

Lazić, V., Vuković, M., Jovanović, M., Aleksandrović, S., Živković, M.

## DEFINISANJE PARAMETARA TAČKASTOG ZAVARIVANJA PRI IZRADI ODGOVORNIH SKLOPOVA AUTOMOBILA

**Rezime:** U ovom radu sprovedena su opsežna teorijska, eksperimentalna i numerička istraživanja u cilju utvrđivanja najpovoljnije tehnologije tačkastog zavarivanja odgovornih sklopova automobila. Pre izbora tehnologije zavarivanja, najpre su određena najvažnija mehanička svojstva osnovnog materijala u različitim pravcima i na većem broju epruveta. Mikrostruktura tačkastog spoja je određivana na metalografskim šlifovima, pripremljenim iz tačkasto zavarenih spojeva. Ispitivanja zatezanjem i „metodom na moment uvijanja“ su poslužila za izbor najpovoljnijeg režima tačkastog zavarivanja, kao i za verifikaciju i poboljšanje numeričkog modela.

**Cljučne reči:** tačkasto zavarivanje, režim zavarivanja, eksperiment, numerička metoda.

## SPOT WELDING PARAMETERS DETERMINATION DURING FABRICATION OF RELIABLE AUTOMOTIVE ASSEMBLIES

**Abstract:** Detailed theoretical, experimental and numerical investigations are carried out in this paper with the aim to determine the most appropriate technology of spot welding of reliable automotive assemblies. Before choosing the weld technology, we first determined the most important mechanical properties of the base material in different directions and on a great number of test workpieces. Microstructure of the spot welded joint is determined on metallographic samples obtained from the spot welded joints. The tensile test and "torsional moment method" were used in choosing the most suitable spot welding regime, they were also used for verification and improvement of the numerical model.

**Key words:** welding spot resistance, regime welding, experiment, numerical method.

### 1. UVOD

U ovom radu, kao što je spomenuto, sprovedena su opsežna teorijska, eksperimentalna i numerička istraživanja u cilju definisanja optimalnih parametara tačkastog zavarivanja pri izradi odgovornih sklopova automobila na preklopno tačkasto zavarenim spojevima i različitim debljinama limova. Teorijska i eksperimentalna istraživanja poslužila su kao osnova za verifikaciju, razvoj i dogradnju primenjenog numeričkog modela.

Takođe, na zavarenim spojevima izvedena su i metalografska ispitivanja radi utvrđivanja oblika i geometrije zavarenog spoja, merenja tvrdoće i ocene mikrostrukture karakterističnih zona tačkasto zavarenog spoja.

Pored ovih uobičajenih-standardnih ispitivanja, u ovom radu je posebno opisan novi originalni metod kontrole kvaliteta preklopnog tačkastog spoja, pri čemu je kriterijum kvaliteta bio izmereni moment uvijanja, odnosno prečnik prekinutog mesta spoja livenog jezgra (sočiva).

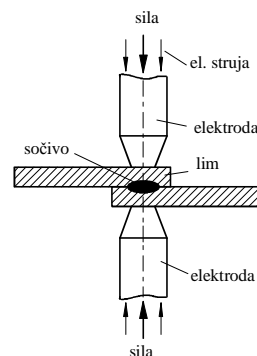
Za date uslove eksperimentalnih istraživanja, uporedo su izvedeni i numerički proračuni metodom konačnih elemenata radi provere saglasnosti numerički dobijenih rezultata sa eksperimentalnim. Zadatak je bio da se ustanovi korelacija ove dve metode radi utvrđivanja najpovoljnije tehnologija tačkastog zavarivanja [1, 3, 4, 5].

### 2. OSNOVI TAČKASTOG ZAVARIVANJA

Elektrootporsko tačkasto zavarivanje ima najveću primenu pri izradi školjki automobila, kabina kamiona i drugih proizvoda od tankog lima. Postupak se svrstava u termo-mehaničke metode zavarivanja (sl. 1), jer se čvrst spoj između preklopljenih delova ostvaruje kombinovanim dejstvom toplote i sile pritiska. Mada se najviše izrađuju spojevi od dva lima, moguće su i kombinacije sa više limova. U

svakom slučaju kroz pritegnute delove se propušta električna struja velike jačine, niskog napona i u toku veoma kratkog vremena.

Probna zavarivanja preklopnih spojeva izvedena su na osnovu usvojenih preporučenih parametara zavarivanja: prečnika vrha elektrode ( $d_e$ , mm), jačine struje zavarivanja ( $I_z$ , A), vremena zavarivanja ( $t_z$ , per) i sile na elektrodama ( $F_z$ , daN). Posle zatezanja i kidanja probnih uzoraka definitivno su usvajani parametri zavarivanja ili je izvedena njihova korekcija. Kriterijum je bio taj da sila kidanja mora nadmašiti minimalnu standardnu silu za datu debljinu i vrstu materijala [8, 9, 10, 11, 13].

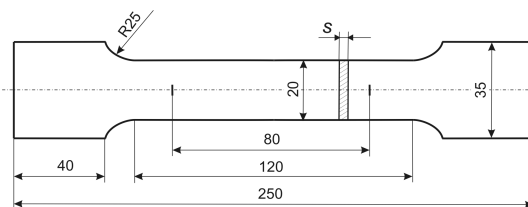


Slika 1. Shema tačkastog zavarivanja

### 3. ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA OSNOVNOG MATERIJALA

Pre izbora tehnologije zavarivanja, najpre su određena najvažnija mehanička svojstva osnovnog materijala u različitim pravcima i na većem broju epruveta. Određivani su: zatezna jačina, napon tečenja, izduženje, modul elastičnosti,

kao i "n" i "r" faktor [12]. U našem slučaju probne uzorke smo sekli iz table lima u tri pravca: u pravcu valjanja lima (0°), pod uglom (45°) u odnosu na pravac valjanja lima i upravno na pravac valjanja lima (90°) (sl. 2).

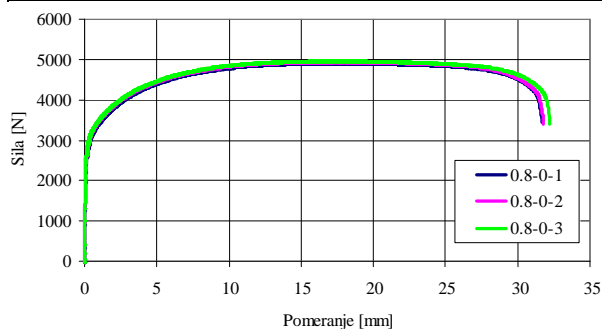


Slika 2. Izgled i dimenzije epruvete za određivanje mehaničkih karakteristika materijala

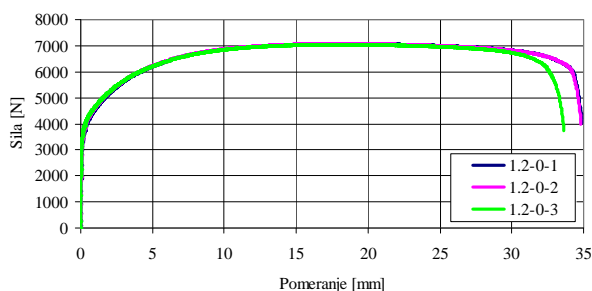
Srednje vrednosti dobijenih rezultata ispitivanja zatezanjem prikazane su u tablici 1, a na slikama 3 i 4 su prikazane grafičke zavisnosti sila-pomeranje za dve različite debljine lima i za samo jedan karakterističan pravac valjanja lima (0°) [1].

Tablica 1. Najvažnije mehaničke karakteristike ispitivanih materijala-Č0146P3 (srednje vrednosti) [1]

Materijal	U <sub>gao</sub> , °	R <sub>p</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p</sub> /R <sub>m</sub> , -	A, %	n, -	r, -	E, MPa
s = 0.8 mm	0°	179.13000	305.07333	0.58717	39.74000	0.20367	1.86700	185300
	45°	193.49000	314.93333	0.61438	36.98000	0.19533	1.54600	207200
	90°	187.63667	302.29667	0.62070	38.38000	0.19433	2.27567	194466
	X <sub>sr</sub>	188.43667	309.30916	0.60916	38.02000	0.19716	1.80867	198541
s = 1.2 mm	0°	155.99667	291.10000	0.53589	42.94667	0.22333	1.96200	164233
	45°	155.82667	297.18000	0.52435	40.41667	0.22000	1.65667	193166
	90°	153.70000	285.62667	0.53811	41.22333	0.21867	2.36300	173266
	X <sub>sr</sub>	155.33750	292.77167	0.53067	41.25084	0.22050	1.90958	180958



Slika 3. Dijagram sila-pomeranje (s = 0.8 mm-Č0146P3-0°)



Slika 4. Dijagram sila-pomeranje (s = 1.2 mm-Č0148P3-0°)

#### 4. DEFINISANJE OSNOVNIH PARAMETARA TAČKASTOG ZAVARIVANJA

Osnovni parametri tačkastog zavarivanja biraju se na osnovu iskustvenih preporuka u zavisnosti od vrste materijala, broja delova u sklopu i njihove debljine. Budući da su pri eksperimentima zavarivani preklapni spojevi od dva lima iste debljine (s = 0.8 i 1.2 mm), početni parametri zavarivanja birani su na osnovu preporuka datih u literaturi

[8, 9, 10, 11, 13]. Posle preklapnog tačkastog zavarivanja epruveta - uzoraka, (20×100 mm za s = 0.8 mm i 25×100 mm za s = 1.2 mm), isti su zatezani na mehaničkoj kidalici. Za kriterijum kontrole kvaliteta usvojena je maksimalna sila kidanja spoja, oblik i prečnik tačke-sočiva, makro i mikrostruktura, tvrdoća po preseku zavarenog spoja i dr. U zavisnosti od dobijenih rezultata izvođena je korekcija parametara zavarivanja odnosno njihovo definitivno usvajanje za dalja eksperimentalna istraživanja. Usvojeni parametri zavarivanja dati su u tablici 2.

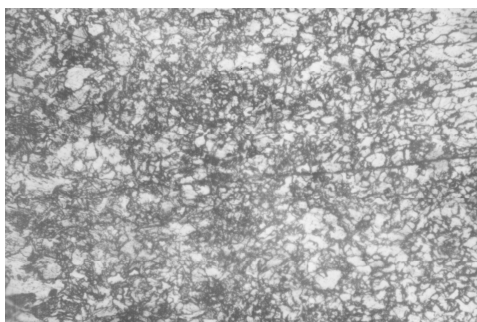
Tablica 2. Parametri tačkastog zavarivanja

Debljina lima, mm	Parametri tačkastog zavarivanja				
	d <sub>e</sub> , mm	I <sub>z</sub> , A	t <sub>z</sub> , per	F <sub>z</sub> , daN	F <sub>r</sub> , daN
0.80	5.5	6600	14	125	430
1.20	6.2	8000	20	180	720

Pri zatezanju zavarenih spojeva sile razaranja bile su znatno veće od preporučenih. U slučaju spojeva ostvarenih od limova debljine s = 0.8 mm vrednosti sile razaranja bile su: 450, 452, 463, 433, 461, 454, 469, 470, 476 i 480 daN (10 zavarenih uzoraka). U slučaju spojeva ostvarenih od limova debljine s = 1.2 mm vrednosti sile razaranja bile su: 762, 742, 753, 752, 721, 722, 734, 732, 764 i 774 daN (10 zavarenih uzoraka) [1].

#### 5. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA

Mikrostruktura je određivana na metalografskim šlifovima, pripremljenim iz tačkasto zavarenih spojeva. Mikrostruktura metala tačke ocenjena je kao Vidmanštetenova, O.M. kao sitnozrna feritna sa neznatnim učešćem perlita, dok je mikrostruktura ZUT-a prikazana na slici 5 [1, 6].



Usitnjena, normalizovana feritna struktura sa neznatnim učešćem

Slika 5. Mikrostruktura ZUT-a tačkasto zavarenog spoja

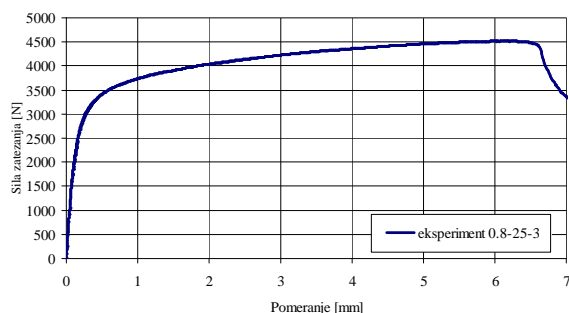
## 6. MEHANIČKA ISPITIVANJA TAČKASTO ZAVAREN OG SPOJA

### 6.1 Ispitivanje zatezanjem

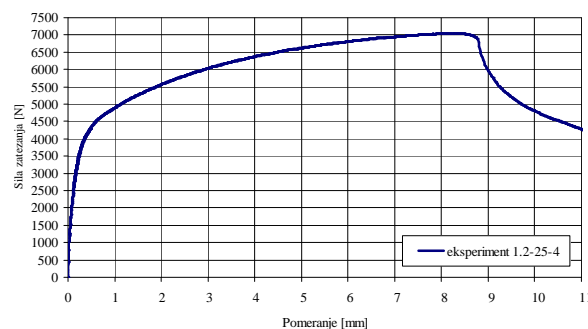
Posle određivanja mehaničkih svojstava OM i usvajanja režima tačkastog zavarivanja, pristupilo se elektrotoporskom tačkastom zavarivanju različitih preklopnih spojeva. Zavareni spojevi su ispitivani radi utvrđivanja svojstava otpornosti i sposobnosti deformacije. Za ova ispitivanja pripremljene su epruvete debljina 0.8 i 1.2 mm i širina: 20, 25, 30, 35, 40, 45 i 50 mm. Posle izvođenja preklopnog tačkastog zavarivanja većeg broja uzoraka (sl. 6) pristupilo se njihovom zatezanju (sl. 7 i 8).



Slika 6. Izgled uzoraka-epruveta pre i posle kidanja



Slika 7. Dijagram sila - pomeranje; zatezanje tačkasto zavarene epruvete debljine 0.8 mm i širine 25 mm



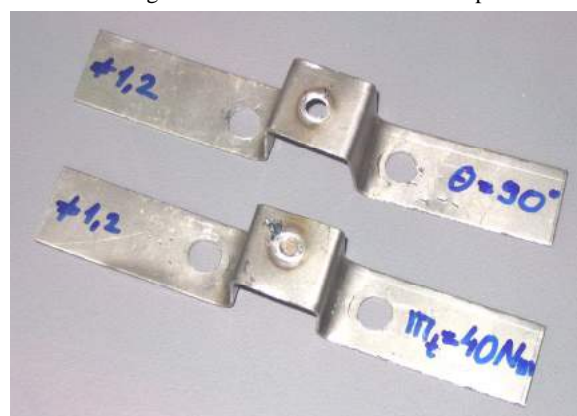
Slika 8. Dijagram sila - pomeranje; zatezanje tačkasto zavarene epruvete debljine 1.2 mm i širine 25 mm

### 6.2 Ispitivanje uvijanjem

Za potrebe ispitivanja uvijanjem krstasto zavarenih spojeva (sl. 9) neophodno je odrediti veličinu maksimalnog momenta uvijanja, odnosno prečnik tačke (sočiva) i na osnovu tih vrednosti doneti zaključak o kvalitetu izvedenog spoja. Krstasto zavarene epruvete su uvijane pomoću specijalno konstruisanog alata [1]. Na taj način je proveravan moment uvijanja i prečnici sočiva. Na slici 10 prikazan je jedan razoreni tačkasto zavareni krstasti spoj. Prema obliku prekida spoja, kao i prema izmerenom momentu može se ustanoviti najpovoljniji režim zavarivanja.



Slika 9. Izgled krstasto zavarenih uzoraka-epruveta



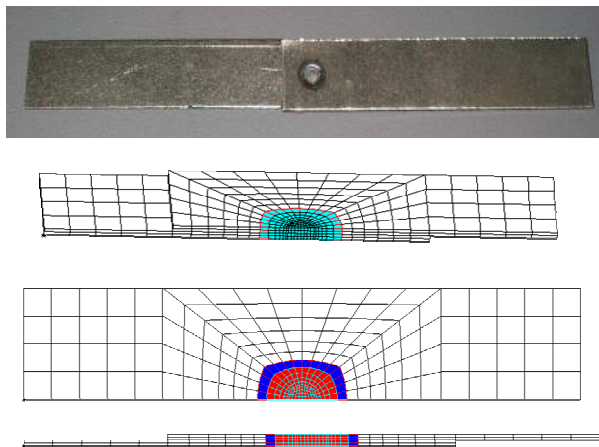
Slika 10. Izgled razorenog krstasto zavarenog tačkastog spoja

## 7. REZULTATI NUMERIČKIH ISPITIVANJA

Analizirana su dva tačkasta preklopna spoja od jednakih debljina limova 0.8 i 1.2 mm, širine 24.9 mm i dužine  $L = 45$  mm. Razmatrana je geometrijski i materijalno nelinearna analiza zavarenog spoja. Usvojeno je da su prečnici zavarenih tačaka 6 i 7 mm. Epruvete su modelirane sa solidima (976) kao paraboličnim elementima [1, 2, 3, 4, 7]. Zbog ravanske simetrije, modelirana je samo polovina modela uz primenu odgovarajućih graničnih uslova simetrije. Korišćen je Misesov elastoplastični materijalni model sa

izotropnim ojačanjem [1, 2, 4, 6, 7].

Materijalni podaci za Ramberg - Osgood krivu ojačanja su:  $E= 200000 \text{ MPa}$ ,  $\nu= 0.3$ ,  $\sigma_y = \sigma_{yv} + C_y \bar{\epsilon}_p^n$ ,  $\sigma_{yv}= 188.44 \text{ N/mm}^2$ ,  $C_y= 357.26 \text{ N/mm}^2$  i  $n= 0.3945$  [1, 2, 4]. Zona metala tačke (šava) ojačana je sa  $C_y= 520 \text{ N/mm}^2$  i  $n= 1$ . Geometrija modela je data je u radu [1], dok je mreža konačnih elemenata prikazana na slici 11.

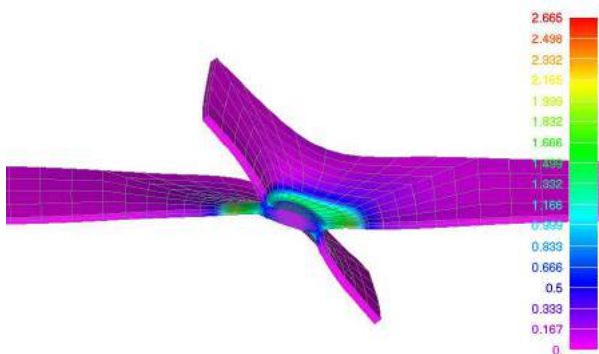


Slika 11. Mreža konačnih elemenata; zona metala šava i okolna zona (ZUT i O.M.)

Izgled deformisane epruvete i polje efektivnog napona na deformisanoj konfiguraciji u 70-om koraku prikazan je na slici 12. Polje efektivne plastične deformacije je dato na slici 13.

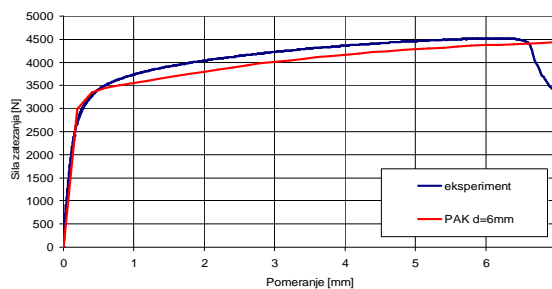


Slika 12. Polje efektivnog napona

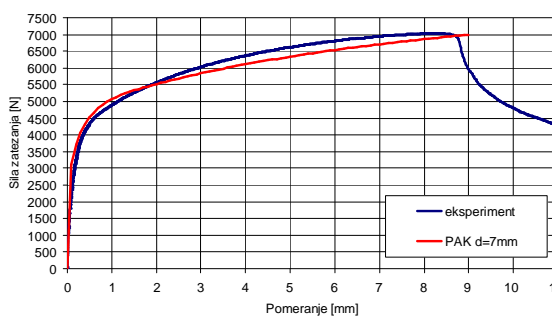


Slika 13. Polje efektivne plastične deformacije

Uporedni dijagrami sila-pomeranje prikazani su na slici 14. Sa slika se vidi da su vrednosti sila dobijenih numeričkim proračunom za prečnik zavarene tačke  $d\bar{D}= 6 \text{ mm}$  i  $d= 7 \text{ mm}$  za oko 5 % niže od vrednosti sila dobijenih eksperimentom [1].



a)  $s= 0.8 \text{ mm}$



b)  $s= 1.2 \text{ mm}$

Slika 14. Dijagram sila-pomeranje pri kidanju preklapno tačkasto zavarenih epruveta debljine 0.8 mm

## 8. ZAKLJUČAK

Provera kvaliteta tačkasto zavarenog spoja izvedena je eksperimentalnim i laboratorijskim metodama. Ispitivanja zatezanjem i „metodom na moment uvijanja“ su pokazala da je odabrana najpovoljnija tehnologija tačkastog zavarivanja koja se može preneti i na realne delove. U cilju verifikacije numeričkih modela, izvršena je komparacija dobijenih rezultata sa eksperimentalnim rezultatima. Verifikacijom rezultata proračuna došlo se do ocene o valjanosti razvijene metodologije i mogućnosti da se razvijeni softver pouzdano koristi u praksi za rešavanje problema nosivosti tačkasto zavarenih spojeva i konstrukcija, odnosno posredno i za izbor i definisanje parametara tačkastog zavarivanja pri izradi odgovornih podsklopova i sklopova automobila.

## 9. LITERATURA

- [1] Vuković, M. *Eksperimentalna ispitivanja i numerička analiza čvrstoće tačkasto zavarenih spojeva i konstrukcija*, magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2006.
- [2] Kojić, M., Bathe, K., J. *Inelastic Analysis of Solids and Structures*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [3] Lazić, V., Vuković, M., Jovanović, M., Aleksandrović, S., Vulović, R.: *Ocena kvaliteta tačkasto zavarenog spoja standardnim i novim metodama kontrole sa razaranjem-deo 1*, 25 Savetovanje sa međunarodnim učešćem ZAVARIVANJE 2008, Subotica. Rad usmeno izložen, objavljen u celosti na CD-u (red. br. 86) i u Zborniku rezimea radova, str. 119.
- [4] Lazić, V., Vuković, M., Jovanović, M., Živković, M., Aleksandrović, S.: *Eksperimentalno-numeričko određivanje najpovoljnije tehnologije tačkastog zavarivanja odgovornih sklopova automobila-deo 2*, 25 Savetovanje sa međunarodnim učešćem

- [5] ZAVARIVANJE 2008, Subotica. Rad usmeno izložen, objavljen u celosti na CD-u (red. br. 87) i u Zborniku rezimea radova, str. 120.
- [6] Lazić, V., Živković, M., Vuković, M.: *Experimental – numerical method of determination of the most appropriate technology of spot welding*, extended abstract title, 25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics held in Ceske Budejovice, Czech Republic, September 24th-27th, 2008.
- [7] Lazić, V.: *Prilog proračunu temperaturskih polja pri tačkastom zavarivanju*, magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 1990.
- [8] Janota, M.: *Procesy a riadenie odporoveho zvarania*, Bratislava, 1985.
- [9] Metals Handbook: *Welding and brazing* ASM, Metals Park Ohio, USA, 1979.
- [10] Majstorović, A., Jovanović, M.: *Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [11] Jovanović, M., Adamović, D., Lazić, V.: *Tehnologija zavarivanja-priručnik*, samostalno autorsko izdanje, Kragujevac, 1996.
- [12] Sedmak, A. i dr.: *Mašinski materijali-drugi deo*, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [13] Devedžić, B.: *Plastičnost i obrada metala deformisanjem*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [14] Standardi i prospekti: JUS, DIN, PN, Fiat-Iveco, Zastava, ....
- Autori: V. Lazić, M. Jovanović, S. Aleksandrović, M. Živković**, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, **34000 Kragujevac**, **M. Vuković**, Zastava automobili – Fabrika Preseraj, Trg toplolivaca 4, 34000 Kragujevac.