

5. MEĐUNARODNO SAVJETOVANJE  
O DOSTIGNUĆIMA ELEKTRO  
I MAŠINSKE INDUSTRIJE



5<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON ACCOMPLISHMENTS  
OF ELECTRICAL AND  
MECHANICAL INDUSTRIES

## OBRADIVOST TANKIH LIMOVA PRI DUBOKOM IZVLAČENJU U USLOVIMA NOVIH TEHNOLOGIJA I PRIMENE SAVREMENIH MATERIJALA

M. Stefanović<sup>1</sup>, S. Aleksandrović<sup>1</sup>, Ž. Babić<sup>2</sup>, T. Vujinović<sup>3</sup>

### Rezime

U radu su razmatrani neki pristupi izučavanja deformabilnosti tankih limova pri dubokom izvlačenju. Takođe, daje se pregled karakteristika novih materijala namenjenih izradi lakih karoserija putničkih automobila. U tom smislu, poslednjih godina sve više se koriste materijali za izradu karoserija umanjene težine, kao što su: limovi od čelika povišene čvrstoće, Al-limovi, titan i njegove legure, sendvič i kompozitni materijali i sl. U radu se daje pregled ovih istraživanja, prvenstveno u oblasti granične deformabilnosti limova povećane čvrstoće, limova od Al-legura i laminatnih limova. U radu se navode i neki elementi razvoja u oblasti upravljanja procesom dubokog izvlačenja, pre svega sistemi upravljanja silom držanja tokom procesa.

**Ključne reči:** obradivost, duboko izvlačenje, lake karoserije, upravljanje, numeričke simulacije

## FORMABILITY OF THIN SHEET METALS AT DEEP DRAWING IN NEW TECHNOLOGIES CONDITIONS AND APPLICATIONS OF MODERN MATERIALS

### Abstract

In the paper are considered different approaches to studying the deformability of thin sheets in deep drawing. Also, this paper gives survey of light materials characteristics for manufacture of light carbody made of such materials: high strength steel sheet metals, Al-sheet metals, titan and its alloys, sandwich and composite materials, were used more and more. The paper gives survey of these materials, the application area, main advantages and disadvantages, description of formability parameters and results of researches, primarily in the area of limits formability of high strength steel sheet metals, Al-alloys sheet metals and steel-plastic laminate sheets. Also, some directions of the development in the area of deep drawing process control are given, first of all control of blank holding force in forming process.

**Keywords:** formability, deep drawing, light autobody, control, numerical simulation

<sup>1</sup> Dr Milentije Stefanović, red. prof., Mašinski fakultet Kragujevac (stefan@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>1</sup> Dr Srbislav Aleksandrović, docent, Mašinski fakultet Kragujevac (srba@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>2</sup> Mr Živko Babić, asist., Mašinski fakultet Banja Luka (babicz@urc.bl.ac.yu)

<sup>3</sup> Mr Tomo Vujinović, dipl. ing., Rudi Čajavec, Banja Luka

## 1. UVOD

Zahvaljujući opštem napretku nauke i tehnologije poslednjih godina i oblast tehnologije plastičnog oblikovanja metala doživljava intenzivan razvoj. Podrazumevajući osnovni razvoj u oblasti novih tehnologija na bazi fundamentalnih fizičko–hemijskih istraživanja, glavni pravci razvoja u okviru obrade metala deformisanjem (OMD) mogu se uslovno podeliti na sledeće grupe:

- razvoj postupaka modeliranja procesa oblikovanja–tečenja metala, definisanje naponsko–deformacionih polja i sl., u cilju optimizacije parametara obrade;
- primena sistema CAD/CAM za projektovanje i izradu alata;
- razvoj i primena veštačke inteligencije i ekspertnih sistema u osvajanju procesa obrade i konstrukciji alata;
- razvoj različitih postupaka, alata i mašina za izradu delova koji se neće naknadno obrađivati (tzv. "net shape" postupci: precizno toplo i hladno kovanje, hidrooblikovanje, precizno livenje itd.);

Pri projektovanju tehnologije procesa obrade metala dubokim izvlačenjem, od suštinskog značaja je i poznavanje granične deformabilnosti, koja se može definisati kao sposobnost za ostvarivanje maksimalnih deformacija u zadatim uslovima obrade (naponsko–deformaciona shema, brzina, temperatura, tribološki uslovi i sl.). Na taj način, granična deformabilnost je jedan od ograničavajućih faktora pri definisanju obradivosti, koja uključuje i složene kriterijume za nastanak pojava nestabilnosti (nabori, lokalizacija–stanjenje, defleksija, razaranja i td. (sl. 1 [1]).



Sl. 1 Osnovni kriterijumi dostizanja granične deformabilnosti

## 2. DEFORMACIONA ANALIZA I GRANIČNA DEFORMABILNOST

Kod izvlačenja delova složene geometrije (na pr. elementi karoserije automobila), postoje teškoće u formulisanju kriterijuma za optimalno iskorišćavanje svojstava plastičnosti materijala koji se oblikuje. Stepenu deformacija kod takvih komada različit je u pojedinim tačkama. U zavisnosti od spoljašnjih uticaja, lokacija zone nestabilnog deformisanja može se pomerati. Korišćenjem eksperimentalnih postupaka na bazi mernih mreža, ili numeričkih metoda i simulacija, moguće je odrediti ostvareni stepen deformacije na jednom mestu, u široj zoni ili po čitavoj površini komada. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za tzv. lokalnu ili inegralnu deformacionu analizu. Uvid u ostvarenu raspodelu deformacija kompletnog dela, odnosno složenog proizvoda, omogućava znatno složenije analize.

Upoređivanjem vrednosti ostvarenih deformacija sa onima iz dijagrama granične deformabilnosti (DGD), može se doneti zaključak o stepenu kritičnosti izvučenog dela. Pri tome, s obzirom na statistički karakter pojave nestabilnosti, kriva granične deformabilnosti odražava određeni nivo verovatnoće razaranja. Za kontrolu procesa dubokog izvlačenja u praksi se koriste statističke metode, koje omogućavaju ocenu stabilnosti i tehnoloških mogućnosti

procesa, kao i efikasnost preduzetih mera. Identifikacijom i izdvajanjem kritičnih parametara obezbeđuje se mogućnost za efikasnu analizu i uspešno upravljanje procesom obrade. Pri tome se široko koriste DGD, kao i sve kvalitetnije numeričke kompjuterske simulacije [2].

Razvojem računarske i video tehnike stvoreni su uslovi za visokoautomatizovani rad u oblasti merenja i obrade podataka dobijenih uz pomoć mernih mreža. U tom smislu, komercijalizovani su sistemi koji očitavaju dimenzije deformisanih elemenata merne mreže na izvučenim delovima i preko odgovarajućeg softvera, daju prikaze deformacionih polja, vrše unošenja u DGD, prate istoriju deformisanja i određuju rezervu plastičnosti (na pr. sistem ASAME firme CamSys) [3]. Usavršavanjem načina nanošenja mernih mreža i korišćenjem opisanih sistema, postiže se brz i efikasan laboratorijski i rad u proizvodnim uslovima, sa nizom prednosti u odnosu na uobičajeni rad sa grafometrijskim metodama.

Granični iznosi deformacija zavise ne samo od naponskog stanja, već i od istorije deformisanja. Grafički se istorija može predstaviti kao trajektorija tačaka koje se unose u DGD za svaki trenutak izvlačenja. Po pravilu, ima smisla koristiti samo onaj DGD, određen na način koi odgovara uslovima realnog procesa oblikovanja. Do izmene istorije najčešće dolazi pri višeoperacionom izvlačenju, kada se menjaju pravci glavnih deformacija, često uz zaokretanja i pravaca glavnih osa [4].

### **3. OBRADIVOST NOVIH MATERIJALA**

S obzirom na izuzetnu primenu tankih limova u automobilskoj industriji, kao i složenost oblikovanja pri proizvodnji delova karoserija automobila, ovi materijali će biti detaljnije razmatrani.

Smanjenje potrošnje goriva i umanjjenje emisije izduvnih gasova za sve svetske proizvođače automobila, predstavlja jedan od najvažnijih razvojnih zadataka. Integrišući najnovija dostignuća u oblasti nauke i tehnike, posebni rezultati u ovoj oblasti ostvareni su u konstrukciji motora i izradi lakih karoserija automobila. Razvoj i korišćenje novih materijala za automobilsku industriju, posebno karoserije automobila, usklađen je sa opštim društvenim zahtevima, štednjom ekonomskih resursa, očuvanjem energije i ekologijom, bezbednošću putnika i sl. [1]. U tom smislu, poslednjih godina sve više se koriste materijali za izradu karoserija umanjene težine, kao što su: limovi od čelika povišene čvrstoće (ČPČ), Al-limovi, titan i njegove legure, sendvič limovi, kompoziti itd.

U savremenoj automobilskoj industriji u izradi karoserija, globalno su fokusirani sledeći ciljevi [5]:

- 1- uvođenje aluminijumskih limova,
- 2- porast korišćenja limova od čelika povišene čvrstoće,
- 3- porast korišćenja limova sa prevlakama cinka,
- 4- smanjenje broja delova po automobilu (otpresaka),
- 5- smanjenje broja alata po otpresku,
- 6- porast korišćenja "Tailor" limova,
- 7- potreba za proizvodnjom bez otpadaka (zero defect quality),
- 8- potreba za proizvodnjom spoljašnjih otpresaka sa površinom visokog kvaliteta, bez naknadne dorade,
- 9- smanjenje cene koštanja.

U ukupnoj masi automobila u proseku 32% odnosi se na karoseriju [2]. Jasno je da smanjenje mase karoserije značajno doprinosi umanjnju ukupne mase automobila. U principu, smanjenje mase karoserije može se ostvariti promenom koncepcije strukture karoserije i zamenom

klasičnih materijala lakšim. Izbor materijala karoserije vrši se na osnovu više kriterijuma, koji su dati u tabeli 1 [6].

**Tabela 1** Materijali i tehnologije za smanjenje mase karoserije

Tehnologija za smanjenje težine	Današnja primena	Idealni oblik primene	Ocena uvođenja			
			cena	oprema	efekat	teškoće
Primena limova od Al-legura	Blatobrani, haube i sl.	Kompletna karoserija	+	+	o	×
Primena limova od ČPČ	Spoljašnji otpresci, povećanje krutosti	Za unutrašnje delove $R_M=590$ MPa, za spoljašnje $R_M=390$ MPa	+	o	+	+
Primena sendvič limova	Karter motora, unutrašnji otpresci	Za spoljašnje i unutrašnje delove	×	+	o	×
Primena iskrojenih (Tailor) limova	Bočne stranice, vrata, blatobrani, pod	Izvlačenje u jednom alatu sa što tanjim limovima	o	×	+	+
Korišćenje limova sa velikim r faktorom	Spoljašnji otpresci	Tanji limovi koji obezbeđuju pouzdanu eksploataciju	o	o	+	o
Lasersko ojačavanje	Razmatra se uvođenje kod novih modela	Potpuna eliminacija delova za ojačanje karoserije	o	×	+	+

Oznake: o jednostavno, jeftino; + srednje; × sa velikim teškoćama

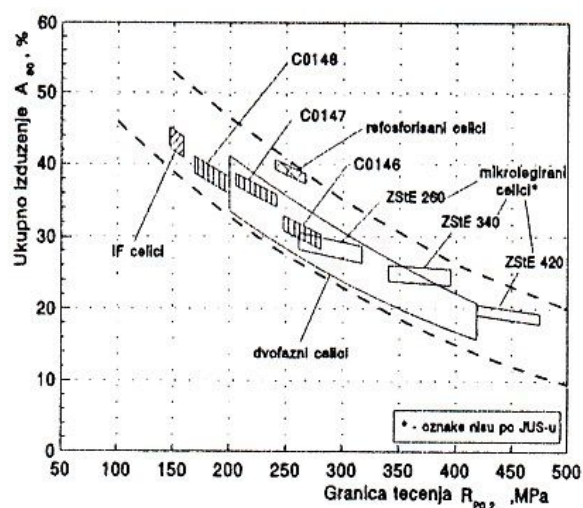
### 3.1 LIMOVI OD ČELIKA POVEĆANE ČVRSTOĆE

Osnovne vrste ovih čelika su: konvencionalni mikrolegirani, refosforisani i dvofazni. U osnovnoj primeni dugi niz godina koriste se u brodogradnji, vagonskoj i građevinskoj industriji. Omogućavaju izgradnju konstrukcija povećane čvrstoće, uz smanjenje osnovne mase. Limovi od ČPČ, namenjeni izradi karoserija automobila, koriste se od sredine sedamdesetih godina prošlog veka, kada su ekološki zahtevi i ušteda energija postali dominantni u politici razvoja automobilske industrije. Ovakvi materijali omogućavaju izradu karoserija automobila povišene krutosti i manje težine, uz zadovoljavanje zahteva sigurnosti (statička i dinamička krutost, apsorpcija energije pri sudaru, oscilatorna udobnost i sl.). Limovi od ČPČ olakšavaju karoseriju i istovremeno apsorbuju više energije pri sudaru, pri čemu je ključ uspešne primene selekcija vrste materijala i mesta primene na karoseriji (mogućnost upravljanja energijom sudara).

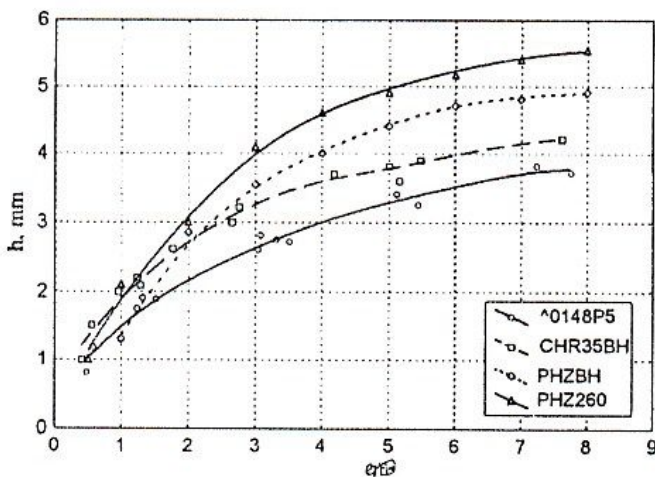
Na sl. 2 pokazani su različiti materijali od čelika, namenjeni izradi elemenata karoserije automobila [6]. Očigledno je da plastičniji materijali imaju nižu granicu tečenja i lakše se oblikuju (standardni materijal je Č0148P5).

S obzirom na izražena svojstva čvrstoće, u odnosu na standardne čelike, pri oblikovanju limova od ČPČ, dominantna su svojstva defleksije, odnosno, sposobnost zadržavanja oblika i prilagodljivosti obliku alata. Step en defleksije se može izraziti na različite načine: preko visine nabora, odnosno zadatih i ostvarenih mera i uglova na otpresku, promene specifičnih

geometrijskih parametara sa hodom izvlačkača i sl. Na sl.3 pokazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja pri ispitivanju defleksije, prema tzv. Yoshida-testu. Ispitivani su domaći i uvozni materijali, u okviru širih istraživanja mogućnosti primene limova od ČPČ (PH-refosforisani lim, BH-lim sa Bake-hardening efektom, proizvođač SARTID A. D.; CHR- proizvođač KAWASAKI Co.).



Sl. 2 Materijali za karoserije automobila



Sl. 3 Pokazatelj defleksije limova od ČPČ

Generalno posmatrano, pri korišćenju imova od ČPČ, mogu se razlikovati dva slučaja: mogućnost primene LPČ u okviru postojeće tehnologije i projektovanje nove tehnologije, koja u osnovi pretpostavlja specifičnu obradivost ovakvih materijala. U suštini, defleksija se može umanjiti ostvarivanjem dodatnog zatezanja u kritičnim zonama, izmenom pravca tečenja metala, optimizacijom oblika i veličine razvijenog stanja, primenom zateznih rebara, izmenom geometrije izvlačkača i šeme podmazivanja i sl. [7].

### 3.2 LIMOVI OD Al-LEGURA

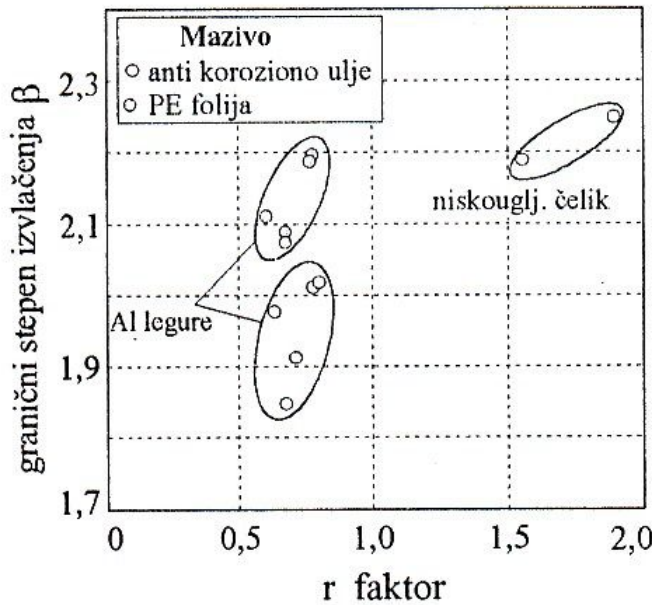
Korišćenje Al-legura omogućava smanjenje težine uz zadovoljavanje zahteva za krutošću karoserije, čime se smanjuje potrošnja goriva i otvara prostor za dodatnu ugradnju elemenata aktivne bezbednosti. Međutim, zbog umanjene obradivosti u odnosu na niskougljenične čelične limove, zamena i uvođenje Al-legura zahteva i niz tehnoloških usklađivanja u postojećem proizvodnom procesu, odnosno realizaciju potpuno novih elemenata obradnog sistema [8].

Primena aluminijuma za izradu pojedinih delova karoserije automobila započela je korišćenjem legura Al-Mg-Zn osamdesetih godina (poklopac motora, vrata, blatobrani i sl. - delovi koji se "vešaju" za karoseriju). U početku korišćenja Al-legura u ove svrhe, vršena je prosta zamena čeličnih limova sa aluminijumskim, pri istim debljinama. Na ovaj način, ostvareno je smanjenje težine za 66%, ali uz smanjenu krutost i određene funkcionalne slabosti. Lokalna ojačanja mogu da reše neke od ovih problema, ali koncepcija u osnovi odgovara onoj pri korišćenju čeličnih limova. Rešenje predstavlja nova koncepcija, gde je čitava karoserija urađena od aluminijuma. Kod nje se koriste limovi od Al-legura i delovi od Al dobijeni istiskivanjem i livenjem. Ispitivanja su pokazala da se zamenom lokalnog ojačanja profilom kvadratnog preseka od čelika istim od Al, ostvaruje umanjjenje mase za 50%, uz nepromenjenu funkcionalnost [9].

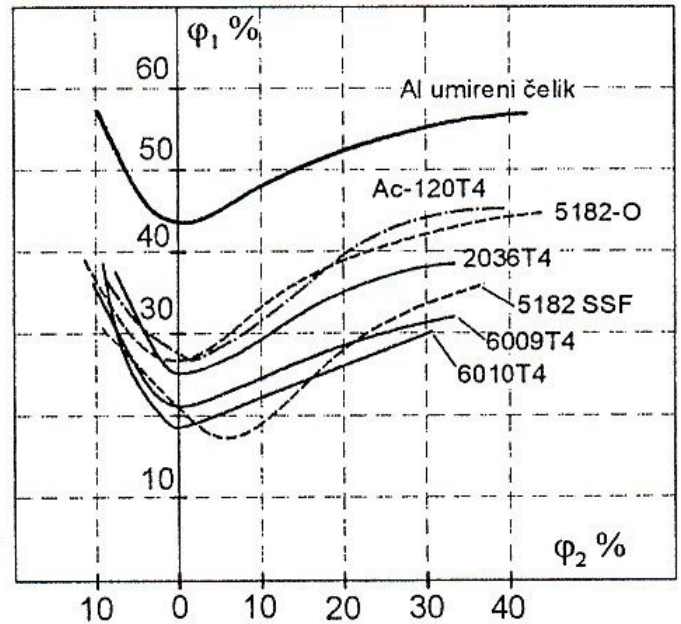
Na svetskom tržištu već postoje automobili čija je celokupna karoserija izrađena od Al-legura

(Audi A8, Audi A2, Mazda AZZ550, Porsche EXP). Ukupan procenat učešća Al-legura raste sa 6 na 12%, odnosno sa 70 na 120 kg ukupno ili sa 5 na 30 kg po karoseriji. Japanske prognoze su drugačije i predviđaju učešće Al-legura do 15% kod automobila srednje i niže klase, i do 25% kod automobila visokih performansi.

Za delove karoserije uglavnom se koriste tri grupe Al-legura: Al-Cu (serija 2000), Al-Mg (serija 5000) i Al-Mg-Si (serija 6000). Mala težina, otpornost na koroziju i mogućnost reciklaže su najvažnije osobine koje Al-legure čine pogodnim za korišćenje u automobilskoj industriji. Jedna od specifičnosti Al-legura je u tome, da se mogu dobiti u velikom broju stanja, s obzirom na ostvareni stepen deformacije ili termičku obradu u toku valjanja.



Sl. 4 Pokazatelji obradivosti Al- legura



Sl. 5 Dijagrami granične deformabilnosti

Osnovne karakteristike Al-legura su [10]:

- granica tečenje i zatezna čvrstoća su niži u odnosu na čelik,
- modul elastičnosti ima tri puta manju vrednost u odnosu na čelik,
- izduženje, naročito lokalno, je malo,
- koeficijent normalne anizotropije je mali (ispod 1),
- relativno mala tvrdoća sa površinom koja se lako oštećuje.

Kod nekih Al-legura dolazi pri deformisanju do pojave Liders-ovih linija, tzv. tipa A i B, koje bitno utiču na kvalitet površine oblikovanih delova, odnosno estetski izgled spoljašnjih elemenata karoserije. Ovakvi materijali se mogu koristiti isključivo za izradu unutrašnjih delova karoserije. S obzirom na mali modul elastičnosti, poseban problem predstavlja zadržavanje oblika pri dubokom izvlačenju, te je neophodno precizno odrediti uglove povratnosti.

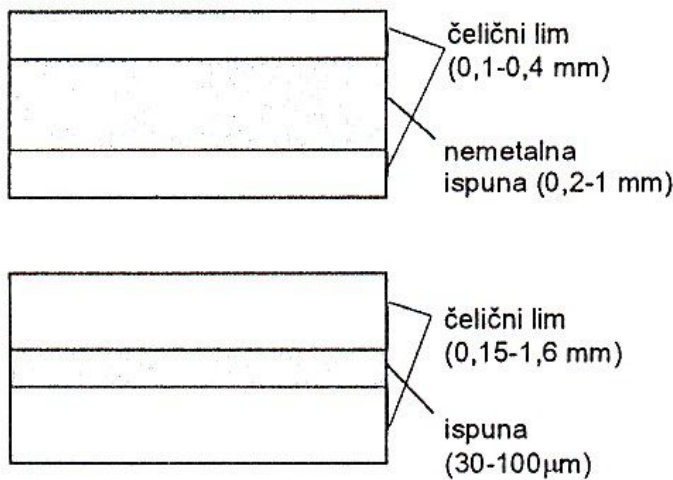
Očigledno je da Al-legure imaju umanjenu obradivost u odnosu na čelik, sl. 4 i sl. 5 [10]. Pri izučavanju obradivosti ovih materijala u potpunosti se može koristiti metodologija razvijena za slučaj korišćenja čeličnih limova (mehaničke karakteristike, testovi čistog dubokog izvlačenja, razvlačenja, dijagrami granične deformabilnosti, testovi defleksije i sl.). Tribološki uslovi imaju izuzetan značaj pri obradi Al-legura dubokim izvlačenjem, pre svega zbog male tvrdoće i intenzivnog vezivanja Al za čelik. Za definisanje optimalnih kontaktnih uslova, posebno vrste i

zone nanošenja maziva, koriste se poznati tribo-testovi: klizanje trake od lima između ravnih kontaktnih površina, preko zateznog rebra, kao i složeniji modeli (duboko izvlačenje, razvlačenje).

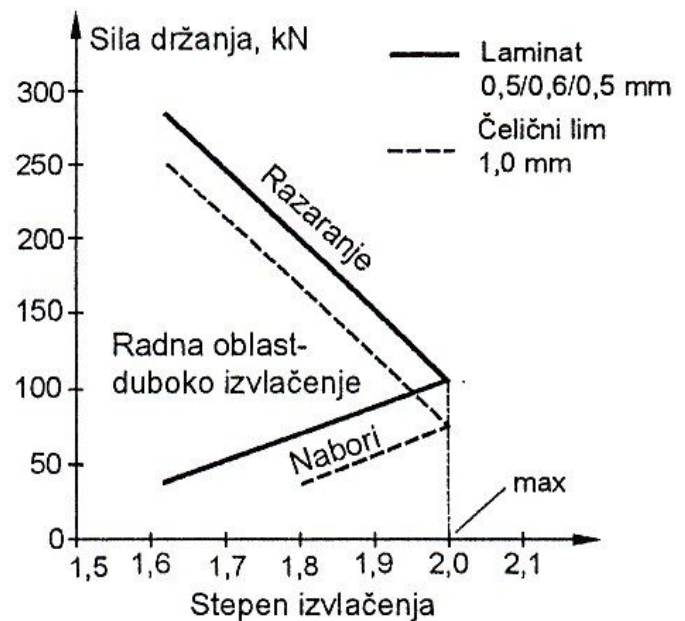
### 3.3 ČELIČNO-PLASTIČNI LAMINATNI LIMOVI

Čelično-plastični laminatni limovi predstavljaju kompozitne materijale novije generacije sa vrlo specifičnim karakteristikama obradivosti. U zavisnosti od debljine plastične ispune, mogu se podeliti u dve osnovne grupe - one za smanjenje težine (laki sendviči) i one za prigušenje vibracija, sl.6 [8].

Laki senvič-limovi imaju deblji sloj ispune od limova za prigušenje vibracija, i mogu doprineti smanjenju težine konstrukcije do 30%. Između limova se nalazi termo-elastična ispuna, sa dobrim karakteristikama prigušenja. Ispuna sadrži metalne ili grafitne uključke, kojima se poboljšava zavarljivost. u eksploataciji, pri relativnom mikropomeranju jednog u odnosu na drugi lim, dolazi do visko-elastičnog deformisanja unutar ispune i do redukcije vibracione energije u sistemu koji se prigušuje. Za ispunu se najčešće koristi polipropilen, najlon ili polietilen.



Sl. 6 Struktura laminatnih limova



Sl. 7 Radno područje pri dubokom izvlačenju

Osnovne mehaničke karakteristike, kao i parametri obradivosti, odgovaraju karakteristikama elemenata kompozita. Pri dubokom izvlačenju se narušavaju standardni uslovi na obodu, u zoni držača, te je znatno povećana sklonost ka stvaranju nabora. Ovo dovodi do smanjenja obradivosti i nižeg graničnog stepena izvlačenja. Takođe, uvećana je sklonost ka defleksiji, koja zavisi od adhezione veze ispune i osnovnog materijala. Netačnosti pri oblikovanju se mogu smanjiti pravilnim izborom vrsta i debljina osnovnih materijala i ispune. Prema sl. 7 pri istim odnosima izvlačenja, neophodno je uvećati silu na držaču. Krive granične deformabilnosti za sendvič -materijale se nalaze u području koje važi za čelične limove. Bolja svojstva se odnose na oblast dvostranog zatezanja, a lošija u oblasti negativne druge glavne deformacije [11].

Mnogi delovi karoserija automobila se mogu raditi od laminata, u uslovima koji važe za

standardni čelični lim. Pojava defleksije, glavni ograničavajući faktor pri oblikovanju, nije suštinski značajna kod unutrašnjih delova karoserije, ili. npr. kod kartera motora. Kod spoljašnjih delova, poseban problem u vezi defleksije, može nastati pri pečenju boje i pojavi temperaturnih deformacija.

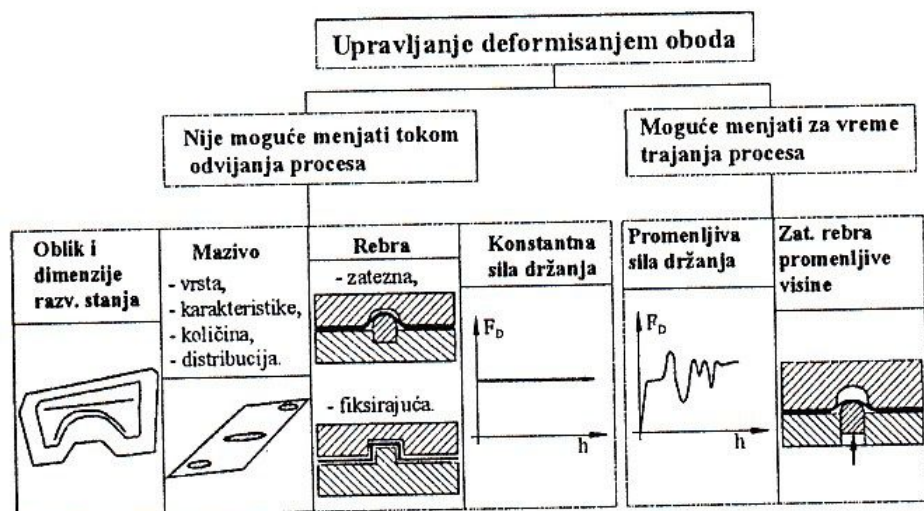
### 3.4 KORIŠĆENJE PRETHODNO ISKROJENIH (TAILOR) LIMOVA

Razvojem kompjuterske tehnologije i pratećih nekonvencionalnih postupaka obrade, kao što je lasersko zavarivanje, oblikovanje uz pomoć tečnosti-hidroforminga, dobijanje površina materijala valjanjem sa programiranom hrapavošću i sl., stvaraju se uslovi za suštinsku promenu tehnoloških koncepcija u oblasti dubokog izvlačenja. Klasičan pristup u izradi karoserija-tačkastim zavarivanjem većeg broja otpresaka zamenjuje se izvlačenjem iz jedinstvenog razvijenog stanja, koje čine elementi od različitih materijala, različite debljine i mehaničkih karakteristika (tzv. TAILOR limovi). Na ovaj način se smanjuje broj alata za obradu prosecanjem i dubokim izvlačenjem, ali znatno komplikuje jedinstveni alat. Takođe, usložavaju se pokazatelji obradivosti iz sledećih razloga:

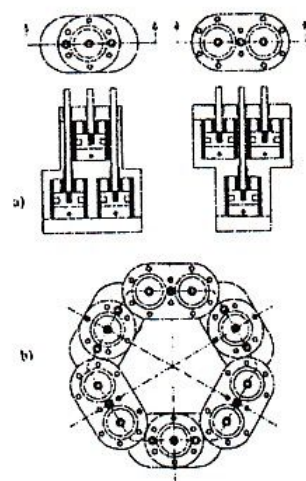
- menjaju se svojstva u okolini vara, s obzirom da je njegoa tvrdoća i do tri puta veća u odnosu na osnovni materijal,
  - pri obradi lima različitih debljina, tribološki uslovi u zoni držača su od posebnog značaja,
  - položaj zone vara mora biti pravilno odabran, s obzirom na glavne pravce tečenja metala i sl.
- Zbog izuzetnih zahteva prema obradnom sistemu, ovi materijali se redovno obrađuju na mašinama kod kojih se može programski upravljati silom držanja.

## 4. NOVI PRISTUPI U OBLASTI UPRAVLJANJA PROCESOM DUBOKOG IZVLAČENJA

Duboko izvlačenje je najvažnija tehnologija u okviru plastičnog oblikovanja lima. Njen razvoj ide u pravcu potpunije kontrole procesa, odnosno upravljanja najvažnijim parametrima, sve u cilju smanjenja procenta delova sa defektima i poboljšanja kvaliteta. Važno mesto u ovom trenutku razvoja sistema upravljanja zauzima plastično deformisanje oboda, pre svega zbog mogućnosti spoljašnjeg uticaja na proces. Sl. 8 [12] ilustrativno prikazuje na koje je činioce i parametre procesa moguće uticati tokom samog njegovog odvijanja, što čini osnovu



Sl. 8 Načini za upravljanje oblikovanjem oboda

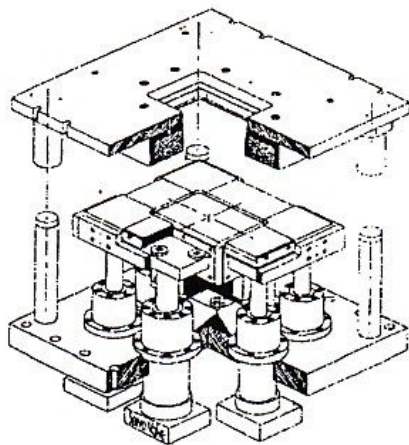


Sl. 9 Tipski hidro aktuatori

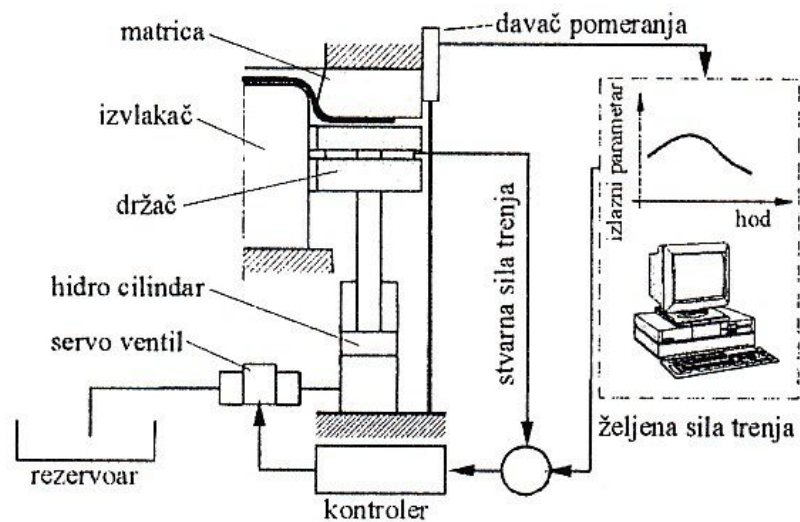


upravljanja. Jasno se zapaža da vrlo bitnu ulogu ima sila držanja koju je moguće na razne načine varirati tokom procesa. To prouzrokuje promenu triboloških uslova na obodu, a time i značajan uticaj na proces i njegove rezultate. Artikulacija ovih uticaja je centralni zadatak razvoja u ovoj oblasti.

Jedan od načina korišćenja sile držanja kao upravljajuće veličine je tzv „multi point” sistem. Na više „tačaka” raspoređenih po površini držača deluje se silom odgovarajućih hidro cilindara. Svaki od njih može imati drugačiju zavisnost sile držanja od hoda izvlačača tokom procesa. Takođe, moguće je sinhronizovano usklađivati grupe pojedinih cilindara. Sl. 9 pokazuje način izvođenja tipskih hidro-aktuatora za delovanje preko elastičnog jednodelnog držača i mogućnost njihovog slaganja [12].



Sl. 10 Segmentno izvođenje držača



Sl. 11 Shema upravljačkog uređaja

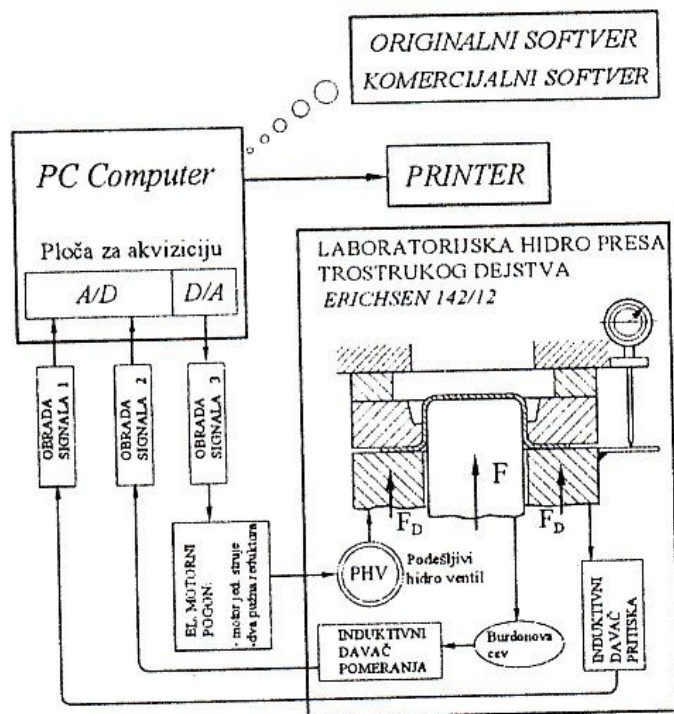
Više mogućnosti pruža segmentno izvođenje držača (sl. 10, [12]). Segmenti se formiraju prema osobenostima pojedinih zona oboda (naročito kod delova prizmatičnog i složenog oblika). Svaki segment ima sopstveno, nezavisno upravljanje.

U okviru razmatranja različitih sistema upravljanja važno mesto zauzima realizacija tzv. „closed loop” sistema. Reč je o pokušaju da se iskoristi sila držanja kao upravljajuća veličina koja utiče na odabranu upravljajuću veličinu (recimo sila trenja na obodu, visina nabora itd.). Željeni zakon promene upravljane veličine se prethodno zadaje. Sistem automatizovano povratnom spregom reaguje na svako odstupanje od zadatog zakona (sl. 11, [12]). Konačni cilj bi bio realizovanje takvog upravljačkog sistema koji bi autonomno bio u stanju da reaguje na sve promene tokom procesa i privede ga uspešno kraju. Iako su postignuti pozitivni rezultati ipak je potrebno prethodno (empirijski, na osnovu simulacije, eksperimenta itd.) definisati potrebne zakonitosti promene upravljanih veličina. Daleko je jednostavnije ostvariti tzv. „open loop” sisteme gde se prethodno definiše zakonitost upravljajuće veličine.

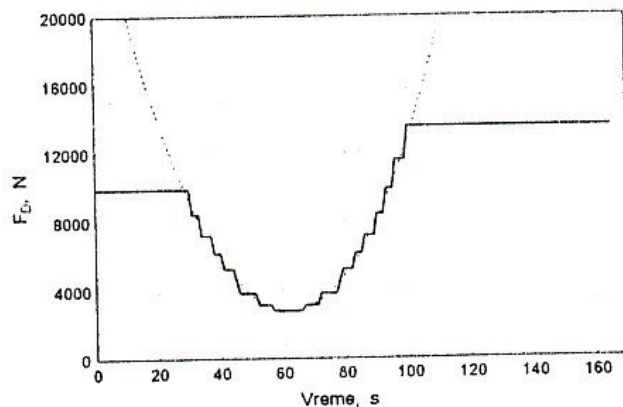
Na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu razvijen je kompjuterski merno-upravljački laboratorijski sistem za izučavanje uticaja promenljive sile držanja (sl. 12, [12]). Njegova glavna osobina je mogućnost zadavanja proizvoljne zavisnosti sile držanja od hoda tokom procesa („open loop”) i ostvarivanje regulacije sile izvlačenja (upravljana veličina) promenom sile držanja (upravljajuća veličina) čime se dobija varijanta „closed loop” sistema. Kontinualno se meri sila držanja i sila izvlačenja odgovarajućim davačima uz mogućnost mehaničkog identifikovanja nabora na obodu.

Opsežno istraživanje [12] je pokazalo značajne efekte optimiziranih zavisnosti promenljive sile

držanja (sl. 13, [12]) čak i na malim geometrijama cilindričnog i prizmatičnog kvadratnog komada od niskougljeničnog (sa i bez prevlaka na površini) i aluminijumskog lima.



Sl. 12 Shema eksperimentalnog sistema za upravljanje silom držanja



Sl. 13 Primer optimirane zavisnosti sile držanja

## 5. KOMPJUTERSKE SIMULACIJE PROCESA PLASTIČNOG OBLIKOVANJA LIMA

Osnovna ideja je da se primenom matematičke teorije plastičnosti, numeričkih metoda (najčešće MKE) i snažnih kompjutera dobije virtuelni prikaz (simulacija) čitavog procesa oblikovanja. To pruža mogućnost korekcija, tj. optimizacije, pre realizacije realnog procesa. Takođe, moguće je smanjiti, a ponekad i izbeći skupe eksperimentalne probe.

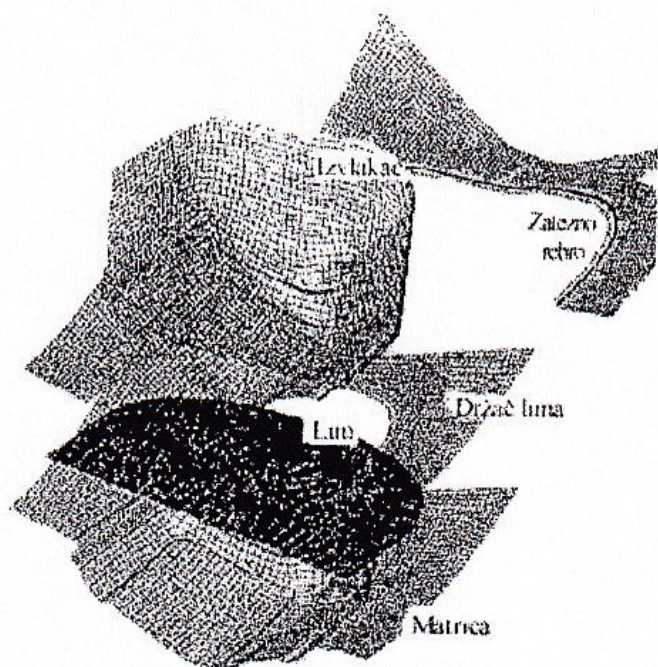
Tokom zadnje decenije usavršeno je nekoliko velikih programskih paketa za simulaciju plastičnog oblikovanja lima, od kojih treba pomenuti: PAM STAMP, LS-DYNA3D, OPTRIS, AUTO FORM i MTLFRM. Hardversko okruženje pružaju različite platforme (Unix i Linux radne stanice i Windows PC). Proces realizacije simulacije ide po sledećem redosledu ([13]):

- 1) definisanje geometrije alata (izvlakač, matrica, držač) i razvijenog stanja (sl. 14 [14]),
- 2) definisanje mreže konačnih elemenata (sl. 15 [14]),
- 3) unos karakteristika materijala (kriva tečenja,  $r$  i  $n$  faktor, kriva granične deformabilnosti, uticaj anizotropije u ravni lima, modul elastičnosti, Poison-ov koeficijent itd.),
- 4) određivanje kinematike procesa i graničnih uslova na kontaktnim površinama,
- 5) definisanje tehnološkog postupka (broj i redosled operacija),
- 6) postprocesiranje rezultata (vizuelni prikaz geometrije, sl. 15, distribucije napona i deformacija, sl. 16 [15], parametara procesa, površinskih defekata, sl. 17 [14] itd.).

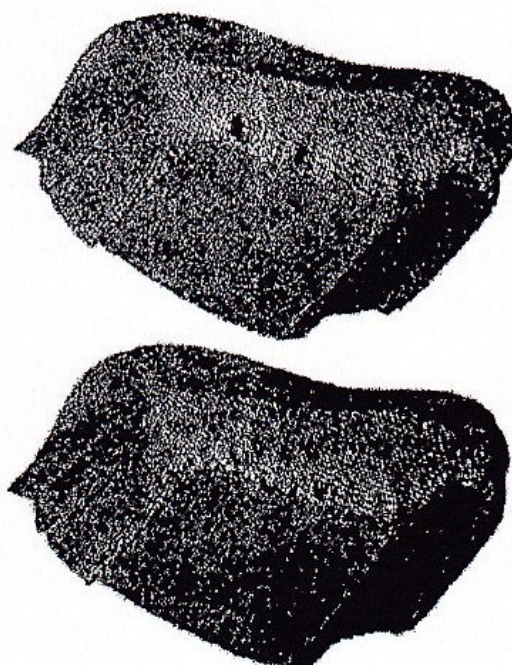
Najosetljivije i kritično mesto kod bilo kog softverskog paketa za simulaciju je mogućnost predikcije pojedinih defekata (nabori, stanjenje i lom, površinski defekti, devijacije oblika posle

povlačenja elastičnih deformacija). Nijedan od aktuelnih softverskih paketa, i pored manje ili više, spektakularnih rezultata ne može u potpunosti da predvidi sve pomenute defekte.

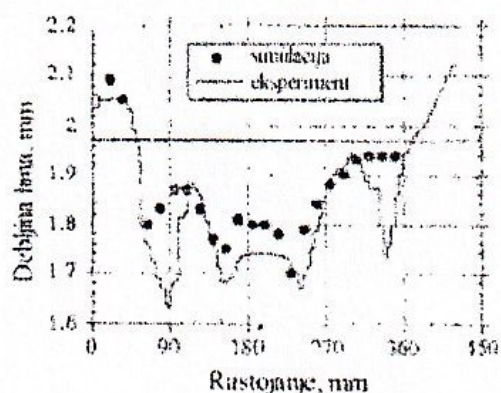
U cilju vrednovanja i unapređenja postojećih softverskih rešenja pokrenut je veliki međunarodni projekat 3DS (Digital Die Design Systems) [16], čiji rezultati treba da budu pouzdani eksperimentalni podaci uz minimalno rasipanje rezultata. Oformiće se opsežna baza podataka univerzalnog internacionalnog značaja, koji će pomoći da nove verzije softverskih paketa budu u stanju da pouzdanije definišu geometriju delova od lima tokom procesa i geometriju alata sa parametrima procesa da bi se u realnom izvođenju tačno ostvario željeni oblik. Preduslov za to su jasne definicije svih mogućih defekata i parametara koji ih određuju.



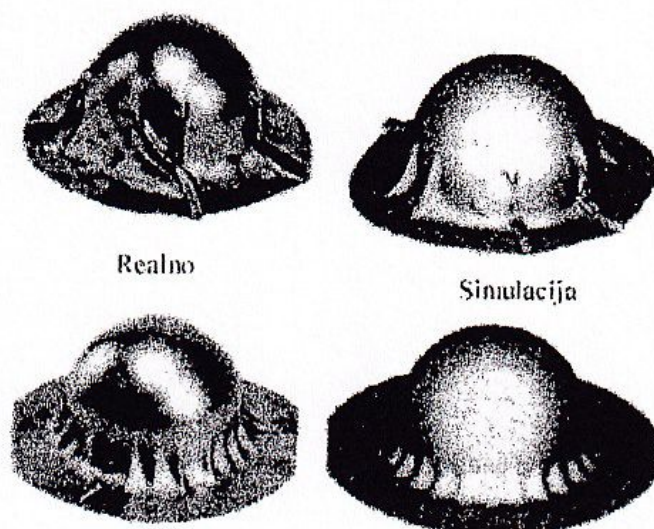
*Sl. 14 Geometrija elemenata alata i razvijenog stanja*



*Sl. 15 Geometrija izvučenog komada iz alata sa sl. 14*



*Sl. 16 Promena debljine lima po jednom preseku komada*



*Sl. 17 Poređenje izgleda komada (stvarno i simulacija)*

## 6. ZAKLJUČAK

Savremen pristup izučavanju deformabilnosti limova pri obradi dubokim izvlačenjem podrazumeva kombinaciju numeričko-fizičkog modeliranja, pri čemu je baza eksperimentalnog rada metodologija mernih mreža. Relevantni pokazatelji pri istraživanju ključnih uticaja na proces oblikovanja, dobijaju se osnovnom analizom deformacionih polja u kritičnim preseccima komada koji se izvlači.

Uobičajena distribucija glavne deformacije se mora dopunjavati prikazima u dijagramu granične deformabilnosti. Pri izmeni istorije deformisanja neophodno je pratiti trajektorije deformacija, uz poštovanje uslova proporcionalnosti u svakoj fazi oblikovanja.

Rešavanje problema obradivosti limova od ČPČ, Al-legura, laminata itd. može se ostvariti razvojem novih materijala-legura sa uvećanom obradivošću, redizajniranjem geometrije komada (eliminacija pritisnih uz uvećanje zatežućih napona), novim tehnologijama oblikovanja (upravljanje silom držanja po intenzitetu i po zonama držanja u realnom vremenu, hidro-oblikovanje i sl.), razvojem i usklađivanjem metoda za određivanje posebnih parametara obradivosti (ulazni parametri za upravljanje), usavršavanjem tehnike podmazivanja i sl.

Numeričke simulacije predstavljaju značajnu kariku u optimiziranju tehnologije dubokog izvlačenja, iako ne mogu da isključe eksperimentalnu verifikaciju. Njihov razvoj ide u pravcu potpunije sposobnosti predikcije svih vrsta defekata na komadu.

## 7. LITERATURA

1. Devedžić B. Kriterijumi dostizanja granične obradivosti metala plastičnim deformisanjem, Tehnika, Mašinstvo, 34, 1985, 9, 1333-1344.
2. Stefanović M. Tribologija dubokog izvlačenja, Monografija, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1994.
3. ASAME-Automated Strain Analysis and Measurements Environment, CamSys., Inc., 1994.
4. Stefanović M., Aleksandrović S. Influence of strain path and tribo conditions on limiting relationship in deep drawing, Journal for Technology of Plasticity, Vol.19, (1994), 1/2, 47-55.
5. Technology for Sheet Metal Stamping, www.forming.com
6. Nonomura K., Tamada K., Ohno N. Stamping Engineering for Body Weight Reduction, IBEC '97, Body Assembly & Manufacturing, 17-25.
7. Stefanovic M., Aleksandrovic S., Milovanovic M., Jevtic R. High Strength Steel for Automotive Panels and their Formability, Metall. and New Mater. Res., 1998., VI, 4, 29-42.
8. Hayashi H., Nakagawa T. Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels, Journal of Mater. Process. Techn., 46, 1994, 455-487.
9. Uralight Steel Autobody, www.ULSABfinalmedia.htm
10. Stefanović M., Aleksandrović S., Romhanji E., Milovanović M. Al-Alloys Sheet Metals - Advanced Materials for Application in Car Bodies, J. for Techn. of Plasticity, Vol. 26(2001), 1, 21-32.
11. Finckenstein E., Drewes J., Deep Drawing Simulation of Vibration Damping Steel Sheets, 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, 2000., Proceed., 215-230.
12. Aleksandrović S. Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2000.
13. Gantar G. Računalniške simulacije procesov preoblikovanje pločevine, Tecos Novice, 1998, IV, 4, 1-4.
14. Lefebvre D., Haug E., Hatt F. Industrial application of computer simulation in stamping, Journ. of Mat. Proc. Techn., 46 (1994): 351-389.
15. El Moutassim M. et al. The simulation of multi-operation deep-drawing process at RENAULT with PAM STAMP, J. Mater. Process. Technol., 45, 1994., 317-322.
16. 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.