



## ZNAČAJ SILE DRŽANJA U REALIZACIJI UPRAVLJANJA PROCESOM DUBOKOG IZVLAČENJA

S. Aleksandrović <sup>1)</sup>, M. Stefanović <sup>2)</sup>

**Rezime.** Upravljanje procesom dubokog izvlačenja podrazumeva realizaciju upravljačkog sistema sposobnog da autonomno generiše odgovarajuća dejstva (preko jedne ili više upravljačkih promenljivih) za vreme trajanja procesa oblikovanja i time koriguje njegov tok.

U radu se daje analiza uticaja najvažnijeg upravljajućeg parametra - sile držanja i mogućnosti njegove primene u složenim sistemima upravljanja. Dati su i konkretni rezultati primene promenljive sile držanja na primeru izvlačenja cilindričnog komada od galvanski pocinkovanog niskougljeničnog čeličnog lima.

**Ključne reči:** tanki limovi, duboko izvlačenje, promenljiva sila držanja, upravljanje.

### SIGNIFICANCE OF BLANK HOLDING FORCE IN REALIZATION OF DEEP DRAWING PROCESS CONTROL

**Abstract.** Deep drawing process control means realization of control system able to generate proper action independently (through one or more control parameters) during forming process and in that way make necessary correction of process course.

Influence analysis of most important control parameter – blank holding force and application possibilities in complex control systems are given in this article. Also, presented are experimental results of variable blank holding force application on the example of cylindrical part deep drawing. Material was low carbon steel sheet with galvanized zinc coating.

**Key words:** thin sheets, deep drawing, variable holding force, process control.

#### 1. UVOD

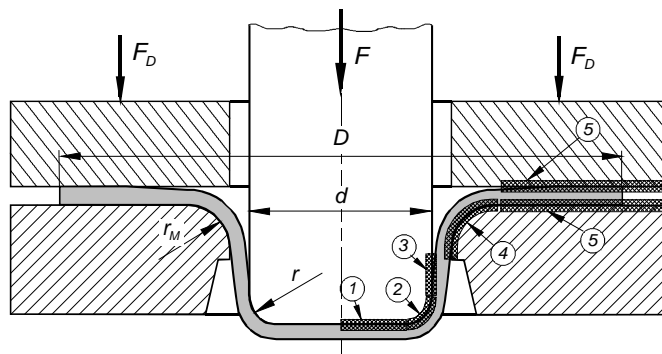
Duboko izvlačenje tankih limova zauzima, po mnogim kriterijumima, najvažnije mesto u okviru metal forming tehnologija i jedno od dominantnih mesta u industriji prerade metala uopšte. Zato sa nesmanjenim intenzitetom traje izučavanje svih aspekata procesa i daju se nova rešenja sa ciljem dobijanja boljih rezultata i težnjom ka

<sup>1)</sup> Dr Srbslav Aleksandrović, vanr. prof., Mašinski fakultet, Kragujevac, [srba@kg.ac.yu](mailto:srba@kg.ac.yu)

<sup>2)</sup> Dr Milentije Stefanović, red. prof., Mašinski fakultet, Kragujevac, [stefan@kg.ac.yu](mailto:stefan@kg.ac.yu)

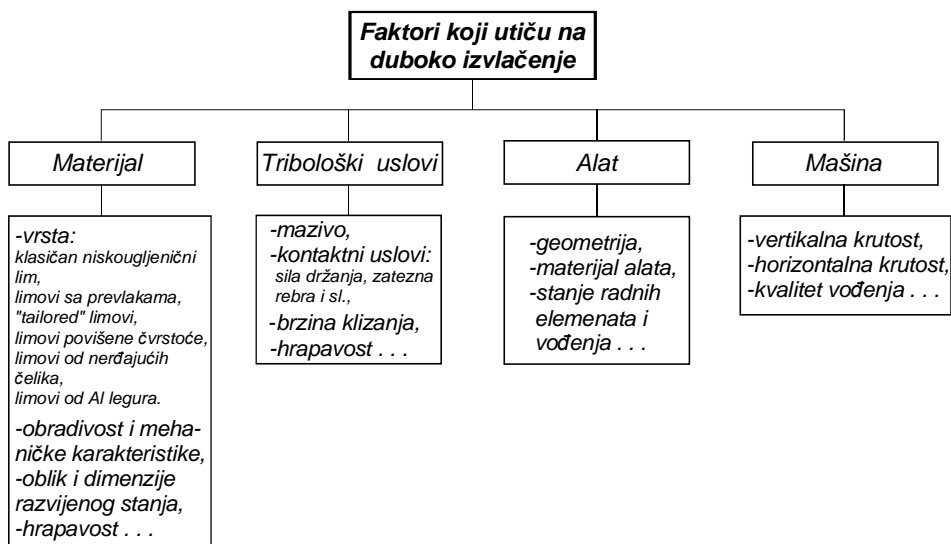
ostvarenju upravljanja tokom procesa plastičnog oblikovanja. Istraživanja, čiji je deo rezultata izložen u ovom radu usmerena su ka istom cilju.

Na sl. 1 data je osnovna šema procesa sa identifikacijom karakterističnih zona trenja. U zonama 1 i 2 praktično nema klizanja i još krajem šezdesetih godina [1] uočeno je da pojačano trenje u ovim zonama povoljno utiče na trajanje procesa i dubinu izvlačenja.



Slika 1. Osnovna šema dubokog izvlačenja

Između zona 2 i 3 je kritično mesto za nastajanje pukotine. Ugeometrijskom smislu to je kraj radijusa dna i početak cilindričnog dela komada. U zonama 4 i 5 trenje je najintenzivnije, a njegovo smanjivanje daje povoljne efekte. Sa aspekta uticaja na proces veliki značaj ima zona 5 (kontakt držača, lima i matrice).

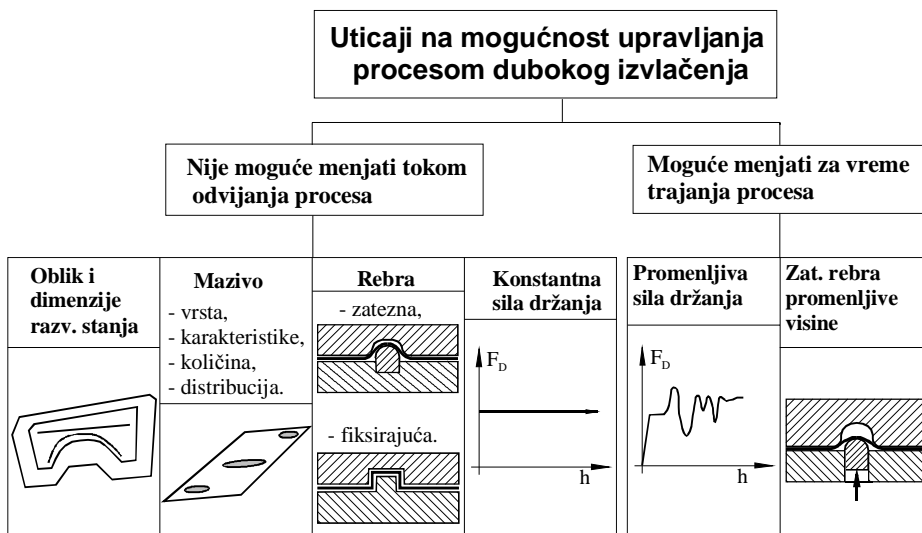


Slika 2. Uticajni faktori na proces dubokog izvlačenja

Većinu triboloških faktora (slika 2) moguće je relativno lako menjati iako imaju suštinski uticaj na proces. Izmena maziva, zona podmazivanja ili sile držanja je jednostavnija od rekonstrukcije alata, zamene mašine i materijala ili sl.

## 2. MOGUĆNOSTI ZA UPRAVLJANJE PROCESOM

Ako upravljanje shvatimo kao dejstvo upravljajućih (ili upravljačkih) parametara koji u sistemu povratne sprege neprekidno (za vreme trajanja procesa) koriguju upravljane promenljive, važno je u startu identifikovati raspoložive uticaje i odgovarajuće parametre procesa (slika 3).



Slika 3. Prikaz uticaja na proces oblikovanja

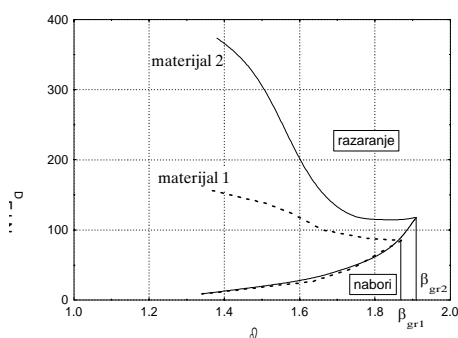
Za vreme trajanja procesa moguće je delovati samo preko dva uticaja: držanja (parametar-sila držanja) i pokretnih zateznih rebara (parametar-hod ili visina). Ovde će se isključivo govoriti o korišćenju sile držanja kao upravljajućeg (ili upravljanog) parametra.

Jedan od najjednostavnijih načina za orijentacionu procenu uticaja sile držanja jeste izračunavanje komponenti napona izvlačenja po klasičnoj formuli za maksimalnu

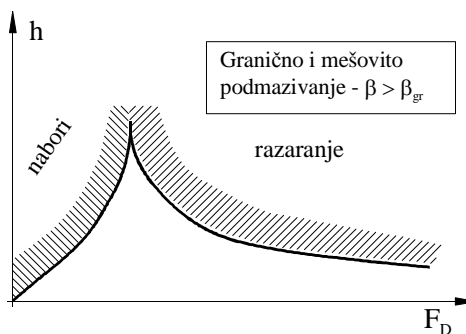
silu izvlačenja cilindričnog komada [2]. U tabeli 1 dati su intenziteti ukupnog napona kao i sve četiri komponente. Dato je i procentualno učešće komponenti u ukupnom naponu [2]. U navedenom primeru napon usled trenja na držaču uzima najmanje učešće sa 4,4%. To odgovara realnosti ali učešće raste sa porastom sile držanja. U [2] je pokazan porast sile izvlačenja zavisno od povećanja intenziteta sile držanja, za manje i veće geometrije komada. Maksimalna sila izvlačenja može da se poveća i do 40 % promenom sile držanja. U uslovima jačeg trenja i manje brzine deformisanja uticaj sile držanja na odvijanje procesa postaje veoma značajan.

Tabela 1

Naponi pri izvlačenju (MPa)		
$\sigma_{uiz}$	504	%
$\sigma_r$	382,8	75,9%
$\sigma_{trd}$	21,83	4,4%
$\sigma_{trm}$	68,8	13,7%
$\sigma_{savis}$	30,56	6,0%



Slika 4. Sila držanja i stepen izvlačenja



Slika 5. Dubina izvlačenja i sila držanja

Jedan od najilustrativnijih načina za razumevanje uticaja sile držanja je prikaz zavisnosti sile držanja od stepena izvlačenja (slika 4) i zavisnosti dubine izvlačenja od sile držanja (slika 5). Važno je uočiti optimalne intenzitete  $F_D$  s obzirom na postizanje maksimalne dubine i maksimalnog stepena izvlačenja.

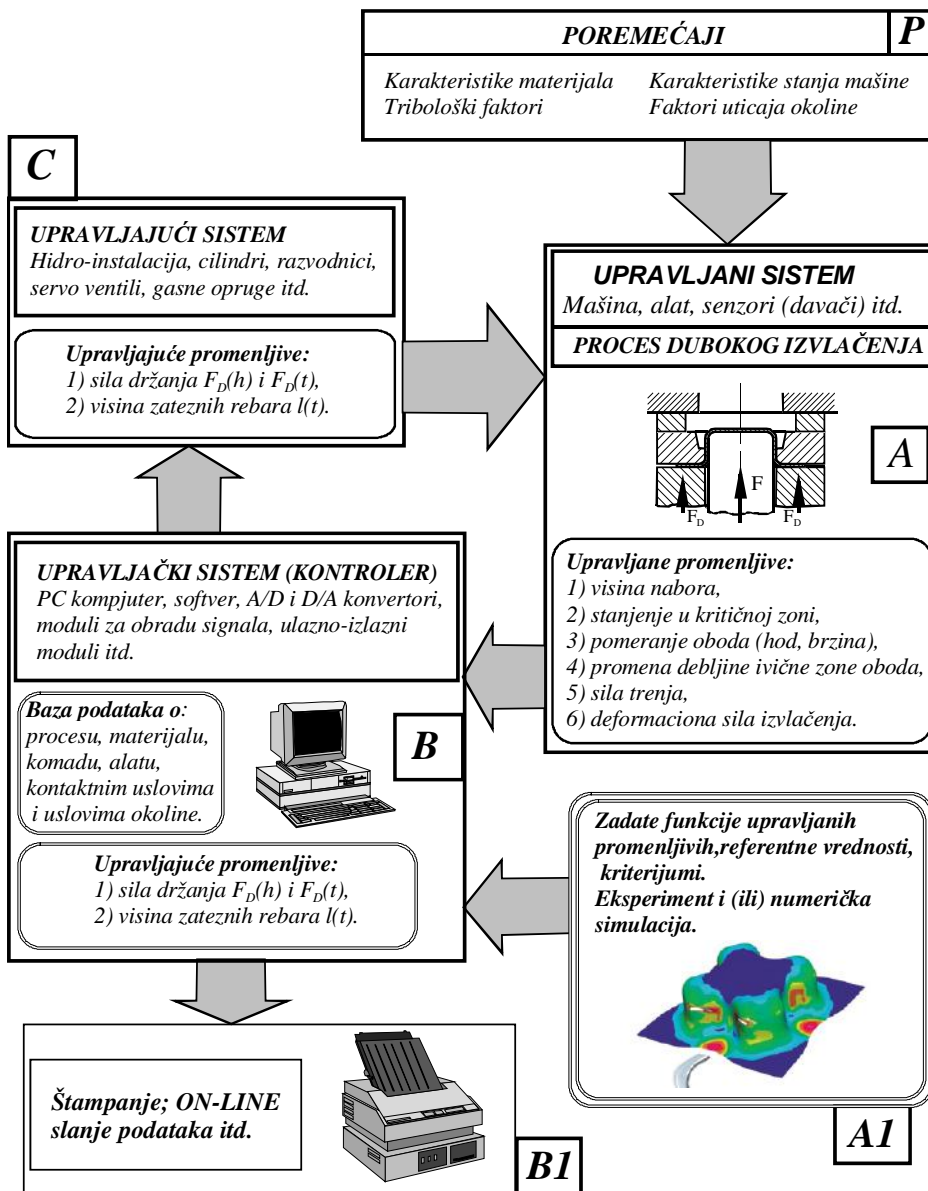
Upravljanje procesom dubokog izvlačenja, u širem smislu, može se definisati kao skup dejstava u okviru jedinstvenog sistema, sa ciljem autonomnog odvijanja procesa plastičnog deformisanja, automatskog reagovanja na poremećaje i promenljive ulazne faktore i dobijanje oblikovanog predmeta projektovanih, odnosno što boljih karakteristika.

Okvir u kome se proces uspešno odvija čine dva neprihvatljiva defekta: pojava nabora na obodu i pojava razaranja (pukotine) u kritičnoj zoni komada. Već je ukazano da se tokom procesa mogu menjati (i iskoristiti kao upravljačka dejstva) samo dva značajna parametra procesa: sila držanja i visina zateznih rebara. Ostvarivanje promenljive funkcionalne zavisnosti tokom procesa bilo koje od dve pomenute veličine postalo je moguće tek tokom zadnjih par decenija zahvaljujući razvoju kompjuterskih sistema za akviziciju i upravljanje.

Između pojave defekata (nabora i razaranja) i sile držanja, načelno postoji jasna veza. Optimalan intenzitet sile držanja sprečava pojavu nabora, ali često, i malo povećan može da rezultira lokalizovanim stanjenjem ili razaranjem. Na prvi pogled se čini da je, zbog relativno lake identifikacije ključnih parametara idejno-teorijsko rešenje upravljanja, jednostavno. U realnim uslovima pokazalo se da nije tako. Razlozi su sledeći: gotovo nemoguće lociranje kritične zone na komadu i merenje stanjenja lima što je jedini direktan parametar vezan za kriterijum kritične deformacije i opasnosti od razaranja, teškoće oko korišćenja visine nabora kao parametra iako je merenje relativno lako, postojanje istovremenog uticaja više faktora (materijal komada i alata, geometrija komada i alata, stanje mašine, tribološki uslovi, uticaj okoline itd.), složenost se povećava u uslovima većih brzina itd.

Slika 6 daje opštu shemu sistema potpunog upravljanja procesom dubokog izvlačenja. Uspostavlja se povratna sprega između stvarne (aktuelne, trenutne) vrednosti odgovarajuće upravljane promenljive (blok A) i njene zadate funkcije (blok A1). Korekcije upravljanih promenljivih vrše se odgovarajućim dejstvima upravljajućih promenljivih (blokovi B i C). Treba primetiti da se pri tehničkom izvođenju blokovi A i C često objedinjuju. Realnu i, za sada, teško rešivu teškoću predstavlja nemogućnost merenja stanjenja lima u kritičnom pojasu i lokalizacije zone najintenzivnije

deformacije koja prethodi lomu. Rešenja se traže preko korišćenja posrednih parametara, kao što je hod ili brzina uvlačenja ivice oboda [3].



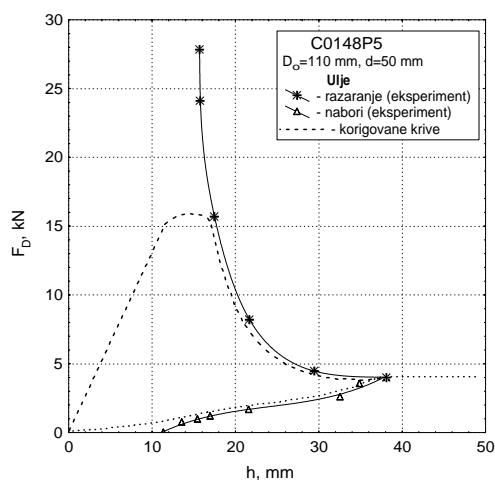
Slika 6. Opšta shema upravljanja procesom dubokog izvlačenja

Definisanje ciljnih (zadatih) funkcija upravljanih promenljivih takođe predstavlja značajnu poteškoću. Potrebno je sprovesti eksperimentalna istraživanja ili numeričke simulacije na savremenim softverima [4]. Ako se obod deli na više nezavisnih zona složenost sistema se u velikoj meri povećava.

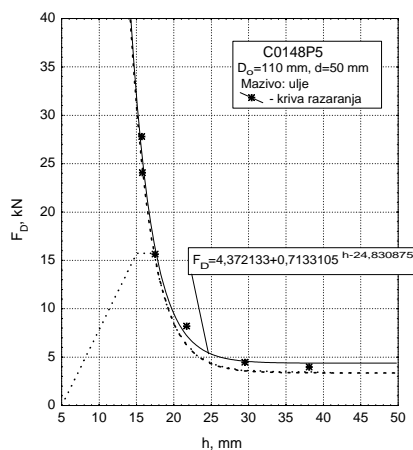
Iz prethodno načelno nabrojanih karakteristika, lako se zapaža velika složenost sistema za potpuno upravljanje koju prate znatni troškovi i visoka ukupna cena. U [5] je dat predlog pojednostavljenog pristupa gde se definišu funkcije sile držanja tokom predhodnih istraživanja (eksperimenti i/ili kompjuterske simulacije). Zadatak upravljačkog sistema sada se sastoji samo u realizaciji funkcije promenljive sile držanja (PSD) tokom procesa.

Jedan od mogućih pristupa za definisanje PSD dat je na slikama 7, 8 i 9. Osnovu čine eksperimentalne granične krive nabora i razaranja (slika 5). Ako se zamene mesta koordinatnim osama, analitički obrade i koriguju eksperimentalne krive, dobijaju se funkcije PSD u zavisnosti od hoda, odnosno vremena, koje se direktno mogu koristiti u upravljačkom sistemu.

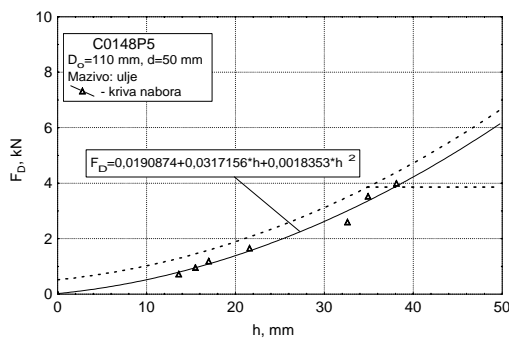
Moguće je sprovesti i drugačije pristupe sa ciljem definisanja zavisnosti PSD [5]. Dobijaju se funkcionalne zavisnosti opadajućeg, rastućeg, kombinovanog i pulzirajućeg karaktera.



Slika 7. Granične krive sile držanja



Slika 8. Korigovane krive sile držanja



Slika 9. Korigovane krive sile držanja

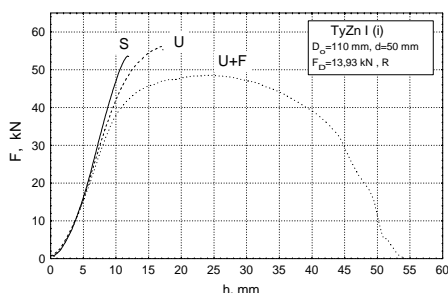
### 3. REZULTATI EKSPERIMENTA

Ovde će biti prikazani rezultati primene pojednostavljenog sistema upravljanja, odnosno primene promenljive sile držanja. Aparatura je formirana na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu i njena osnovna karakteristika je mogućnost realizacije PSD tokom trajanja procesa u proizvoljnom obliku (kontinualne analitički date funkcije, prekidne zavisnosti ili diskretne vrednosti). Ostale osobine i detalji dati su u [5].

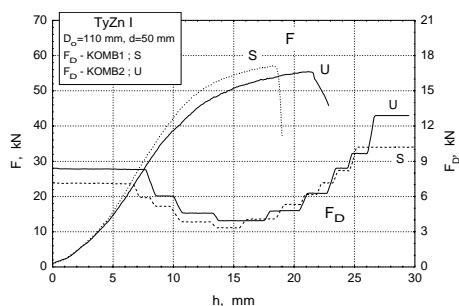
Primer koji će biti prikazan odnosi se na cilindrični komad nominalnog prečnika 50 mm sa stepenom izvlačenja 2,2. Debljina lima je 0,8 mm. Materijal je jednostrano galvanski pocinkovan niskouglenični čelični lim namenjen za duboko izvlačenje.

Na slici 10 date su zavisnosti deformacionih sila od hoda za tri različita kontaktna stanja na obodu (S–suve površine odmašćene acetonom; U–primena ulja, mešovito trenje i U+F–primena ulja i PET folije, površine potpuno razdvojene). U slučaju najvećeg trenja (S) postignuta dubina izvlačenja iznosi 13,1 mm. Pri mešovitom trenju (U) dubina je 17,2 mm dok se pri minimalnom trenju dobija puna dubina komada. Primenjena je sila držanja konstantnog intenziteta od 13,93 kN dobijena na osnovu empirijskih preporuka i istraživanja autora [5].

Primena PSD opravdana je samo u uslovima pojačanog trenja, tako da se na slici 11 vide zavisnosti deformacionih sila izvlačenja pri suvom i mešovitom trenju. Prikazane su i zavisnosti PSD realizovane radom upravljačkog sistema. Reč je o kombinovanim (opadajuće–rastućim) funkcijama dobijenih posebnim postupkom [5]. Primenom ovakve PSD za suvo trenje, dubina izvlačenja kao najznačajniji makro parametar uspešnosti procesa, poveća se za 39,7% (18,3 mm). Za mešovito trenje povećanje dubine iznosi 26,2 % (21,7 mm).

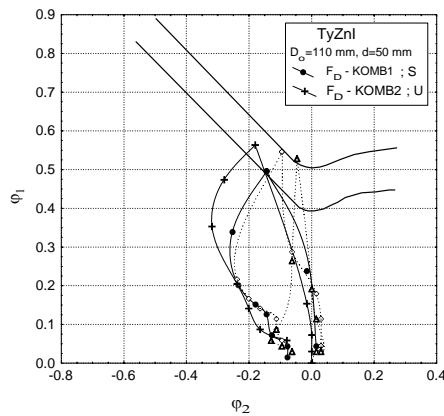


Slika 10. Sile izvlačenja



Slika 11. Sile izvlačenja

Slika 12 daje prikaz distribucija glavnih površinskih deformacija datih paralelno sa krivama dijagrama granične deformabilnosti za korišćeni materijal. Isprekidanim linijama date su distribucije za uslove primene konstantne sile držanja, a punim za primenu PSD. Jasno se zapaža otklon obe petlje distribucija dobijenih pri PSD, u levu stranu ka bezbednijoj zoni deformisanja ispod krive razaranja dijagrama granične deformabilnosti.



Slika 12. Distribucije deformacija

#### 4. ZAKLJUČAK

Sistemi potpunog upravljanja procesom dubokog izvlačenja još uvek su veoma retki i u industrijama najrazvijenijih zemalja, ali su zato predmet stalnih istraživanja. Pojednostavljenjem pristupa koji podrazumeva upravljanje silom držanja tokom procesa, moguće je dobiti zadovoljavajuće rezultate uz znatno manja ulaganja. Potrebno je prethodno izvršiti istraživanje obradivosti i definisati funkcije promenljive sile držanja. Prikazani primer pokazuje da rezultati mogu da budu značajni.

Ovakvi efekti su posebno važni u uslovima primene najnovijih materijala (Al legure, limovi povišene čvrstoće itd.) koji su znatno lošije obradivosti u odnosu na klasične niskouglenične limove.

#### 5. LITERATURA

1. M. Stefanović: Tribologija dubokog izvlačenja, monografija, Mašinski fakultet i Jug. društvo za tribologiju, Kragujevac, 1984.
2. S. Aleksandrovič, M. Stefanovič: Significance and limitations of variable blank holding force application in deep drawing process, ICMEN 05, Kallithea of Chalkidiki, 2005., Greece, proc. pp. 245–253.
3. E. Doege et al.: Contactless on-line measurement of material flow for closed loop control of deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, 130–131, 2002., pp. 95–99.
4. H. Koyama, R. Wagoner, K. Manabe: Blank holding force control in panel stamping process using a database and FEM-assisted intelligent press control system, Journal of Materials Processing Technology, 152, 2004., pp. 190–196.
5. S. Aleksandrovič: Sila držanja i upravljanje procesom dubokog izvlačenja, monografija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2006.