

# HIDROFORMING TEHNOLOGIJA U SLUŽBI PROJEKTOVANJA I PROIZVODNJE VOZILA

**prof. dr Branko Vasić**  
**Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu**

**dipl. ing Nada Stanojević,**  
**Institut za istraživanja i projektovanja u privredi - iipp**

Višegodišnje iskustvo stečeno na projektu inovacije elemenata noseće strukture Mercedes 500SL, u saradnji sa kompanijom DaimlerChrysler, u čijem interesu se projekat i realizuje, omogućilo je autorima ovog teksta da se detaljnije upoznaju sa jednom od metoda čiji se doprinos i pun razvoj tek očekuje. Saznanja do kojih se došlo u okvirima projekta, autori nisu još u mogućnosti da iznesu, zbog obaveze o tajnosti rada, ali smatraju da je upoznavanje šire javnosti sa mogućnostima same metode od velikog značaja.

*Ključne reči: hidroforming, ultra laki čelični auto delovi, redukcija broja komponenti*

Hidroforming, koji se ponekad naziva fluid forming jer podrazumeva oblikovanje fluidom ili rubber diaphragm forming (oblikovanje gumene membrane), je razvijen krajem četrdesetih i početkom pedesetih godina dvadesetog veka, kao odgovor na potrebu za jeftinijom metodom proizvodnje delova dubokim izvlačenjem u relativno malim količinama. Danas, ovaj proces ima nekoliko grana, a najznačajnije su: cevni hidroforming i hidroforming limova. Međutim, iako postoje razni vidovi hidroforminga, osnovni princip ostaje isti: upotreba pritiska fluida za oblikovanje delova.

Hidroforming se u Evropi koristi od ranih osamdesetih, a u Severnoj Americi je prihvaćen ranih devedesetih. Verson Allsteel Press Company, Chicago, Illinois, nabavila je 1975. liniju hidroforming presa i započela agresivni program modernizacije opreme. Od tada su brzina i mogućnosti oblikovanja mnogo napredovali.

Hidroforming metalnih delova je široko korišćen proces u nekoliko grana industrije. Od osamdesetih godina, kada je većinom korišćen u automobilskoj industriji (slika 1) razgranao se i danas nalazi svoju primenu i kod motorcikala, bicikala, aparata i delova vodovodnih cevi. /6/

Hidroforming delova od limova koristi se u nekoliko grana industrije. On može biti prihvatljiva alternativa standardnom dubokom izvlačenju za male i srednje serije proizvodnje. Pogodan je za oblikovanje uobičajenih metala kao što

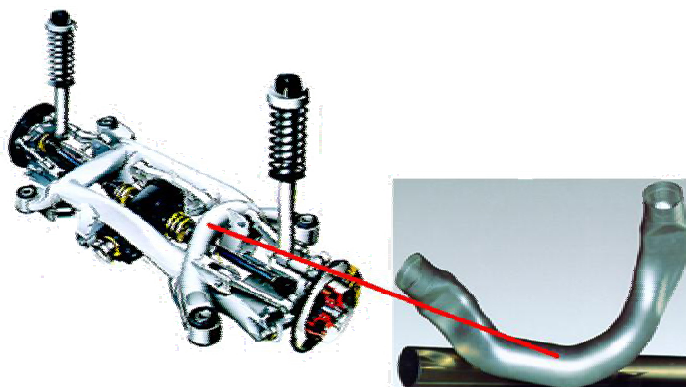
su čelik, aluminijum, titanijum i bakar. U poređenju sa standardnim oblikovanjem izvlačenjem, obično se formiraju nesimetrični i nepravilni oblici sa odličnim kvalitetom završne obrade i poboljšanom ravnomernošću debljine.

Prednosti hidroforminga limova su:

- Proizvodi imaju visok kvalitet spoljašnjih površina;
- Debljina odlivka može biti promenjena bez promene alata;
- Taylor welded blanks se mogu oblikovati bez promene alata;
- Female die fabrication nije potrebna, što smanjuje troškove alata.

## CEVNI HIDROFORMING

Tokom proteklih desetak godina neprestano



**Slika 1. Zadnja osovina od aluminijuma, (serija 500 BMW, 1997)**

raste pažnja usmerena ka hidroformingu. Iako je interesovanje za cevni hidroforming široko rasprostranjeno, velika većina njegove široke primene je u automobilskoj industriji. 1990. godine je Chrysler Korporacija predstavila prvi high - volume hidroformirani deo na severno - američkom automobilskom tržištu - gredu instrument table na svom minivenu. Danas se hidroformirane komponente mogu naći na automobilima u velikom broju (Tabela 1).

<b>Body Systems</b>	<b>Chassis Systems</b>	<b>Steering &amp; Suspension</b>	<b>Engine &amp; Driveline</b>
Instrument Panel Beams	Front Engine Cradles	Control Arms	Exhaust Manifolds
Radiator Enclosures	Rear Cradles	Trailing Links	Camshafts
Seat Frames	Ladder Frames	Steering Columns	Driven Axle Housing
Side Roof Rails	Hitch Bars		
Roof Bows	Bumper Beams		
Body Side Rails			
Roll Over bars			

**Tabela 1. Hidroformirane komponente automobila**

Procenjuje se da je pre samo 15 godina manje od 10 procenata čelika u tipičnom porodičnom vozilu proizvedenom u Severnoj Americi bilo cevnog oblika. Danas se taj broj kreće od 15 do 16 procenata, u standardnim i teretnim vozilima srednje veličine, SUV- terenskim vozilima (sport utility vehicles), pickup vozilima i automobilima sa pogonom pozadi.

### **OPIS PROCESA**

Cevni hidroforming je proces oblikovanja šupljih delova primenom unutrašnjeg hidrauličkog pritiska koji izaziva plastičnu deformaciju cevnog čeličnog odlivka koji zauzima oblik šupljine kalupa. Ovaj proces se koristi za proizvodnju kompleksnih oblika, obično dužine od 1m do 3m i prečnika od 25mm do 150mm.

Napredak kompjuterske kontrole i hidrauličkih sistema sa visokim pritiskom, omogućio je da proces cevnog hidroforminga postane metod za masovnu proizvodnju. /3/

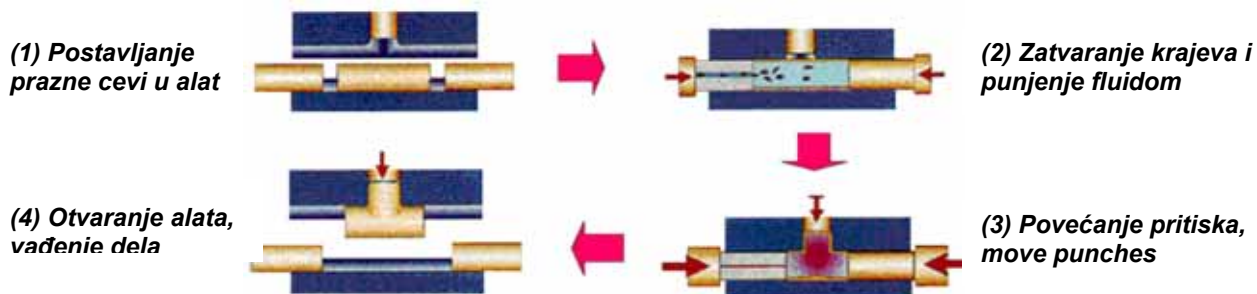
Moderne prese imaju nezavisnu kontrolu aksijalnog pomeranja, unutrašnjeg pritiska i poprečnog pritiska što dozvoljava proizvodnju sve kompleksnijih delova upotrebom procesa cevnog hidroforminga. Naglasak na projektovanju vozila lakih konstrukcija dodatno povećava zahteve za delovima koji su proizvedeni ovom tehnologijom. Redosled operacija pri tipičnom procesu hidroforminga prikazan je na slici 2. Cev je ispunjena emulzijom voda-ulje. Unutrašnji pritisak fluida se povećava po zatvaranju kalupa,

čime se materijal prisiljava u zonu deformacije. Za vreme ovog procesa, istovremeno se kontrolišu aksijalno pomeranje i unutrašnji pritisak da bi se poboljšale mogućnosti oblikovanja materijala.

U drugim verzijama procesa hidroforminga, nizak pritisak fluida se može obezbediti prilikom zatvaranja kalupa, pri čemu se materijal gura u uglove kalupa a mali radijusi se mogu formirati sa manje istanjenja materijala i sa manjim unutrašnjim pritiscima.

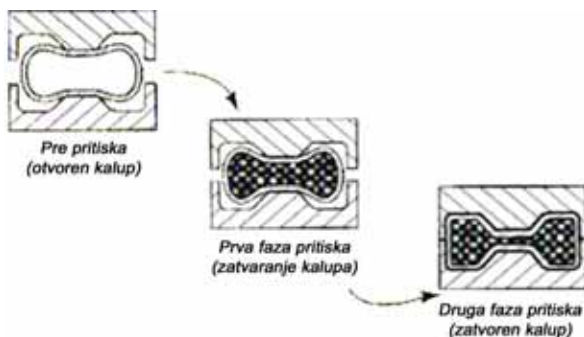
U drugim verzijama procesa hidroforminga, nizak pritisak fluida se može obezbediti prilikom zatvaranja kalupa, pri čemu se materijal gura u uglove kalupa a mali radijusi se mogu formirati sa manje istanjenja materijala i sa manjim unutrašnjim pritiscima.

Poslednje vesti koje dolaze iz hidroforming industrije odnose se na proces koji se naziva "aktivni hidroforming". Aktivni hidroforming obuhvata sve prednosti hidroforminga visokog i niskog pritiska kombinujući ih u jedan proces. /5/



**Slika 2. Redosled operacija pri tipičnom procesu hidroforminga**

Deo se postavlja u alat ali, pre nego što se zatvori za početak ciklusa na njega deluje pritisak fluida. Deo se širi, istovremeno zadržavajući, ravnomernu raspodelu debljine. Tek tada se presa uključuje i deo se oblikuje. Formirani deo može imati kompleksan poprečni presek i ravnomernu debljinu (Slika 3)



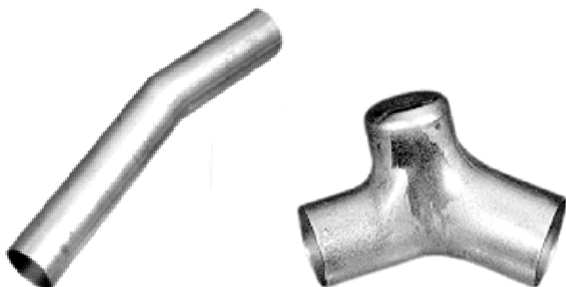
**Slika 3. Redosled pritiska pri hidroformingu**

Da bi hidroformirani deo smatrali proizvodom, odgovarajuća pažnja se mora posvetiti i procesima pre i posle hidroforminga kako bi iskoristili sve njegove prednosti.

Neke od stvari koje moraju biti pripremljene obuhvataju:

- pripremanje cevi (izbor materijala, kvalitet priprema);
- prethodno oblikovanje (slike 4 i 5) i metod proizvodnje;
- projektovanje delova za hidroforming;
- zavarivanje i spajanje hidroformiranih delova (montiranje i sklapanje);
- performanse udara i čvrstoća spoja;
- izbor maziva koja se neće promeniti na visokim pritiscima;
- ubrzan razvoj procesa. /1/

Procesi posle, mogu biti podešavanje krajeva, oblikovanje krajeva, rezanje rupa/žljebova itd. /2/



**Slika 4. Prethodno savijena cev**

## PREDNOSTI I MANE

Cevni hidroforming nudi niz prednosti u karakteristikama delova i toku samog procesa u odnosu na standardne postupke proizvodnje presovanjem i zavarivanjem. Ove prednosti obuhvataju:

- spajanje delova (dva ili više delova sklopa, presovani i otporno zavareni mogu biti proizvedeni iz šupljeg dela u jednoj operaciji);
- smanjenje mase zbog veće efikasnosti projektovanja sklopova i kontrole debljine zidova;
- poboljšanje čvrstoće sklopa i krutosti;
- manju cenu alata zbog manjeg broja delova;
- manji broj dodatnih (pomoćnih) operacija (nije potrebno zavarivanje delova, a rupe se mogu probušiti tokom samog procesa hidroforminga);
- usko odstupanje dimenzija i malo pomeranje ;
- smanjenu količinu otpadaka .

1. Prethodno savijena cev
2. Izlomljena cev
3. Hidroformirani deo



**Slika 5. Prethodno oblikovana cev**

Proizvođači su uočili značajnu uštedu u troškovima, kako u ceni alata tako i u ceni radne snage. Poboljšan tok procesa dolazi zbog smanjenog trošenja kalupa jer se oblikovanje ne vrši metodom metal na metal već metodom metal fluid. Cena alata je smanjena za 40% zato što se nabavlja samo jedna polovina kalupa (druga polovina je fluid). Montiranje alata je brzo i jednostavno.

Hidroformingom se mogu proizvoditi cevasti delovi širokog spektra geometrije i oblika poprečnih preseka, koji mogu varirati kroz celu dužinu dela. Delovi dobijeni hidroformingom mogu uspešno zameniti delove dobijene standardnim postupcima (zavarene delove dobijene presovanjem). Broj delova u automobilu može biti smanjen zamenom dva dela, dobijena presovanjem i zavarivanjem, sa jednim delom dobijenim hidroformingom bez zavarivanja.

Sa smanjenjem broja delova u automobilu smanjuje se i njegova masa kao i cena njegovog sklapanja.

Delovi dobijeni cevnom hidroformingom zadržavaju svoj strukturnu celovitost; debljina zidova je konstantna kroz ceo deo. Čvrstoća materijala gotovog dela je veća zbog plastičnih deformacija koje se dešavaju tokom procesa. Hidroforming stvara efekat očvršćivanja koristeći pritisak fluida za istezanje odlivka u svim pravcima. Ovo plastično izduženje očvršćuje odlivak podjednako.

Procesom hidroforminga se takođe gubi mnogo manje metala nego pri presovanju. Zbog toga je materijal mnogo efikasnije iskorišćen. Prednost hidroforminga nije samo u tome što može da formira delove cilindričnog i kutijastog oblika, već i u tome što može da stvori delove sa oštrim uglovima, oštrim složenim krivinama i druge vrste oblika. Hidroforming nam omogućuje da zadržimo originalnu završnu obradu materijala (kvalitet spoljašnjih površina hidroformiranog dela, u mnogim slučajevima, eliminiše potrebu za daljom obradom/poliranjem, tako da je uočena ušteda i od 90 procenata u troškovima završne obrade) sa malim ili nikakvim deformacijama, boranjima i minimalnim istanjenjem (hidroforming omogućava blisku kontrolu parametara - pritisak fluida i podmazivanje - radi sprečavanja boranja i trošenja delova).

Još jedna prednost hidroforminga je i rastuće tržište. Na konkursu GM-a za lake okvire kamiona, kompanija Magna je pobedila u nadmetanju sa tradicionalnim tehnikama oblikovanja i tradicionalnim snabdevačima. Novost nije to što je GM promenio snabdevača već to što je promenio sam proces. To što su prihvatili relativno novu tehnologiju na tako kritičnom delu u proizvodnji kamiona pokazuje koliko su bili impresionirani sa Magninim procesom hidroforminga. /4/

Cevni hidroforming takođe ima i neke mane uključujući: spor ciklus, skupu opremu i manjak šireg poznavanja konstrukcije procesa i alata. Jedan od izazova oko koga se većina stručnjaka slaže je činjenica da je potrebno početi sa novim dizajnima, pošto se tehnologija hidroforminga ne uklapa lako u postojeći dizajn delova. Hidroforming se ne isplati u malim serijama, već je potreban veći broj delova da bi se pokrili troškovi alata. Cena sirovog materijala potrebnog za pripremu čeličnih cevi je takođe značajna, naročito u poređenju sa limovima korišćenim kod presovanja.

Postoji, takođe, nekoliko specifičnih nedostataka vezanih direktno za sam proces hidroforminga. Probušeni otvori imaju male nedostatke oko mesta udara. Za cevno oblikovanje cev mora da zauzima oblik koji je podesan za tube bender. Delovi proizvedeni hidroformingom, takođe, zahtevaju posebne tehnike zavarivanja.

Zbog svega ovoga, izvodljivost (podesnost) hidroforminga prema standardnom presovanju i zavarivanju treba da se ispita (i ekonomski i tehnički) za svaki deo posebno. Da bi smanjili period ciklusa potrebno je da pomoćne operacije (kao što su bušenje, savijanje itd.) budu integrisane u sam proces hidroforminga. Kompjuterska simulacija se može široko koristiti da bi se proces optimizovao. /2/

Rezultati koje je kompanija Volvo dobila upoređivanjem strukture od aluminijuma, izrađene hidroformingom (Slika 6), sa standardnom čeličnom konstrukcijom su:

- 50% manja masa;
- 45% manje delova (manje delova, manje spojeva);
- 45% manje varova - uza tolerancija.



**Slika 6. Volvo koncept strukture od aluminijuma izrađene hidroformingom,**

U cilju sagledavanja prednosti koje hidroforming unosi u proces projektovanja i proizvodnje, prikazaćemo podatke koji su dobijeni poređenjem, sa prosečnim rezultatima testova, kod 18 različitih automobila koji sublimiraju različite zahteve krajnjih korisnika.

Sledeći modeli poslužili su kao osnov za benchmarking:

Audi A6	Mercedes E320	Porsche Boxster
BMW 528i	Mitsubishi Eclipse	Renault Laguna
Cadillac Sedan Deville	Nissan Sentra	Saturn LS
Chevrolet Malibu	Ford Probe	Toyota Camry
Dodge Stratus	Ford Taurus	VW Golf
Ford Contour	Honda Accord	VW Passat

### Strukturne performanse

Poređenje rezultata elemenata dobijenih hidroformingom (ULSAB - The Ultra Light Steel Auto Body) i elemenata iz grupe za poređenje predstavljeno je u Tabeli 2, a pokazalo je da delovi dobijeni ovom tehnologijom imaju više-struko bolje strukturne performanse uz značajnu redukciju mase.

	<b>ULSAB struktura</b>	<b>Benchmark struktura</b>	<b>Buduća preporuka</b>
<b>Performanse</b>			
Torsion (Nm/deg)	20,800	11,531	13,000
Bending (N/mm)	18,100	11,902	12,200
1 <sup>st</sup> body structure mode (Hz)	60	38	40
Mass ( kg)	203*	271	250

**Tabela 2. Poređenje rezultata elemenata dobijenih hidroformingom i elemenata iz grupe za poređenje; \* dozvoljeni opseg odstupanja 1%**

Ostvarene Crash simulacije predstavile su izvanredne osobine ULSAB pri različitim

testovima (AMS frontal impact, rear moving barrier, European side impact i roof crush) u kojima su ostvarene brzine udara i do 17% prevazilazile prag propisane bezbednosti. AMS frontal impact je širom sveta prihvaćen kao jedan od najozbiljnijih testova koji se sprovode danas.

Upoređenje mase i troškova za svaki projektovani element dato je u tabelama 3 i 4.

Iz svega predočenog, može se zaključiti da se efektivnost u pogledu redukcije mase, poboljšanja strukturnih osobina elemenata konstrukcije, smanjenja broja elemenata na vozilu, smanjenja potrebnih operacija sklapanja i otpadnog materijala sigurno povećava, dok nedostaci u pogledu viših troškova procesa hidroforminga ne mogu značajnije uticati na njeno smanjenje, pogotovo u poređenju sa svim prednostima, pošto se očekuje da će sa širom primenom ove tehnologije i njeni troškovi opasti.

### PRIMENE

Osnovna primena cevnog hidroforminga se može naći u automobilskoj i avionskoj industriji kao i u proizvodnji delova koji se koriste u zdravstvu. /5/

	<b>Benchmark (kg/m<sup>2</sup>)</b>		<b>Target (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>ULSAC</b>	
	<b>Range</b>	<b>Average</b>		<b>(kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kg)</b>
Door - Roof Integrated	17.0-23.4	19.7	15.5	15.1	13.2
Door - Frame Integrated				15.5	13.2
Door - Frameless				14.3	11.5
Hood - Conventional	8.8 – 14.2	11.5	8.0	7.9	13.3
Hood - Grill Integrated				7.9	13.7
Hood - Conventional				8.5	14.3
Hood - Grill Integrated				8.4	14.7
Decklid - Conventional	8.9 – 16.1	11.2	8.0	8.0	9.8
Decklid - Conventional				8.6	10.6
Hatch - Tube Hydroformed	12.5 – 15.2	13.9	11.3	10.3	6.7
Hatch - Tailored Blank				10.6	6.9
Hatch - Hydroformed Ring				10.9	7.1
Hatch - Sheet Hydroformed				9.5	6.2

**Tabela 3. Upoređenje mase**

	<i>Baseline</i>	<i>ULSAC</i>
Door - Roof Integrated	67	67
Door - Frame Integrated		72
Door - Frameless		65
Hood - Conventional	40	44
Hood - Grill Integrated	46	52
Hood - Conventional	40	40
Hood - Grill Integrated	46	46
Decklid - Conventional	31	36
Decklid - Conventional	31	33
Hatch -Tube Hydroformed	29	36
Hatch -Tailored Blank	29	33

**Tabela 4. Upoređenje troškova u US \$**

Primena kod automobila se može videti na delovima izduvnog sistema, bregastim vratilima, okvirima hladnjaka, prednjim i zadnjim osovinama, osloncima motora, kolenastim vratilima, okvirima sedišta, delovima karoserije i space frame. Neke od vrlo dobro poznatih primena su: BMW zadnja osovina serije 500, Mercedes Benz višestruki izduvni sistem, Buick Park Avenue - unutrašnja krovna šina i oslanjanje motora, Corvette donje šine, krovni luk i greda instrument table.

Ali glavna primena, koja je omogućila da cevni hidroforming doživi veliki uspeh, je šasija automobila – okvir koji drži sve osnovne delove na mestu (slike 7 i 8). Iako se dizajn šasija menja, svaka se pravi na osnovu istog kriterijuma – da obezbedi maksimalnu krutost, stabilnost dimenzija, vek zamora i otpornost na udar sa minimalnom masom i cenom.

Inženjeri automobilskih šasija su prihvatili cevni hidroforming jer im je on omogućio da njihove konstrukcije budu efektivnije.



**Slika 7. Šasija lakog kamiona od hidroformiranih komponenti**



**Slika 8. Volvo koncept šasije**

Neki od strukturnih delova u konstrukciji automobila prikazani su na slici 9.

Vari-Form, 1988



**Slika 9. Strukturni delovi**

- |                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| <b>A. Krovni nosači</b>            | <b>D. Oslanjanje motora</b> |
| <b>B. Oslonac instrument table</b> | <b>E. Krovne šine</b>       |
| <b>C. Nosač hladnjaka</b>          | <b>F. Šine okvira</b>       |

Delovi izduva izrađeni ovom tehnologijom odlikuju se:

- malom težinom;
- smanjenjem broja delova;
- smanjenjem gubitka unutrašnjeg pritiska (za vreme rada motora).

Moguća rešenja u ovom domenu, predstavljena su na slici 10.

**BMW V-4 cylinders**



**VW V-4- cylinders**



**Slika 10. Višestruki izduvni sistem**

## ZAKLJUČAK

Radna sposobnost sistema predstavlja meru sposobnosti sistema za vršenje postavljene funkcije kriterijuma, u datom vremenu, datim uslovima okoline i uticajima - poremećajima u procesu rada sistema. Iz ove definicije proizilazi da radna sposobnost, izražena putem komponenti efektivnosti i njihovih parametara direktno utiče na nivo i kvalitet izlaznih veličina sistema: učinak sistema (radno strukturna izdašnost sistema), kvalitet sistema (sposobnost sistema u zadovoljavanju uslova okoline) i ekonomičnost sistema (ekonomska izdašnost sistema).

Kao što se može zaključiti iz svega iznetog, proces cevnog hidroforminga ispunjava u velikoj meri funkciju kriterijuma koja je određena na osnovu zahteva koji se pred njega postavljaju. Kvalitet dobijenog sistema, ušteda u masi i materijalu, ušteda u troškovima, bolje performanse, briga o okolini, sve su to zahtevi koji se stavljaju pred cevni hidroforming i koje on u velikoj meri zadovoljava. Ovi iskazi se mogu predstaviti i na sledeći način:

- redukcija mase  $\Rightarrow$  smanjenje potrošnje goriva;
- kompleksni oblici sa otvorima mogu se dobiti u jednom alatu  $\Rightarrow$  smanjenje broja procesa i vremena izrade elemenata;
- smanjenje broja elemenata  $\Rightarrow$  smanjenje broja i vremena trajanja operacija sklapanja;
- strukturne osobine značajno bolje  $\Rightarrow$  mnogo bolji rezultati **crash** testova;
- visok kvalitet spoljašnjih površina  $\Rightarrow$  odsustvo potrebe za završnom obradom;
- smanjenje broja procesa izrade elemenata i broja operacija sklapanja  $\Rightarrow$  smanjenje radne snage  $\Rightarrow$  smanjenje troškova;
- ušteda u materijalu  $\Rightarrow$  smanjenje troškova.

Automatizacija celog procesa, napredak kompjuterske kontrole kao i povećane mogućnosti simulacije sa ciljem poboljšanja efektivnosti sistema i samog procesa, sve su to prednosti koje govore u prilog cevnom hidroformingu i njegovoj široj upotrebi u automobilskoj industriji.

Trenutna istraživanja i razvojne aktivnosti u industriji i institutima širom sveta, ukazuju na dalji brz razvoj u spektru primena procesa hidroforminga. Ovo je proces na koji treba obra-

titi pažnju da bi bili u toku u industriji koja se stalno menja i napreduje.

## LITERATURA

1. Bobbert, S., Bischer, M., Ahmetoglu, M. A. and Altan, T. (1997) "*Tool and Process Design for Tube Hydroforming – A State of the Art Review and Applications of Compute Simulations*", Report No. ERC/NSM-R-97-2, pp.3-51, The Ohio State University, Columbus, Ohio, April, 1997.
2. Bruggemann, C. (1997), "*Hydroforming Process Overview and Applications*", 2nd International Conference on Innovations in Hydroforming Technology, Columbus, Ohio, September 1997.
3. Dohmann, F.; Hartl, C., (1996), "*Hydroforming - A Method to Manufacture Lightweight Parts*", Journals of Materials Processing Technology, vol. 60, pp. 669-676.
4. English, Bob. "GM shifts technology suppliers for '98 trucks." *Automotive News* Apr. 29, 1996: 1+.
5. Morphy, G., (1998), "*Pressure-Sequence and High-Pressure Hydroforming*", Tube & Pipe Journal, 28-135, September/October 1998, pp. 90-96.
6. Siegert K., (1998), "*Recent Developments in Hydroforming Technology*", Proceedings of the Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus, Ohio, 1998.

## HYDROFORMING TECHNOLOGY WITHIN DESIGN AND PRODUCTION OF VEHICLES

More than few years of experience, acquired upon structural parts innovation project of Mercedes 5000SL, in cooperation with DaimlerChrysler company, in which interest this project is being realized, enabled the authors, of this paper, detailed introduction with one of the methods which full contribution and development is being expected in the near future. The authors are not yet in the position to public announce cognitions that has been made within mentioned project, because of the secrecy agreement, but they highly believe that presentation of hydroforming possibilities is of the huge significance.

Key words: hydroforming, Ultra Light Steel Auto Body, components number reduction