazana je zavisnost PSD (opadajućeg karaktera) zajedno sa silom izvlačenja. Stepnasta puna linija označava realno ostvarenu silu držanja sistemom za upravljanje, a isprekidana zadatu funkciju. Postignuta je nešto manja dubina u odnosu na korišćenje KSD. Razlog treba tražiti u relativno blagom padu PSD, odnosno većem intenzitetu.



Sl. 9: Sila izvlačenja i opadajuća sila držanja

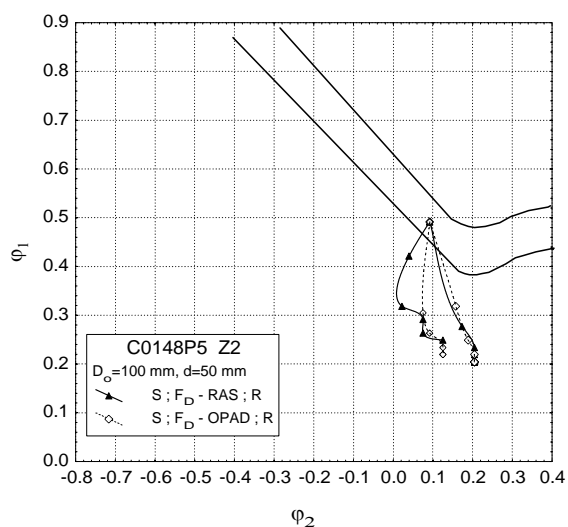
Na sl. 10 takođe je prikazano delovanje PSD ali rastućeg tipa. Data je i zavisnost sile izvlačenja. Zapaža se da je dostignuta znatno veća dubina izvlačenja. Objašnjenje leži, verovatno, u činjenici da postoji početno manje opterećenje u procesu oblikovanja i da je intenzitet PSD manji nego u slučaju PSD opadajućeg karaktera.



Sl. 10: Sila izvlačenja i rastuća sila držanja

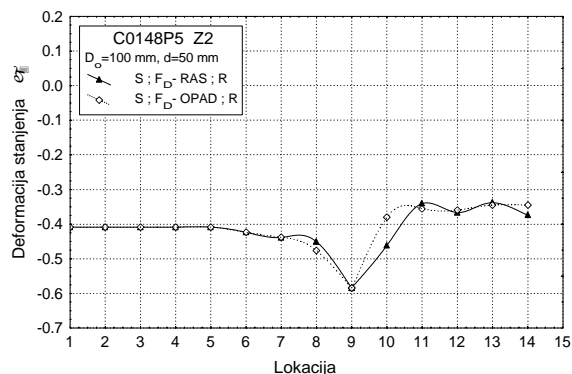
Sl. 11 daje distribucije deformacija u ravni lima za nemonotoni postupak pri suvom trenju i korišćenju PSD u obe varijante (opadajuća i rastuća). Prikazane su i granične krive dijagrama granične deformabilnosti odedene za primenjeni nemonotoni proces deformisanja.

Petlja distribucije koja odgovara delovanju rastuće PSD pokriva širi pojas što je posledica odvijanja procesa oblikovanja sa manje izraženim lokalnim gradijentima.



Sl. 11: Distribucija deformacija u ravni lima pri opadajućoj i rastućoj PSD

Distribucije stanjenja (sl. 12) odgovaraju distribucijama na sl. 11. I ovde je pik krive koja odgovara rastućoj PSD nešto blaži. Ipak, najvažniji rezultat je povećanje dubine izvlačenja.



Sl. 12: Distribucije stanjenja pri opadajućoj i rastućoj PSD

Tabela 1. Dubine izvlačenja u mm

Nemonotoni postupak (Z2), suvo trenje				
KSD, N	PSD OPAD	%	PSD RAST	%
11,7	10,7	-8,5%	14,6	33,3

Ono što su prethodni dijagrami detaljno opisivali, kvantifikovano je dato u tabeli 1. Rastuća PSD daje povećanje dubine izvlačenja za 33% u odnosu na KSD. Treba naglasiti da su uslovi oblikovanja veoma teški: suvo trenje i dvofazni nemonotoni postupak sa deformacijom u prvoj fazi od 18, 5 %.

3. ZAKLJUČAK

Upravljanje silom držanja pruža značajne mogućnosti unapređenja rezultata procesa oblikovanja lima dubokim izvlačenjem. Ovde je to pokazano na konkretnom primeru deformisanja u složenim uslovima nemonotonog dvofaznog procesa uz variranje i uslova trenja. Uticaj ostvarene deformacije u prvoj fazi je nešto izraženiji od uticaja kontaktnih uslova. Primena eksperimentalno optimizirane vrednosti konstantne sile držanja i promenljive sile držanja rastućeg tipa rezultira povoljnijim distribucijama deformacija i, konačno, većim dubinama izvlačenja.

4. LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] E. Doege and L. -E. Elend: Design and application of pliable blank holder systems for the optimization of process conditions in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111 (1-3), 2001, pp. 182-187.
- [4] Makinouchi A., Teodosiu C. Numerical methods for prediction and evaluation of geometrical defects in sheet metal forming, *Computational Fluid and Solid Mechanics*, 2001, pp. 21–25.
- [5] S. Aleksandrović, M. Stefanović, T. Vujinović: Rastuća sila držanja kao tribološki faktor pri čistom dubokom izvlačenju prevučenih limova u uslovima nemonotonog deformisanja, VII Jugoslovenska konferencija o tribologiji, YUTRIB 2001, oktobar 2001, Beograd, Zb. str. 3–9 do 3–12.
- [6] S. Aleksandrović: Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2000.
- [7] S. Aleksandrovich, M. Stefanovich and T. Vujinovich: Variable tribological conditions on the blank holder as significant factor in deep drawing process , ITC 03 (8th International Tribology Conference), 8.-10. october, 2003., Belgrade, Serbia, Proc. pp. 368-372.