

PERSPEKTIVE PRIMENE I AKTUELNA PITANJA OBRADIVOSTI LIMOVA POVEĆANE ČVRSTOĆE

S. Aleksandrović¹, M. Stefanović², V. Mandić³, T. Vujinović⁴

Rezime: Razvoj limova povećane čvrstoće (LPČ) traje nešto više od dve decenije, počev od mikrolegiranih pa do TRIP, SULC i ostalih multifaznih LPČ. Njihova primena je u porastu naročito u automobilske industriji, jer omogućuju vrlo povoljan odnos mase i krutosti.

U radu se daje kritički pregled karakteristika najznačajnijih vrsta LPČ uz rezultate eksperimentalnih istraživanja obradivosti dubokim izvlačenjem radenih na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Posebna pažnja posvećena je problemima pri plastičnom oblikovanju ovih limova (defleksione pojave itd.). Takođe, razmatraju se specifični pokazatelji obradivosti i testovi kojima se oni određuju. U zaključku se daju praktične mere koje treba preduzeti da bi se kompenzovali problemi u procesu oblikovanja LPČ.

Ključne reči: limovi povećane čvrstoće, duboko izvlačenje, obradivost.

APPLICATION PERSPECTIVE AND CURRENT FORMABILITY PROBLEMS OF HIGH STRENGTH STEEL SHEETS

Abstract: Development of high strength steel sheets (HSS) is lasting more than two decades, starting from microalloyed to TRIP, SULC, and other multiphase HSS. Application of HSS is increasing particularly in automotive industry because they have very favorable relation of weight to stiffness. Presented in the paper are critical review of most relevant HSS properties with experimental results of formability obtained on Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac (Serbia and Montenegro). Special attention was paid to problems at plastic forming of this sheets (deflection etc.). Also, specific formability properties and appropriate experimental tests are considered. Practical countermeasure which need to take for compensation forming problems of HSS are given in conclusions.

Keywords: high strength steel sheets, deep drawing, formability.

1. UVOD

Razvoj i primenu limova povećane čvrstoće (LPČ) uslovlila je tzv. naftna kriza polovinom sedamdesetih godina XX veka. Smanjenje mase automobila a time i manja potrošnja goriva postalo je uslov za proizvođače. Tako su razvijeni čelični limovi koji i sa smanjenom debljinom mogu da zadovolje postavljene zahteve. Postavljena je granica zatezne čvrstoće na 340 MPa i svi čelici iznad te granice nazvani su čelicima povišene čvrstoće [1]. Prvih godina, relativno

¹ Dr Srbislav Aleksandrović, docent, Kragujevac, Mašinski fakultet, srba@knez.uis.kg.ac.yu

² Dr Milentije Stefanović, red. prof., Kragujevac, Mašinski fakultet, stefan@knez.uis.kg.ac.yu

³ Dr Vesna Mandić, asistent, Kragujevac, Mašinski fakultet, vmandic@knez.uis.kg.ac.yu

⁴ Mr Tomislav Vujinović, dipl. ing., Banja Luka, Čajavec Mega

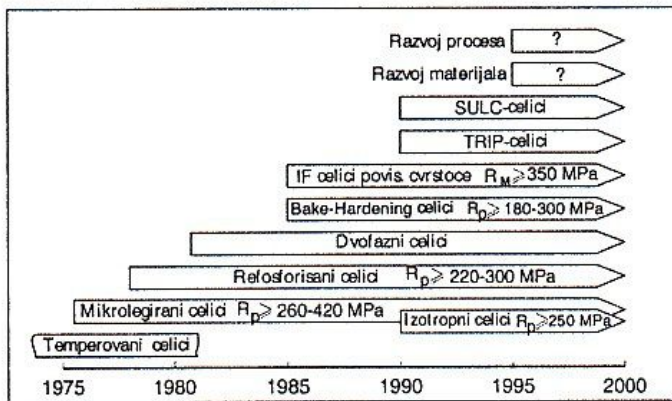
skromne količine ovih limova primenjene su na karoserije. U Japanu, procene su da je 1980. god. korišćeno prosečno oko 8,7% od ukupne mase karoserije. 1992.g. to je oko 23,3%. Predviđa se da će u narednom periodu taj iznos biti oko 50% [1]. U Američkom Institutu za gvožđe i čelik (AISI) procenjuje se da je za poslednjih 25 godina primena LPČ porasla za oko 300% sa sličnim trendom i nadalje [2].

2. KARAKTERISTIKE NAJZNAČAJNIJIH LIMOVA POVEĆANE ČVRSTOĆE

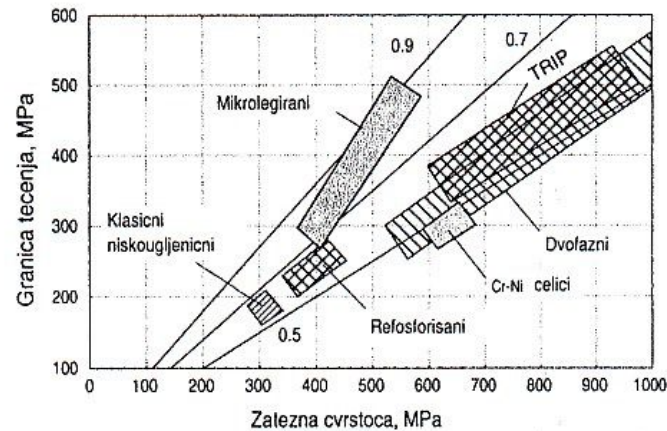
Saglasno sl. 1 [3] LPČ je moguće podeliti na nekoliko grupa:

a) Temperovani čelici. Kao posledicu metalurškog procesa dobijanja imaju veoma lošu obradivost plastičnim oblikovanjem. Zbog toga je njihova primena (pre svega u auto industriji) zanemarljiva.

b) Klasični mikrolegirani čelici. Sa aspekta obradivosti imaju nepovoljno veliki odnos granice



Sl. 1 Razvoj limova od čelika povećane čvrstoće



Sl. 2 Mehaničke karakteristike za razne LPČ

tečenja i zatezne čvrstoće (R_p/R_M), nedovoljno izraženo ojačanje (mala vrednost n faktora), relativno malu vrednost r faktora i malu plastičnost. Nepovoljni su za karoserijske delove.

c) Izotropni čelici. Predstavljaju noviju varijantu mikrolegiranih čelika.

d) Refosforisani čelici. Imaju značajno bolju obradivost. To je naročito izraženo ako se žarenje izvodi u pećima (lim je u koturovima) kada se za ove limove koristi i naziv modifikovani refosforisani čelici. Ako se granica tečenja drži nešto niže (obično 250-270 MPa) lim ima vrlo povoljnu 'pancake' strukturu i relativno povoljne vrednosti r i n faktora. Poseduju BH (bake hardening) efekat naknadnog ojačanja starenjem pri povišenoj temperaturi oko 200°C.

e) Dvofazni čelici. Poseduju dobra svojstva deformacionog ojačavanja, što doprinosi velikom izduženju pri prekidu. Odnos R_p/R_M je povoljno mali, ali je r faktor veoma nizak. Imaju izražen BH efekat.

f) IF (interstitial free) čelici. Karakterišu se povoljnim vrednostima izduženja, r i n faktora, odnosa R_p/R_M , ali nemaju BH efekat što uzrokuje malu otpornost prema ulegnuću kod oblikovanih delova.

g) U okviru dvofaznih čelika razvijeni su tzv. TRIP čelici (TRansformation Induced Plasticity). Imaju veoma veliku čvrstoću (i do 1000 MPa) uz povoljan odnos R_p/R_M i dobre karakteristike ojačavanja, tako da su primenljivi i za složenija oblikovanja uprkos ekstremno velikoj čvrstoći. Ipak, zaostali austenit nalaže oprez zbog mogućih zaostalih unutrašnjih napona i pojave pukotina.

h) SULC (Super UltraLow Carbon) ima u svom hemijskom sastavu veoma malo ugljenika (samo 0,002%). Legiran je titanom (0,03%). Obradivost je dobra, ali čvrstoća nije bitno veća u odnosu na klasične niskouglenične limove. To nadoknađuje veoma izražen BH efekat.

3. PROBLEMI VEZANI ZA OBRADIVOST LPČ

Generalno posmatrano, obradivost LPČ je lošija u odnosu na klasične niskouglenične čelične limove, što je razumljivo ako se ima u vidu da sa porastom čvrstoće opada plastičnost i obrnuto. Ako obradivost posmatramo u širem smislu, ona pored sposobnosti za plastično oblikovanje obuhvata postizanje potrebne tačnosti oblika i dimenzija, kao i kvaliteta površine. Probleme obradivosti LPČ moguće je podeliti u dve grupe.

U prvoj su neželjene pojave koje su karakteristične i za ostale vrste limova: pukotine (razaranje), nabori, elastična povratnost, nedovoljna dimenzijska tačnost, površinski defekti, tribološke pojave na kontaktnim površinama lima i alata.

Druga grupa obuhvata specifične pojave vezane, uglavnom, za LPČ poznate pod nazivom defleksija. Pod defleksijom se ovde podrazumeva nastajanje površinskih makro defekata na oblikovanim otprescima u vidu: udubljenja, ispupčenja, ulegnuća, talasastih formi itd. Sve te manifestacije nestabilnosti oblika površine uzrokovane su zaostalim unutrašnjim naponima i uopšte neujednačenim naponsko-deformacionim stanjem u otpresku sa izraženim dejstvom napona u oblasti elastičnosti u pojedinim zonama. U manjoj ili većoj meri oni se oslobađaju po vađenju otpreska iz alata. Ovome treba dodati već pomenute druge vidove elastične nestabilnosti kao što je elastična povratnost pri savijanju.

Skлонost materijala ka defleksiji korisno je sistematizovati preko sledeća dva svojstva: sposobnost očuvanja oblika (shape fixability) i sposobnost prilagođavanja obliku alata (fittability). Ovome treba dodati i sledeće: skłonost ka zaribavanju (galling), vrlo uzak opseg sile držanja s obzirom na nabore i razaranje, veće rasipanje karakteristika materijala, različiti uslovi obrade u odnosu na klasičan niskouglenični lim, potreba češće dorade delova, češći zahvati na održavanju alata, potreba za jačim mašinama, slabija zavarivost, porast troškova materijala i procesa.

4. UTICAJNI PARAMETRI NA PROCES OBLIKOVANJA LPČ

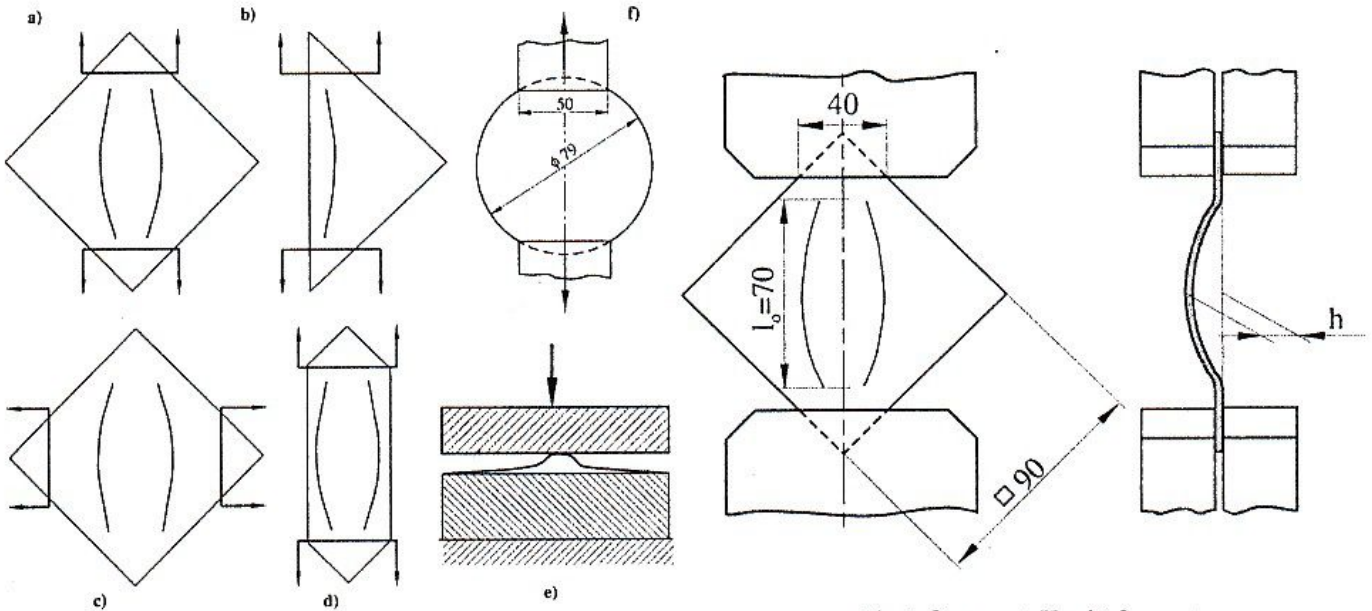
Obradivost LPČ u velikoj meri može se procenjivati preko uobičajenih parametara obradivosti niskougleničnih čeličnih limova. To su sledeće veličine: modul elastičnosti (E), zatezna čvrstoća (R_M), granica tečenja (R_p), odnos prethodne dve veličine (R_p/R_M), eksponent deformacionog ojačavanja (n faktor), koeficijent normalne anizotropije (r faktor), vrednost odnosa r/R_p ili R_p/r i procentualno izduženje A_{80} .

Međutim, skłonost ka defleksionim pojavama najčešće nije moguće kvalitetno proceniti preko navedenih karakteristika pa je potrebno koristiti specifične parametre. Prva takva karakteristika je eksponent deformacionog ojačavanja u opsegu deformacija 2 do 5% (standardna vrednost n faktora određuje se za opseg deformacija 5 do 20%). Parametri direktno vezani za ispoljavanje defleksionih pojava određuju se raznim specijalnim laboratorijskim ispitivanjima. Njihova suština je da se na epruveti od ispitivanog materijala u odgovarajućim uslovima izazove pojava devijacije oblika. Geometrijski pokazatelji te devijacije, ostvarene deformacije i opterećenja predstavljaju defleksione parametre.

Prvo takvo ispitivanje koje je i najšire prihvaćeno je tzv. Yoshida test [4]. Shema ispitivanja data je na sl.3. U materijalu se stvara složeno naponsko stanje i nehomogeni proces deformisanja. Posledica toga je stvaranje nabora čije se praćenje i kvantifikovanje osobina direktno dovodi u vezu sa defleksionim skłonostima materijala. Na sl.3 a data je shema osnovnog testa (detalji su na sl. 4). Pod c, d i e su dopunski testovi za praćenje otklanjanja nabora. Pod f je shema jedne varijacije Yoshida testa [5]. Osnovni pokazatelji su: zavisnost maksimalne dubine nabora od deformacije (sl.5) i zavisnost sile zatezanja od deformacije (sl.6). Skłonost ka defleksiji je veća ako se pri istoj vrednosti deformacije u pravcu zatezanja dobije veća dubina nabora. Pri istom intenzitetu sile, međutim, LPČ imaju manju dubinu nabora iako

su skloniji defleksiji. Razlog leži u njihovoj znatno većoj čvrstoći. Nedostatak Yoshida testa su teškoće oko stezanja (prerano razaranje, proklizavanje) kao i relativno složeno merenje deformacije i dubine nabora tokom procesa, bilo klasično bilo sistemima za akviziciju.

Na sl. 5 i 6 komparativno su prikazane zavisnosti za klasičan karoserijski umireni niskougledni čelični lim (Č0148P5), LPČ sa oznakom CHR35BH (Japanske proizvodnje) i

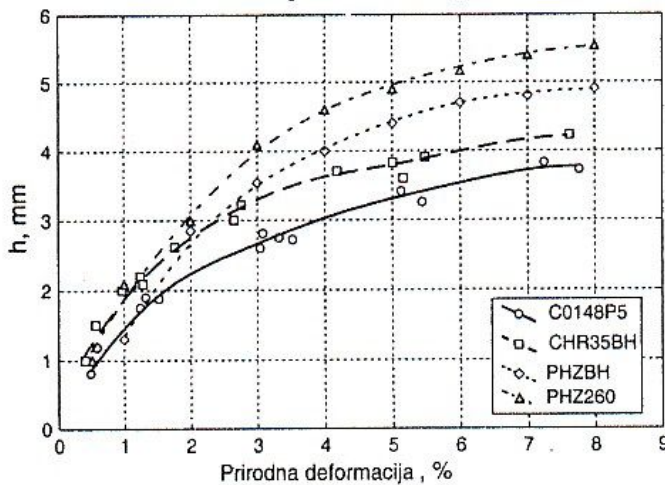


Sl. 4 Osnovni Yoshida test

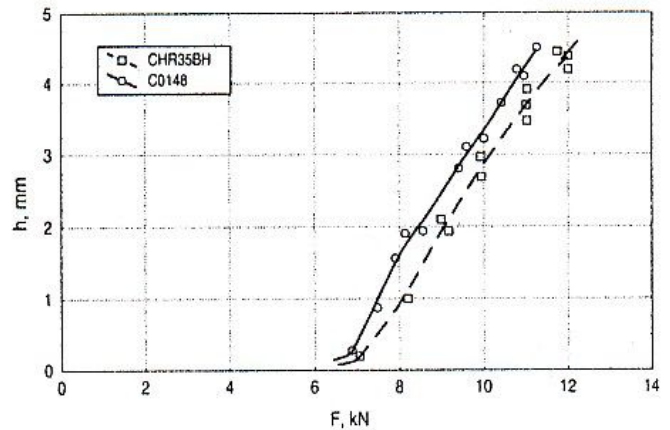
Sl. 3 Ispitivanja LPČ zasnovanih na Yoshida testu

domaći LPČ (Sartid Smederevo) PHZBH i PHZ260.

U novije vreme predložen je još jedan laboratorijski test formiranja nabora [6]. Njegova osnovna osobina je držanje, odnosno ometano kretanje ivica epruvete što dovodi do stvaranja više modova stvaranja nabora (jedan ili više) (sl. 7). Treba imati u vidu da ovaj test služi



Sl. 5 Zavisnost dubine nabora od deformacije



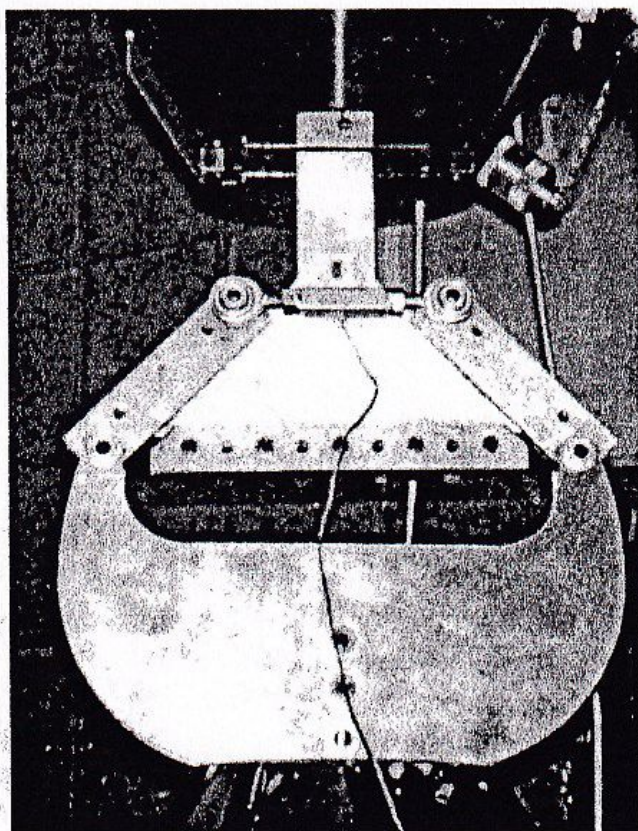
Sl. 6 Zavisnost dubine nabora od sile zatezanja

prvenstveno za ispitivanje pojave nabora kao opšteg fenomena plastičnog oblikovanja limova, a ne kao test ispitivanja sklonosti LPČ ka defleksiji. Diskutabilna je procena autora [6] da je držanje ivica bitno u praktičnim uslovima oblikovanja u alatu.

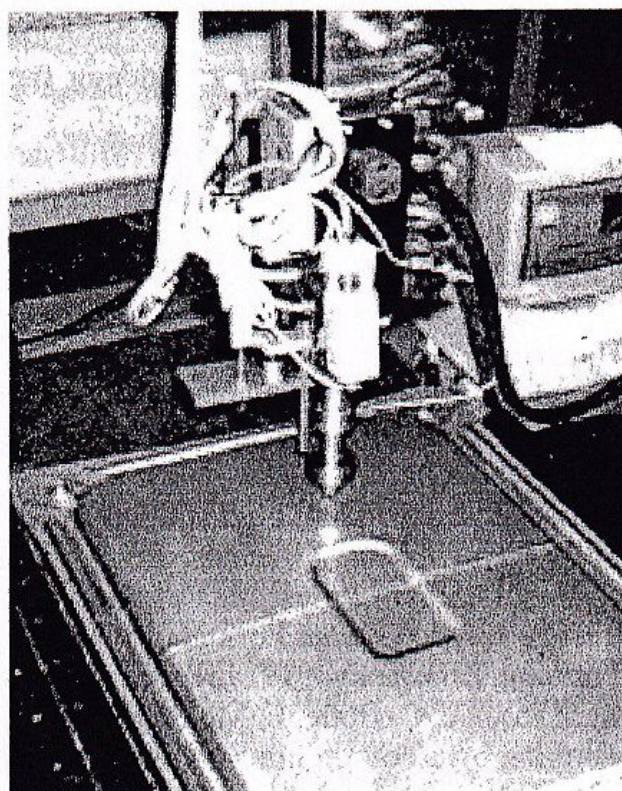
Ispitivanje otpornosti prema ulegnuću (udubljenju) (dent resistance) daje podatke o stanju krutosti gotovih otpresaka po vađenju iz alata. Poznato je da veliki broj LPČ ima slabu

otpornost prema ulegnuću pa su zbog toga odgovarajuća ispitivanja vrlo značajna. Moguće je izvoditi ispitivanje statičke i dinamičke otpornosti prema ulegnuću. Ova ispitivanja još nisu standardizovana tako da postoje razlike u detaljima. Suština je u tome da se otpornost definiše kao intenzitet sile (za statičko ispitivanje) ili energije (za dinamičko ispitivanje) utiskivača pri ostvarivanju određene trajne dubine udubljenja na otpresku (0,05 do 0,2 mm). Prema iskustvima kompanije Volvo [7] pogodno je utiskivač ima polusferični oblik prečnika između 25 i 100 mm, a statička sila intenzitet do 300 N. Izgled uređaja za ispitivanje dat je na sl. 8. Manja vrednost sile utiskivanja pri istoj vrednosti trajne dubine utiskivanja znači lošiju otpornost prema ulegnuću.

Poseban značaj za konačnu krutost otpreska od LPC, odnosno za otpornost prema ulegnuću ima pomenuti BH efekat (dopunsko ojačanje tokom termičkog tretmana pečenja boje na gotovoj



Sl.7 Uredaj za praćenje nabora sa držanjem ivica



Sl.8 Uredaj za statičko ispitivanje otpornosti prema ulegnuću

karoseriji). U tom smislu vršena su brojna ispitivanja (na pr. [8, 9]).

5. ZAKLJUČAK

Na ovom mestu navešće se nekoliko praktičnih mera za otklanjanje ili ublažavanje posledica lošije obradivosti LPC plastičnim oblikovanjem.

Kod delova sa malim stepenom deformisanja (tzv. plitki otpresci) defleksija je manja na limovima sa manjom granicom tečenja, a kod delova sa većim stepenom deformisanja (dublji otpresci) r faktor treba da ima relativno velike vrednosti. Smanjivanju defleksije generalno doprinosi intenzivnije deformaciono ojačavanje zbog homogenizacije deformacionog polja. Snižavanje granice tečenja ne sme da bude preveliko zbog otpornosti prema ulegnuću. U vezi s tim je izuzetan značaj BH efekta naknadnog ojačavanja pri niskotemperaturnom zagrevanju.

Sa stanovišta defleksije najpogodniji su dvofazni limovi, ali zbog niske vrednosti r faktora

nisu pogodni za duboko izvlačenje sa većim stepenom deformisanja. Značajna je nova generacija SULC LPČ sa odličnim karakteristikama obradivosti (potpuno odgovarajući klasičnim niskougljeničnim limovima velike plastičnosti) i veoma izraženim BH efektom koji kompenzuje slabiju otpornost prema ulegnuću. Široku primenu imaju i BH refosforisani LPČ.

Tribološku pojavu zaribavanja (galling), koja je karakteristična za LPČ, moguće je izbeći sledećim merama: podizanjem granične vrednosti kontaktnog pritiska od koje počinje 'galling' (bolji kvalitet površina alata, nanošenje tvrdih prevlaka kao što je TiN, primena kvalitetnijih maziva itd.), smanjivanjem konkretnih kontaktnih pritisaka u procesu ispod graničnih (bolja konstruktivna rešenja alata za oblikovanje), skraćanjem dužine puta klizanja (optimizacija geometrije komada) itd.

Pored pomenutih, za preventivno izbegavanje ili smanjivanje defleksionih devijacija moguće je primeniti i sledeće mere: podešavanje zazora između izvlakača i matrice, ostvarenje dopunskog zatezanja u kritičnim zonama (zatezna rebra i sl.), ostvarenje dopunskog pritiska u pojedinim zonama upravno na površinu lima, bolja kontrola tečenja materijala, povećanje krutosti alata, pojačana pažnja pri projektovanju alata vezano za elastičnu povratnost, optimizacija oblika i dimenzija razvijenog stanja, podela procesa na više operacija, korekcije oblika otpreska itd.

Napomena: U radu je saopšten deo rezultata koji su ostvareni na projektu TR0025 finansiranom od Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] H. Hayashi, T. Nakagawa: Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels, Journ. of Mater. Proc. Techn. 46, 1994, 455-487.
- [2] Automotive Steel Technology Roadmap, American Iron and Steel Institute, Soutfield, MI, USA, feb. 2002, 23-25, 52.
- [3] W. Bleck: Cold rolled, high strength sheet steel for auto applications, JOM, july 1996, 26-30.
- [4] K. Yoshida et al.: Assessmnet of Fitting Behavior and Shape Fixation by Yoshida Buckling Test-A Way to Overall Formability, Int. Symposium on New Aspects of Sheet Metal Forming, ISIJ, Tokyo, 1981, Proc., 125-148.
- [5] Z. Milosevic, C. Botte, F. Moussy: Simulation of the Buckling Phenomenon in Sheet Metal Forming by a Test on Flat Circular Specimens, Adv. Techn. of Plast., 1987, Proc., II, 1261-1266.
- [6] J. Cao, X. Wang, F.J. Mills: Characterization of Sheet Buckling Subjected to Controlled Boundary Constrains, Journ. of Manufac. Sc. and Eng., aug. 2002, 124, 493-501.
- [7] S. Holmberg, P. Thilderkvist: Influence of material properties and stamping conditions on the stiffness and static dent resistance of automotive panels, Materials and Design, 23, 2002, 681-691.
- [8] M. Stefanović, S. Aleksandrović: Pogodnost korišćenja limova povišene čvrstoće pri dubokom izvlačenju sa aspekta naknadnog ojačanja starenjem, XXII SPMJ, Ohrid, 1989, Zbornik radova, II, 101-107.
- [9] M. Stefanović, S. Aleksandrović, M. Milovanović, R. Jevtić: High strength steel for automotive panels and their formability, Metallurgy and New Materials Researches, VI/4, 1998, 29-42.