



**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING KRALJEVO**

UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
YUGOSLAVIA

**MAŠINSKI FAKULTET KRALJEVO**

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
JUGOSLAVIJA

---

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE  
MEĐUNARODNA NAUČNA KONFERENCIJA**

**HEAVY MACHINERY**

**HM '96**

**TEŠKA MAŠINOGRADNJA**

**TM '96**

**PROCEEDINGS  
ZBORNİK RADOVA**

**KRALJEVO  
JUNE 1996**

|  |       |
|--|-------|
| 4.25. Zeljković M., Pozar A., Simić R., I dr.<br>UPOREDNA ANALIZA STATIČKOG I DINAMIČKOG PONAŠANJA VITALNIH<br>ELEMENATA MAŠINA ALATKI PRIMENOM MKE PROGRAMSKOG SISTEMA..... | 4.149 |
| 4.26. Gemaljević M., Pilipović M.<br>CNC MAŠINE ZA OBRADU DRVETA, KONCEPT MODULARNE GRADNJE.....   | 4.155 |
| 4.27. Stojković M., Benedetić M., Gemaljević M.<br>RAZVOJ TEŠKIH OBRADNIH CENTARA U LOLA KORPORACIJ.....   | 4.160 |
| 4.28. Zeljković V.<br>POUZDANOST OSNOVNIH ELEMENATA MAŠINA ALATKI.....   | 4.165 |
| 4.29. Albijanić R., Bošković V., Lukić Lj.<br>MODALNA ANALIZA I STRUKTURALNA MODIFIKACIJA U OPTIMIZACIJI DINAMIČKOG<br>PONAŠANJA MAŠINSKIH SISTEMA.....                      | 4.171 |
| 4.30. Đorđević Lj., Popović P., Bogdanović Lj., Prolović V., Satelmeir K.<br>PROBLEMI TEMELJA MAŠINA U PROCESIMA OBRADJE DELOVA SA GRANIČNIM<br>REŽIMIMA OBRADJE.....        | 4.177 |
| 4.31. Zlatković M., Nojner V.<br>PROJEKTOVANJE I IZRADA KONUSNIH PAROVA SA CIKLO-PALOIDNIM OZUBLJENJEM.....  | 4.183 |
| 4.32. Jovanović B., Đorđević Lj., Temeljkovski D., Popović P<br>NOVE TEHNOLOGIJE I ODRŽIVI RAZVOJ.....   | 4.188 |
| 4.33. Radović S., Mečanin V.<br>SINTEZA BREGASTE PLOČE KAO POGONSKOG MEHANIZMA.....  | 4.194 |
| 4.34. Jovanović O.<br>PRIMENA BAZNE IZOLACIJE U MAŠINOGRADNJI.....   | 4.200 |
| 4.35. Miodragović G., Đorđević Lj., Krunic Lj.2<br>SISTEM ZA AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE<br>OBRADJE BRUŠENJEM NA RAČUNARU.....                                      | 4.205 |
| 4.36. Vujović V., Vilotić D., Plančak D., Trbojević I., Milutinović M.<br>TEHNOLOGIJA PLASTIČNOSTI KAO TEHNOLOGIJA<br>NAMENE U TEŠKOJ MAŠINOGRADNJI.....                     | 4.210 |
| 4.37. Maksić M.<br>PRILOG PRORAČUNU MOSTA ALATA ZA IZRADU ŠUPLJIH<br>PROFILA ISTOSMERNIM ISTISKIVANJEM.....  | 4.216 |
| 4.38. Milikić D., Pavlović M., Gostimirović D.<br>PRIMENA NEKONVENCIONALNIH POSTUPAKA OBRADJE<br>PRI IZRADI DIJAMANTSKIH MATRICA.....  | 4.222 |
| 4.39. Stefanović M., Aleksandrović S.<br>OBRADIVOST LIMOVA POVIŠENE ČVRSTOĆE.....  | 4.228 |
| 4.40. Temeljkovski D., Đorđević Lj., Punoševac Z., Popović P.<br>RAČUNARSKO-EKSPERIMENTALNA METODA ODREĐIVANJA<br>RADNOG DIJAGRAMA MEHANIČKIH PRESA.....                     | 4.234 |

## OBRADIVOST LIMOVA POVIŠENE ČVRSTOĆE

**Dr Milentije Stefanović, red. prof., Mašinski fakultet - Kragujevac**  
**Mr Srbislav Aleksandrović, asistent, Mašinski fakultet - Kragujevac**

### REZIME

Limovi od čelika povišene čvrstoće imaju izuzetnu primenu u metalnoj industriji. U radu se razmatra problematika korišćenja ovih limova u automobilskoj industriji, navode kategorije limova od čelika povišene čvrstoće, analiziraju ograničenja u primeni (posebno problemi defleksije), navode novi testovi za ocenu obradivosti. Za jednu vrstu ovih limova daju se eksperimentalni rezultati, koji obuhvataju standardne i posebne parametre obradivosti, pokazatelje granične deformabilnosti i sl.

## FORMABILITY OF HIGH STRENGTH STEEL SHEETS

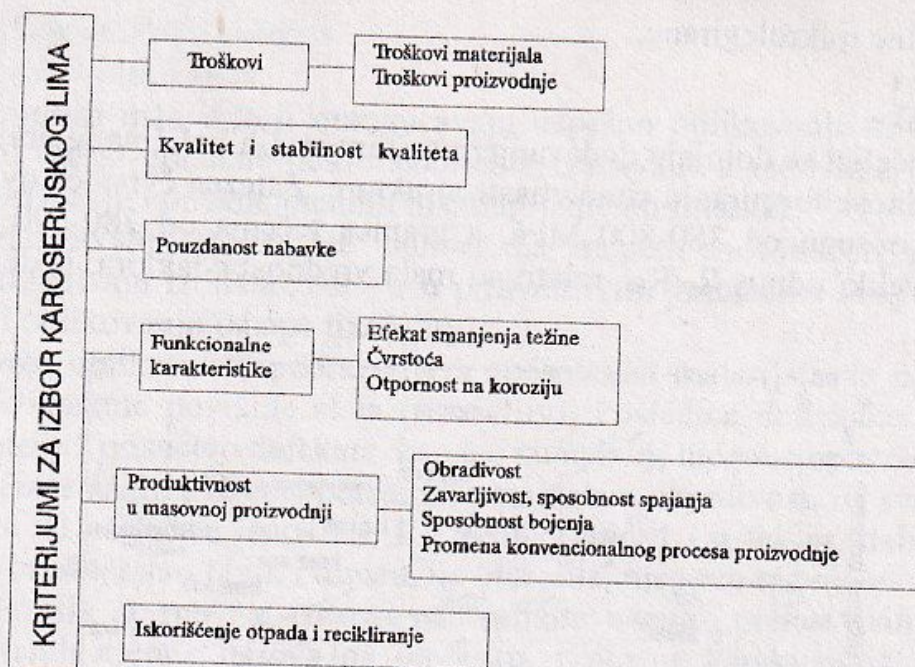
### ABSTRACT

Thin sheets made of high strength steels have exceptional application in metal working industry. In this paper are considered problems of application of these sheets in car manufacturing industry, the high strength sheets categories are enumerated, analyzed are restrictions in application (especially deflection problems), and presented are tests for formability evaluation. For a particular type of these sheets are also presented experimental results, which contain standard and special parameters of formability, forming limit indicators, etc.

### 1. UVOD

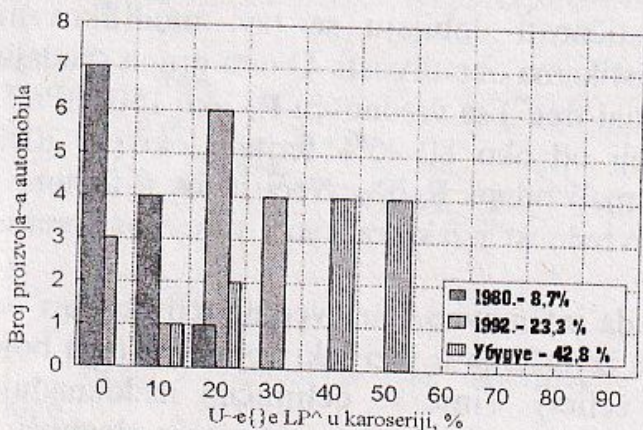
Čelični limovi povišene čvrstoće (LPČ) imaju izuzetnu primenu u mašingradnji, s obzirom da obezbeđuju visoku krutost uz smanjenje težine konstrukcije. Poslednjih godina LPČ se sve više primenjuju za dobijanje karoserijskih delova putničkih automobila; takođe, u cilju smanjenja težine automobila, sve više se koriste legure aluminijuma, kompoziti i plastične mase, legure titana. Za smanjenje vibracija upotrebljavaju se sendvič-limovi, za smanjenje korozije limovi sa prevlakama i sl. Svaki od ovih materijala ima prednosti i nedostatke. Na sl.1 pokazan je fundamentalni koncept standardne selekcije materijala za delove karoserije automobila [1].

LPČ limovi omogućavaju izradu karoserija automobila povišene krutosti, manje težine sa zadovoljavajućim performansama standardnih testova izdržljivosti (akumuliranje energije pri sudaru, oscilatorna udobnost i sl.). Prva primena LPČ je počela sedamdesetih godina, kao odziv na energetske krize i neprekidno je rasla (sl.2)

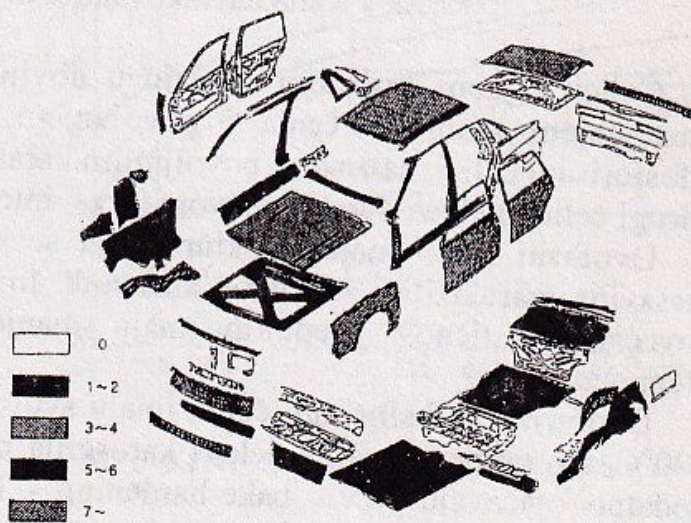


Sl. 1 Standardna selekcija materijala za karoserije automobila

posebno u japanskim fabrikama automobila. Procenjuje se, prema [1] da će sadašnje učešće otpresaka od LPČ od oko 20% porasti u budućnosti na blizu 43%. Pri tome se težina konstrukcije smanjuje za 10 do 20%.



Sl. Učešće LPČ u karoseriji automobila [1]



Sl.3 Primena LPČ pri izradi karoserije automobila [1]

U odnosu na klasične niskougljenične limove za duboko izvlačenje, ovi limovi imaju nepovoljnije karakteristike obrađivosti i višu cenu za istu težinu. Koriste se za dobijanje delova karoserije koji ne zahtevaju visok stepen deformacije, prema sl. 3.

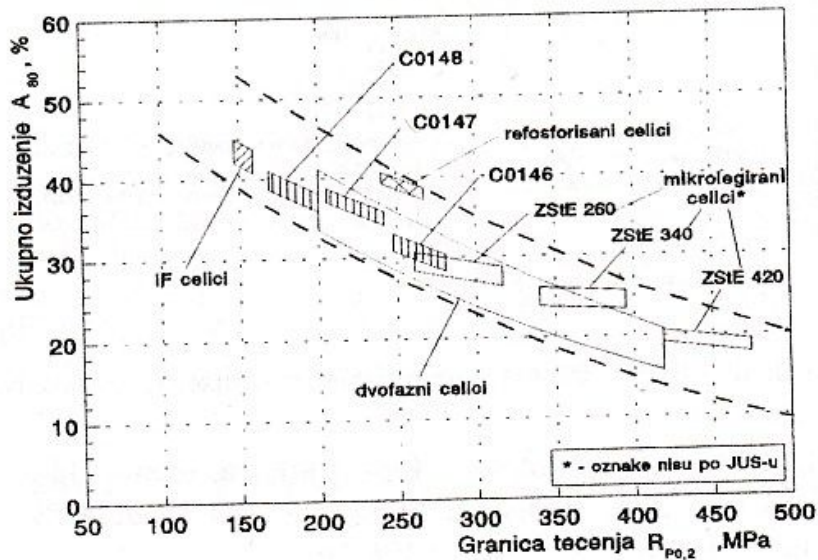
## 2. OGRANIČENJA I TEHNOLOŠKE MOGUĆNOSTI PRI KORIŠĆENJU LPČ

### 2.1 Osnovne vrste LPČ

Uobičajena podela ovih čelika je na:

- konvencionalne mikrolegirane,
- refosforisane i
- dvofazne čelike.

Mikrolegirani čelici se dobijaju dodavanjem sasvim malih količina legirajućih elemenata Nb i Ti, koji doprinose formiranju sitnozrnaste strukture. Zatezna čvrstoća ovih materijala se kreće u širokom opsegu od 380-800 MPa, a granica tečenja od 280-500 MPa. Osnovni nedostatak je preveliki odnos  $R_p/R_M$ , relativno mala vrednost r-faktora, nedovoljna vrednost n faktora.



Sl. 4 Karakteristike limova koji se koriste za karoseriju vozila

Čelici legirani fosforom spadaju u novije materijale, sa količinom fosfora do 0,1%. Smanjenjem granice tečenja i povećanjem plastičnosti dobijaju se tzv. modifikovani refosforisani čelici, sa znatno povoljnijim karakteristikama obradivosti. U ovu grupu spadaju i drugi čelici na bazi čvrstih rastvora (tzv. "interstitial free") sa vrednošću  $R_p$  oko 150 MPa.

Dvofazni LPČ imaju strukturu koja se sastoji od oko 80-90% ferita i oko 10-20% mešavine martenzita i zaostalog austenita. Imaju mali odnos  $R_p/R_M$ , veći iznos n-faktora i povećanu plastičnost. Međutim, imaju smanjenu vrednost r-faktora kao i otpornost prema ulegnuću.

Dvofazni i refosforisani čelici imaju svojstvo da intenzivno stare već na temperaturi od 200°C, što omogućava da delovi karoserija posle izvlačenja u fazi lakiranja i pečenja boje dodatno ojačavaju (tzv. "bake-hardening" - BH čelici). Time se delimično nadoknađuje osnovni nedostatak ovih čelika - mala granica tečenja i smanjena otpornost prema ulegnuću.

Zavisnost relativnog izduženja pri prekidu i granice tečenja za različite limove pokazana je na sl. 4 [2].

## 2.2 Problemi oblikovanja i defleksije

Ograničavajuće faktore obradivosti limova namenjenih izradi većih delova, na pr. elemenata karoserija automobila, moguće je sistematski prikazati kao skup sledećih svojstava, od kojih se poslednja dva odnose na pojavu defleksije [3]:

- otpornost prema razaranju,

- sposobnost zadržavanja oblika i
- prilagodljivost obliku alata.

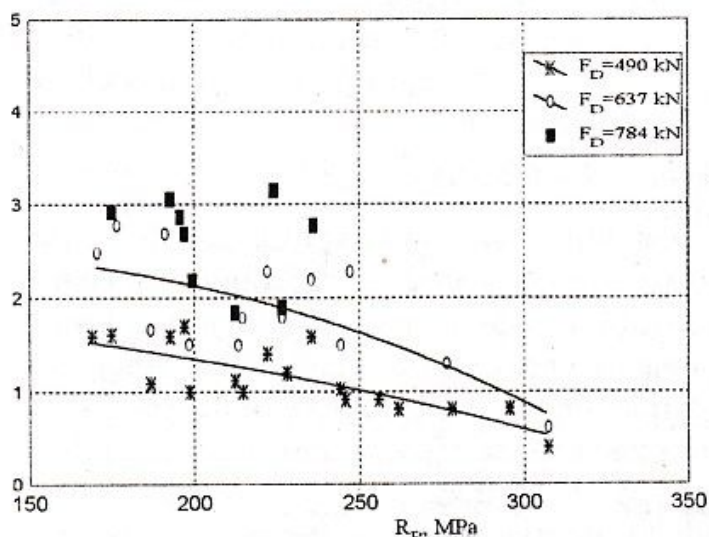
Izučavanje opštih uslova koji omogućavaju uspešno oblikovanje do granice razaranja, obuhvata široku oblast granične deformabilnosti, izučavane u radovima brojnih istraživača (posebno pri korišćenju konvencionalnih niskougljeničnih limova).

Svojtvo zadržavanja oblika se odnosi na stepen sposobnosti materijala da po oblikovanju i uklanjanju iz alata zadrži u prihvatljivim granicama onaj oblik i dimenzije, koje je imao pri oblikovanju (shape fixability).

Prilagodljivost obliku alata podrazumeva sposobnost materijala da u toku oblikovanja naleže na sve kontaktne površine alata (fittability). Posledice defleksije su odstupanja od osnovne geometrije i prisustvo defekata, kao što su nabori, ulegnuća površine i sl.

Postoje precizne analize uticaja pojedinih parametara obradivosti na svako od nabrojanih svojstava [1]; to su najvažnije iznos  $R_p$ ,  $R_M$ , izduženje,  $r$  i  $n$  faktor, debljina lima, modul elastičnosti. Od značaja su i oblik i dimenzije otpreska, njegovo razvijeno stanje, sila držača.

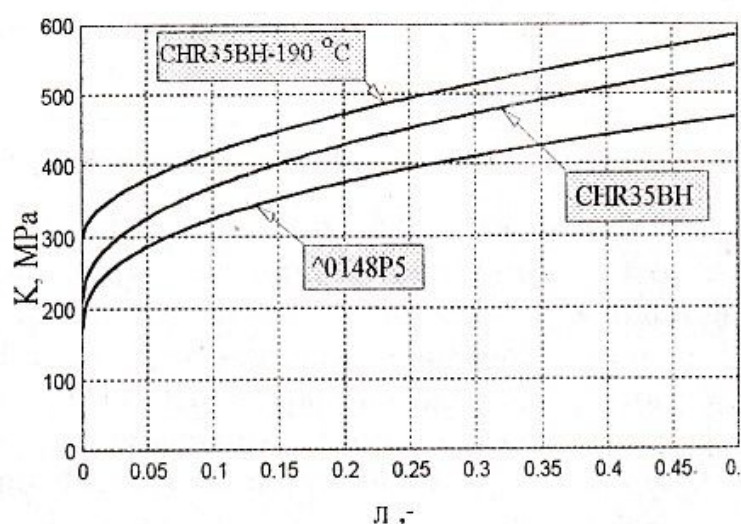
Stepen defleksije se može izraziti na različite načine: preko visine nabora, odnosa zadatih i ostvarenih mera i uglova na otpresku, promene karakterističnog geometrijskog parametra sa hodom izvlakača i sl. Osnovne tehnološke mere za smanjenje defleksije su, uglavnom, sledeće: ostvarivanje dodatnog zatezanja u kritičnim zonama, izmena pravca teženja metala, optimizacija oblika i veličine razvijenog stanja, primena zateznih rebara, izmena geometrije izvlakača i šeme podmazivanja i sl.



Sl. 5 Zavisnost stepena deformacije od nivoa teženja [4]

Defleksija se smanjuje ostvarivanjem većih stepena deformacije u što većem području otpreska, kako bi dostignuti naponi bili minimalno iznad granice teženja. Na pr. sl. 5 daje zavisnost realizovanog stepena deformacije na površini otpreska vrata putničkog automobila u funkciji granice teženja i sile držača [4].

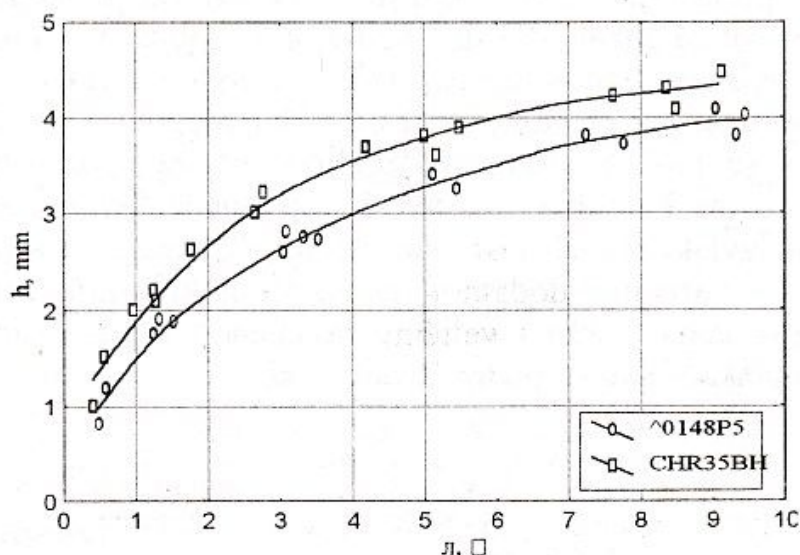
Povećanjem sile držača, odnosno specifičnog pritiska na obodu komada, ostvaruje se dodatno zatezanje i smanjuje defleksija površine otpreska, ali se pri tome intenzivira pojava adhezionog habanja (tzv. "galling" procesi), što može dovesti do brzog oštećenja alata. Generalno posmatrano, porast žvrstće bi trebalo da dovede do ostvarivanja većih graničnih stepena izvlačenja, međutim, s obzirom da je u takvim uslovima neophodno povećati silu držanja na obodu, kako bi se izbegli nabori, stepen izvlačenja realno opada.



Sl. 6 Krive ojažanja za različite materijale

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

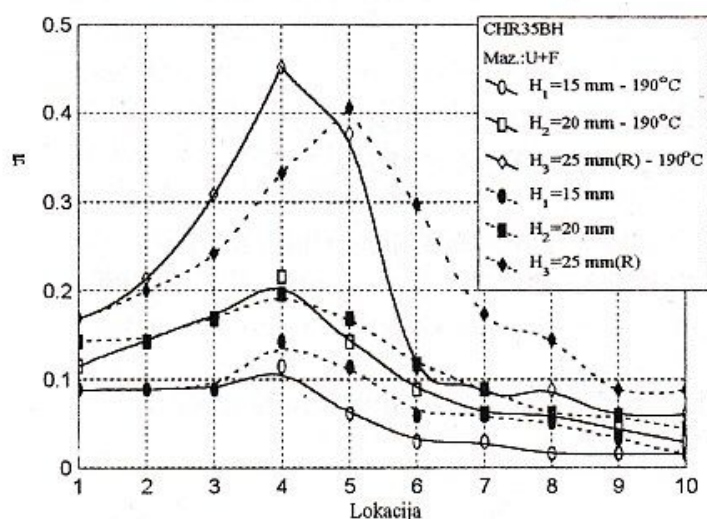
Limovi koji starenjem ojačavaju imaju izuzetne pogodnosti u odnosu na ostale materijale iz klase LPE, s obzirom da zadržavaju dobra svojstva plastičnosti u toku obrade. Ovde se navode neki od rezultata prethodnih ispitivanja, realizovanih pri izužavanju mogućnosti izrade i ugradnje u karoserije automobila iz programa ZASTAVA - Kragujevac. Na sl. 6 pokazane su krive ojačanja za uobičajen niskouglenični lim iz klase E0148 P5, kao i krive za želični lim iz klase BH pre i posle starenja. Prema preporukama proizvođača [5], u toku i posle lakiranja na temperaturi od 190°C u trajanju od 20 min. granica teženja se povećava i do 20%.



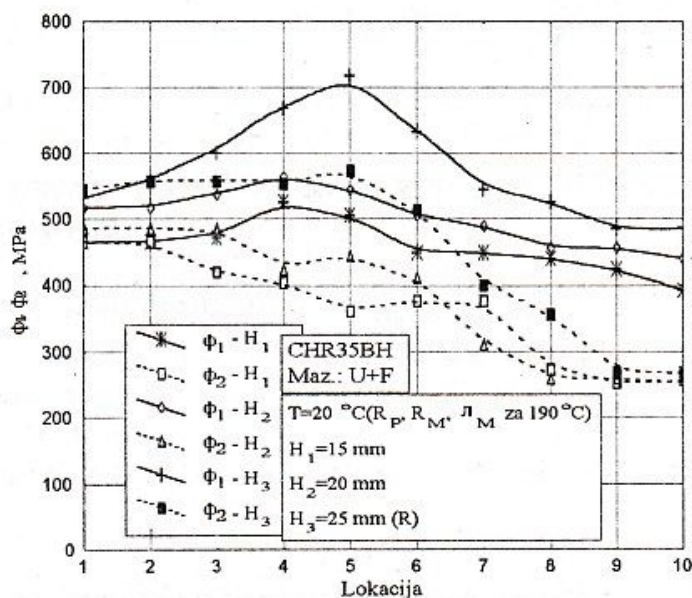
Sl.7 Zavisnost visine nabora od deformacije

Sklonost ka defleksiji se u laboratorijskim uslovima najčešće ispituje na modelima, kojima se simulira nehomogeno naponsko-deformaciono stanje u pojedinim oblastima komada koji se izvlači. Klasično ispitivanje u ovom smislu je tzv. Yoshida-test, koji se sastoji od jednoosnog zatezanja kvadratne ili trougaone epruvete od lima; visina nabora koji se formira u pravcu zatezanja predstavlja pokazatelj sklonosti materijala ka defleksiji [6]. Na sl. 7 pokazana je uporedna promena visine nabora za različite stepene zatezanja i dva lima. Dijagonalno je zatezana kvadratna epruveta dimenzija 90x90 mm.

Naknadna ispitivanja su vršena na komadima dobijanim razvlačenjem polusfernim izvlačačem prečnika 50 mm, u uslovima kada je obod razvijenog stanja žvrsto pritegnut i ne deformiše se. Na sl. 8 i 9 pokazane su distribucije glavnih deformacija i napona za ispitivane materijale i uslove pre i posle starenja. Zapa a se nešto ravnomernija raspodela deformacija  $\varphi_1$  kod komada pre starenja. Raspodela napona je dobijena na osnovu distribucije deformacija za negrejan komad i krive ojačanja grejanog lima (radi ostvarivanja efekta starenja). Na ovaj način se pojednostavljuje ispitivanje LPE jer nije potrebno svaku epruvetu grejati, nego samo odrediti krivu ojačanja lima posle zagrevanja t.j. starenja.



Sl.8 Distribucija deformacija za LPE



Sl.9 Distribucija glavnih normalnih napona

## 4. ZAKLJUČAK

Čelični limovi povišene čvrstoće nalaze izuzetnu primenu u automobilskoj industriji, sa indeksima stalnog porasta, posebno u industrijski razvijenim državama. Zbog smanjenja obradivosti u najvećoj meri se koriste za dobijanje delova sa niskim stepenom izvlačenja i jednostavnije geometrije. LPE poslednjih generacija imaju antikorozijske prevlake, najčešće na bazi cinka i aluminijuma.

Osnovne prednosti korišćenja LPE su: smanjenje težine karoserije i automobila, povećanje pasivne bezbednosti, smanjenje cene limova sa smanjenjem debljine, poboljšanje otpornosti na ulegnuće, podizanje krutosti karoserije u testovima razaranja. Nedostaci su: visoka zavisnost procesa obrade i dobijenih performansi od uslova na površini držanja, pojave defleksije, "galling" procesi, intenzivno habanje alata, često nedovoljna deformaciona sila mašine. S obzirom na tehnološke razloge i otpornost na ulegnuće, minimalna debljina LPE koja se efikasno može koristiti iznosi 0,6 do 0,65 mm.

LPE iz klase BH, koji ojažavaju starenjem u procesu izrade karoserije, imaju pogodne karakteristike obradivosti pri izvlačenju, i zadovoljavajući iznos ojažanja posle starenja (blizu 15%). Za razliku od ostalih vrsta LPE, ne zahtevaju tehnološke intervencije na alatu, pripremi razvijenog stanja i sl.

## 5. LITERATURA

- [1] H. Hayashi, T. Nakagawa, Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels, Journal of Mat. Proc. Technology, 46(1994) 455-487.
- [2] P.M. Wollrab, M. Streidl, Application of high strength steel sheets in autobody pressing-chances and limitation, 14<sup>th</sup> Bienn. Congress IDDRG, Köln, 1986., Proceed. 149-158.
- [3] B. Devedija, Okolnosti koje otvaraju šire korišćenje limova velike čvrstoće i upućuju na nova tehnološka rešenja, XIX SPMJ, Kragujevac, 1985., Zbornik radova, 142-150.
- [4] S. Sato ..., Required properties of high str. steel for autobody parts, XI B. C. IDDRG, Metz, 1980.
- [5] Kawasaki, Katalog, Cold rolled high strength steel, KSCo.
- [6] M. Stefanovića, S. Aleksandrovića, Pogodnost korišćenja limova povišene čvrstoće pri dubokom izvlačenju sa aspekta naknadnog ojažanja starenjem, XXII SPMJ, Ohrid, 1989. Zb. r. II, 101-107.