



## ELASTIČNE DEVIJACIJE OBLIKA PRI DUBOKOM IZVLAČENJU DELOVA KAROSERIJE OD AL-LEGURA

M. Samardžić<sup>1</sup>, M. Stefanović<sup>2</sup>, S. Aleksandrović<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut za automobile, Zastava automobili, Kragujevac

<sup>2</sup>Mašinski fakultet, Kragujevac

**Rezime:** Al-legure se sve više koriste za izradu delova karoserije automobila zbog povoljnog odnosa mase i čvrstoće. U okviru složene problematike određivanja obradivosti karoserijskih limova značajno mesto zauzima proučavanje sposobnosti zadržavanja oblika. Pri oblikovanju Al-legura je izražen problem zadržavanja oblika komada zbog male vrednosti modula elastičnosti. Za ocenu elastične povratnosti koristi se klasični test U-savijanja. U radu je prikazan pregled istraživanja o stepenu uticaja karakteristika materijala i uslova oblikovanja na sposobnost zadržavanja oblika. Pored toga su navedeni rezultati za različite pritisno-brzinske uslove i različita stanja kontaktnih površina za test dvougaoanog savijanja.

**Cljučne reči:** duboko izvlačenje, Al-legure, elastično ispravljanje

## SHAPE FIXABILITY IN DEEP DRAWING OF AL-ALLOY CAR BODY PARTS

**Abstract:** Using of Al-alloys for automotive car body parts constantly increase mainly because of favorable relation mass to strength. Research of shape fixability problem take significant place in field of car body thin sheets formability. In Al-alloys deep drawing is expressed shape fixation problem because of small modul elasticity value. For springback evaluation used is U-bending test. In this article are presented research results of material properties and forming conditions influences on shape fixability. Also, are given results for U-bending test in different stress-speed and tribological conditions.

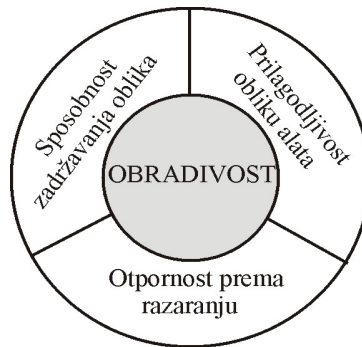
**Key words:** shape fixability, Al-alloys, springback

### 1. UVOD

Potreba za smanjivanjem mase automobila je dovela do sve veće primene Al-legura za izradu pojedinih delova ili pak celokupne karoserije. Povoljan odnos mase i čvrstoće predstavlja najvažniji razlog koji čini Al-legure pogodnim za primenu u automobilskoj industriji.

Obradivost predstavlja sposobnost lima da bez razaranja podnese deformisanje uz istovremeno postizanje zadate geometrije u okviru propisanih tolerancija oblika i dimenzija za odgovarajući kvalitet površina i sl. Stepenu uticaja faktora obradivosti varira od slučaja do slučaja tako da se ne može izvršiti neka generalizacija pa se zato preporučuje analiza svakog konkretnog slučaja sa definisanjem prioriternih faktora i određivanjem stepena uticaja.

Određivanje obradivosti karoserijskih limova je veoma kompleksan proces zbog postojanja složenih uslova obrade i velikog broja parametara relevantnih za postupak. To komplikuje njihovo ispitivanje kao i interpretaciju dobijenih rezultata. Prema Yoshida [1] obradivost karoserijskih limova se može posmatrati kroz tri svojstva: otpornost prema razaranju, sposobnost zadržavanja oblika i sposobnost prilagođavanja obliku alata. Ova tri segmenta zajedno čine obradivost u širem smislu (slika 1). Često se otpornost prema razaranju posmatra kao obradivost u najužem smislu.

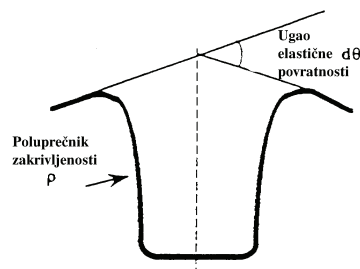


Slika 1: Elementi obradivosti karoserijskih limova

## 2. KARAKTERISTIKE ISPITIVANJA DVOUGAONIM SAVIJANJEM

Savijanje predstavlja jedan od vidova deformisanje koji je zastupljen pri izvlačenju delova karoserije. Kod Al-legura zbog male vrednosti modula elastičnosti izražen je problem zadržavanja oblika komada (tzv. "shape fixability"). Određivanje sposobnosti zadržavanja oblika vrši se pomoću testa dvougaonog savijanja [2]. Kod delova dobijenih postupkom savijanja zapažena su 4 tipa odstupanja od zadatog oblika: 1) ispupčenost dna komada, 2) nepostizanje upravnosti oboda komada u odnosu na bočne strane, 3) zakrivljenost bočnih strana, 4) otvaranje bočnih strana pod nekim uglom (elastično ispravljanje).

Kao parametri za analizu su uzimaju poluprečnik zakrivljenosti bočnih strana ( $\rho$ ) i ugao povratnosti ( $d\theta$ ) (slika 2). Zapaženo je da se sposobnost zadržavanja oblika pogoršava sa povećanjem vrednosti ugla  $d\theta$  i odnosa  $1/\rho$ . Postoji zadovoljavajuća linearna zavisnost između ugla  $d\theta$  i odnosa  $1/\rho$ .



Slika 2: Greške oblika nakon postupka savijanja

Veličina ugla elastičnog ispravljanja zavisi od vrednosti ugla savijanja i mehaničkih karakteristika materijala. Sa povećanjem čvrstoće materijala i smanjivanjem modula elastičnosti dolazi do povećanja ugla povratnosti. Kod čeličnih limova čvrstoća materijala predstavlja najvažniji faktor koji utiče na zakrivljenost. Istraživanja su pokazala da je takav uticaj prisutan i kod limova od Al-legura [3].

Na zakrivljenost bočnih strana utiču i uslovi oblikovanja kao što su: radijus zaobljenja matrice, zazor, karakteristike maziva i sila držanja. Uticaj radijusa zaobljenja matrice postaje značajniji sa smanjenjem čvrstoće materijala a generalno posmatrano zakrivljenost ( $1/\rho$ ) postaje manja sa smanjenjem radijusa zaobljenja matrice. Međutim pri suviše malim vrednostima dolazi do pojave razaranja i "zaribavanja" u zoni radijusa matrice. Kada je sila držanja mala, zakrivljenost ne zavisi od viskoznosti maziva. Međutim sa povećanjem vrednosti sile držanja, zakrivljenost postaje manja a sposobnost zadržavanja oblika se poboljšava sa smanjenjem viskoznosti maziva.

Sila držanja ima veliki uticaj na veličinu zakrivljenosti. Podešavanje sile držanja u toku oblikovanja jedan je od najefikasnijih načina za poboljšanje sposobnosti zadržavanja oblika.

Istraživanja su pokazala da povećanje temperature tokom oblikovanja povoljno utiče na poboljšanje obradivosti i smanjenje elastične povratnosti [4].

Poslednjih godina pojavili su se komercijalni programi za simulaciju procesa savijanja i određivanje ugla povratnosti koji omogućavaju ekonomičniji način konstruisanja i izrade alata [5].

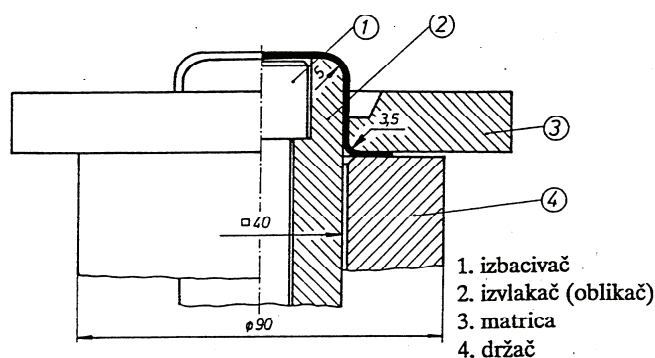
### 3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U eksperimentu je korišćen lim od legure AlMg4,5Mn koja pripada grupi legura AlMg čije je odlika da ne zahtevaju bilo kakav termički tretman pre, tokom ili posle oblikovanja. Debljina lima je iznosila 0,8 mm. U tabeli 1 su date karakteristike materijala. Stanje legure je određeno žarenjem na temperaturi od 350°C u trajanju od 3 sata.

Tabela 1

A. Mehaničke karakteristike								
	R <sub>p</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>80</sub> , %	n	r			
$\bar{X}$	148	271	21	0,26	0,715			
Kriva ojačanja (0°): $K = 152,9 + 305,9 \varphi^{0,312}$ , MPa								
B. Hemijski sastav								
element	M <sub>g</sub>	M <sub>n</sub>	S <sub>i</sub>	F <sub>e</sub>	T <sub>i</sub>	C <sub>u</sub>	Z <sub>n</sub>	C <sub>r</sub>
%	4,20	0,57	0,0869	0,29	0,013	0,007	0,068	0,092
C. Karakteristike hrapavosti								
	R <sub>a</sub> , μm	R <sub>z</sub> , μm	R <sub>p</sub> , μm	R <sub>y</sub> , μm				
Ugao 0°	0,173	0,65	0,55	0,99				
Ugao 90°	0,40	1,9	1,4	2,4				

Ispitivanje je obavljeno na univerzalnoj mašini za ispitivanje limova Erichsen 142/12. To je hidraulična presa trostrukog dejstva sa inverznim položajem pritiskivača. Savijanje se vrši kao dvougono, prema slici 3. Konstrukcija alata obezbeđuje identičnost uslova deformisanja (paralelnost površina i deformisanje) u obema zonama - klizanja i savijanja.



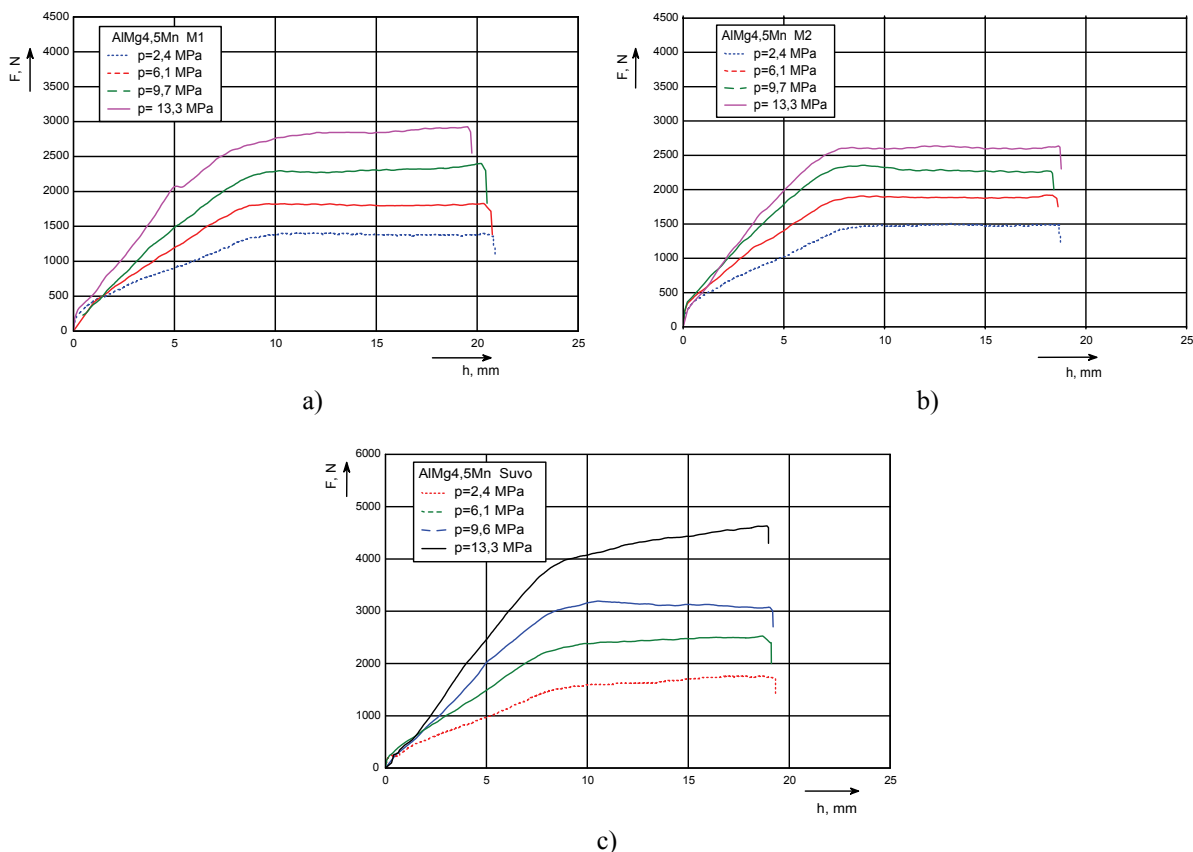
Slika 3: Elementi alata za ispitivanje savijanjem sa zatezanjem

Eksperiment je realizovan prema uslovima prikazanim u tabeli 2 [6].

Tabela 2

Faktor	Oznaka	Nivo faktora
Pritisak (MPa)	p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> , p <sub>4</sub>	2,4; 6,1; 9,7; 13,3
Brzina (mm/min)	v	20
Stanje kontaktnih površina	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub> , k <sub>3</sub>	M1, M2, S

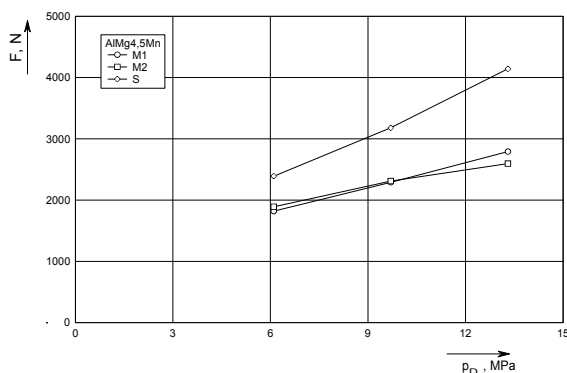
Pri ispitivanju se koriste epruvete dimenzija  $l_0 \times b_0 \times s_0 = 90 \times 20 \times 0,8$  mm. Površina kontakta iznosi  $820 \text{ mm}^2$ . Tokom ispitivanja su korišćena dva maziva za duboko izvlačenje: M1 i M2. Mazivo M<sub>1</sub> (AL 200) je namenjeno za izvlačenje aluminijumske žice a mazivo M<sub>2</sub> se koristi za duboko izvlačenje čeličnih limova. Mazivo se nanosi sa obe strane lima ali samo u zoni držača i matrice. Sve epruvete su savijene približno do iste visine,  $h=20$  mm. Na slici 4 je prikazana zavisnost ukupne sile savijanja (F) od hoda izvlakača (h) za različite vrednosti pritiska. Sila savijanja uključuje dvostruku vrednost sile čistog savijanja oko ivice matrice i silu trenja na izlazu iz zone zaobljenja ivice matrice.



**Slika 4:** Zavisnost sila savijanja od hoda oblikača: mazivo M1 (a), mazivo M2 (b) i suvo (c)

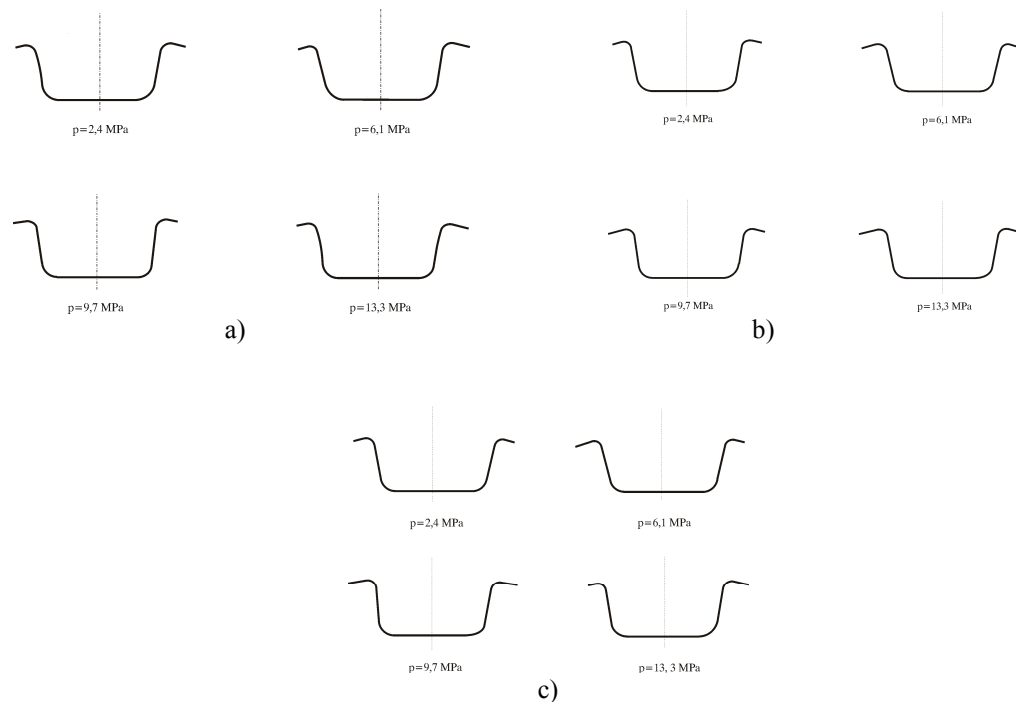
Korišćenjem maziva M<sub>1</sub> i M<sub>2</sub> dobijaju se slične vrednosti sila savijanja. U slučaju kada nije postojalo podmazivanje zabeležen je porast sile savijanja. Pri oblikovanju Al-legura ostvarene sile imaju manje vrednosti u odnosu na čelik.

Na silu savijanja bitno utiču pritisak i mazivo. Uzimajući vrednost sile savijanja pri visini  $h=10$  mm nacrtani su grafici zavisnosti sile savijanja od cpecifičnog pritiska pri različitim kontaktnim uslovima.



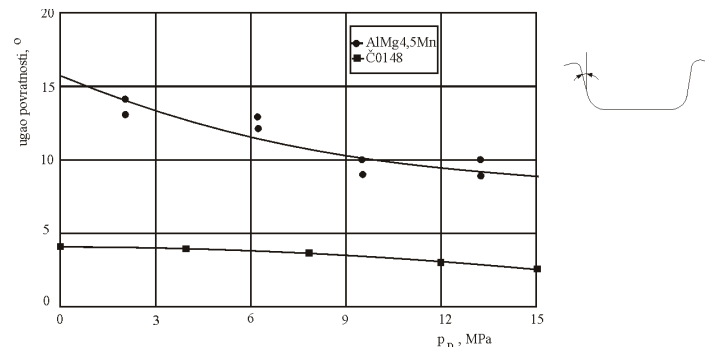
**Slika 5:** Zavisnost sile savijanja od pritiska

U odnosu na čelik, kod epruveta od Al-legure je izraženije povijanje i zakrivljenost bočnih stranica komada. Nakon oblikovanja merena je veličina ugla povratnosti (slika 6). Pri korišćenju maziva M1 i M2 dobijene su slične vrednosti za ugao povratnosti.



**Slika 6:** Geometrija komada nakon ostvarenog savijanja: mazivo M1 (a), mazivo M2 (b) i suvo (S)

Ugao povratnosti izmeren na dobijenim komadima je veći u odnosu na čelik [7]. Sa povećanjem sile držanja javlja se trend smanjivanja ugla povratnosti (slika 7).



**Slika 7:** Zavisnost ugla povratnosti od pritiska

#### 4. ZAKLJUČAK

Zbog male vrednosti modula elastičnosti Al-legure imaju lošiju sposobnost zadržavanja oblika u poređenju sa čelikom. Pri savijanju delova uočeni su sledeća odstupanja od zadate geometrije:

- 1) ispupčenost dna komada,
- 2) nepostizanje upravnosti oboda komada u odnosu na bočne strane,
- 3) zakrivljenost bočnih strana,
- 4) elastično ispravljanje bočnih strana (ugao povratnosti).

Veličina ugla elastične povratnosti zavisi od vrednosti ugla savijanja i mehaničkih karakteristika materijala. Sa povećavanjem čvrstoće materijala i smanjivanjem modula elastičnosti dolazi do povećanja ugla povratnosti. Sposobnost zadržavanja oblika komada zavisi i od uslova oblikovanja kao što su : radijus zaobljenja matrice, zazor, karakteristike maziva i sila držanja.

Za Al-legure je potrebna manja sila savijanja u odnosu na čelik pri istim uslovima oblikovanja. Kod testa dvougaoog savijanja zapaženo je da je kod Al-legura prisutno izraženije odstupanje od zadatog oblika komada kao što je zakrivljenost bočnih strana kao i veći ugao povratnosti. Prosečna vrednost ugla povratnosti kod Al-legure je iznosila oko 10°, dok je maksimalna vrednost ugla povratnosti kod čelika iznosila 4°. Sa povećanjem sile držanja javlja se trend smanjivanja ugla povratnosti.

U cilju dobijanja zadate geometrije preporučuje se da se pri konstrukciji alata pojava elastičnog ispravljanja kompenzuje preko odgovarajućeg ugla. Upravljanje silom držanja u toku oblikovanja takođe predstavlja jedan od efikasnijih načina za poboljšanje sposobnosti zadržavanja oblika. Neki autori smatraju da se izmenom mehaničkih karakteristika legura, putem zagrevanja radnog komada ili delova alata, može poboljšati sposobnost zadržavanja oblika.

## LITERATURA

- [1] K. Yoshida, H. Hayashi: Assessment of fitting behavior and shape fixation by Yoshida buckling test - A way to overall formability, Intern. Symp. New aspects on sheet metal forming, Tokyo, 1981, Proceedings p. 125.
- [2] H. Hayashi: The control of shape fixation and springback of aluminum alloy sheet in model forming, 19<sup>th</sup> IDDRG 94, Eger, 1996, 115-122.
- [3] Sato, S. Nakamura, Y. Tomioka: Automobile aluminum panel stamping mass production technology, IDDRG 94, Lisbon, Proceedings 479-490.
- [4] Y.T.Keum, B.Y. Han: Springback of FCC sheet in warm forming, Journal of ceramic processing research, Vol.3. No.3, 2002, pp. 159-165.
- [5] T. Altan: Predicting springback and air bending, straight flaging, Stamping Journal, October 2003.
- [6] M. Samardžić: Obradivost limova od Al-legura pri dubokom izvlačenju delova za karoserije automobila, Magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2003.
- [7] M. Stefanović, S. Aleksandrović, M. Milovanović, M. Samardžić: Savremeni materijali za izradu lakih karoserija putničkih automobila i njihova obradivost, 28. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kraljevo, 2000, 2.102-2.107.