

# OCENA KVALITETA TAČKASTO ZAVAREN OG SPOJA STANDARDNIM I NOVIM METODAMA KONTROLE SA RAZARANJEM - deo 1

Vukić Lazić<sup>1</sup>, Marina Vuković<sup>2</sup>, Milorad Jovanović<sup>1</sup>, Srbi slav Aleksandrović<sup>1</sup>,  
Radun Vulović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) *Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac*

<sup>2</sup>) *Fabrika Preseraj, Zastava automobili, Trg topilivaca 4, 34000 Kragujevac*

E-mail: [vlazic@kg.ac.yu](mailto:vlazic@kg.ac.yu)

*Cilj ovog rada je utvrđivanje najpovoljnije tehnologije tačkastog zavarivanja, na osnovu rezultata dobijenih različitim metodama kontrole sa razaranjem preklopno tačkasto zavarenih spojeva od limova različitih debljina. Posebno se detaljno opisuje novopredložena metoda kontrole kvaliteta tačkasto zavarenog spoja tzv. momentom uvijanja. Probna zavarivanja izvođena su variranjem osnovnih parametara zavarivanja: prečnika vrha elektrode, jačine struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrodama.*

## **Ključne reči:**

*tačkasto zavarivanje, parametri zavarivanja, osnovni metal, kontrola.*

## QUALITY EVALUATION OF SPOT WELDED JOINT BY BOTH STANDARD AND NEW METHODS OF CONTROL WITH DESTRUCTION – part 1

*Aim of present paper is to establish the most suitable technology of spotted welding on the basis of data obtained by different methods of control with destruction of overlapped spot welded bonds of sheets with different thickness. Special attention has been devoted to new proposed method of quality control of spotted welds through torsion moment. Test welds were performed by variation of basic parameters of welding such as: diameter of top of electrode, intensity of electric current, period of welding process and electrode forces.*

## **Key words:**

*spot welding, parameters of welding, base metal, control.*

## **1. UVOD**

Zavarivanje raznih konstrukcija sve se više proširuje i unapređuje. Sama činjenica da je razvijeno i da danas nalazi primenu oko 104 različitih vrsta postupaka zavarivanja ukazuje na značaj i ekspanziju ove proizvodne tehnologije. Čak se i osnovni materijali za zavarene konstrukcije sve više u procesu primarne prerade prilagođavaju uslovima zavarivanja. Čelik je bio i ostaje zadugo glavni konstrukcioni materijal. Oko 60% celokupne svetske proizvodnje čelika, a ona je premašila iznos od milijardu tona, prerađuje se zavarivanjem. Od toga je u zavarivačkoj proizvodnji najviše zastupljeno elektrolučno zavarivanje (oko 70%), zatim elektrootporsko zavarivanje (oko 25%), a ostatak čine svi ostali postupci zavarivanja. Ostali postupci zavarivanja se uglavnom primenjuju kada ne postoji mogućnost izvođenja zavarenog spoja pomenutim metodama. Udeo elektrootporskog zavarivanja je velik, a predviđa se proširenje primene ovog postupka na nova područja proizvodnje.

Tačkasto elektrootporsko zavarivanje je danas vrlo rasprostranjena metoda, a veliku

primenu nalazi u automobilske i avionske industriji, zatim brodogradnji, proizvodnji vagona i poslednjih godina u elektrotehnici i elektronici. Dakle, za izvođenje preklopnih spojeva kod tankozidnih konstrukcija tačkasto zavarivanje je nezaobilazan postupak. U prilog ovome može se navesti da kod savremenih aviona broj zavarenih tačaka iznosi nekoliko miliona, a kod automobila broj tačaka se kreće u rasponu od 5000-10000 tačaka, zavisno od tipa automobila [4, 5, 6, 7].

Uglavnom su dve osnovne prednosti tačkastog zavarivanja u odnosu na druge postupke spajanja: visoka produktivnost i mogućnost automatskog upravljanja većim brojem parametara. Iz ovih razloga je tačkasto zavarivanje veoma pogodno za masovnu proizvodnju i automatizaciju, a s obzirom na ovakva kretanja u savremenoj industriji, tačkasto zavarivanje dobija sve veći značaj.

## 2. OSNOVI ELEKTROTPORSKOG ZAVARIVANJA

### 2.1 Opšte napomene

Svaki provodnik kroz koji protiče električna struja, zagreva se srazmerno električnom otporu, kojim se provodnik suprostavlja prolaženju te struje. Koja će se temperatura pri tome postići, zavisi od otpora, jačine struje koja kroz taj provodnik protiče i vremena proticanja. Najviša temperatura, koja se pri tome može postići, praktično je neograničena. Prema tome, ovaj način zagrevanja može se iskoristiti i za topljenje metala, tj. zavarivanje.

Svi postupci zavarivanja, kod kojih se metal zagreva i topi toplotom proizvedenom električnim otporom, a da se pri tome ne stvara električni luk, pripadaju grupi postupaka elektrootporskog zavarivanja.

Količina toplote oslobođena u provodniku, kroz koji u određenom vremenskom intervalu protiče električna struja određene jačine, računa se prema izrazu:

$$Q = \int_0^t R \cdot i^2 dt, J,$$

gde je:  $i$  - jačina struje u  $A$ ,  $R$  - električni otpor u  $\Omega$  i  $t$  - vreme zavarivanja u  $s$ .

Za vreme zagrevanja, veliki deo energije se gubi i to: na zagrevanje elektroda, zagrevanje rashladne vode i dr. Samo deo ove energije se utroši na zavarivanje, pa se može reći da količina toplote utrošena na zavarivanje iznosi:

$$Q = k \int_0^t R \cdot i^2 dt, J, \text{ pri čemu je koeficijent iskorišćenja } k < 1.$$

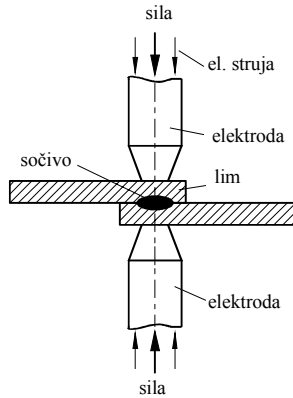
Pri elektrootporskom zavarivanju kroz preklopljene delove propušta se struja velike jačine ( $i = 100 \div 300000 A$ ) i napona ( $U = 0.5 \div 10 V$ ). Da bi toplotni gubici bili što manji, kroz zavarivane delove treba propuštati struju što kraće vreme, upravo onoliko koliko je neophodno za formiranje zavarenog spoja. Vreme prolaska struje kroz radne komade iznosi obično 0.05 do nekoliko sekundi. Iz navedenog može se zaključiti da je rukovanje uređajima za elektrootporsko zavarivanje potpuno bezopasno.

Delovi uređaja koji dovode struju zavarivanja na radne komade, se zagrevaju zbog postojanja električnog otpora. Ovo zagrevanje je nepoželjno i treba ga svesti na najmanju meru. To se postiže pogodnom konstrukcijom elemenata za dovodenje struje. Da bi njihov električni otpor bio što manji, izrađuju se tako da budu što kraći, da imaju što veći presek i da budu od materijala koji pruža što manji električni otpor (bakar i specijalne legure na bazi bakra).

Za elektrootporsko zavarivanje isključivo se koristi naizmenična struja, bez obzira na činjenicu da u odnosu na jednosmernu struju ima veliki induktivni otpor. S druge strane, dobijanje jednosmerne struje malog napona je otežano, kao i nemogućnost izrade prekidača za tako velike struje.

Kod čitavog niza postupaka zavarivanja, električni otpor se koristi za dobijanje toplote neophodne za zavarivanje odnosno topljenje metala. Međutim, kod većine postupaka za ostvarivanje zavarenog spoja neophodno je uvesti i pritisak. Zbog toga se postupci elektrolučnog zavarivanja dele prema načinu ostarivanja zavarenog spoja. Budući da je pri eksperimentalnim istraživanjima sprovedenim u ovom radu primenjivan postupak elektrootporskog tačkastog zavarivanja to će on biti nešto detaljnije obrađen.

## 2.2 Osnovi tačkastog zavarivanja



Slika 1. Shema tačkastog zavarivanja

Elektrootporsko tačkasto zavarivanje ima najveću primenu pri izradi školjki automobila, kabina kamiona i drugih limenih proizvoda. Postupak se svrstava u termomehaničke metode zavarivanja, jer se čvrst spoj između preklopljenih delova ostvaruje kombinovanim dejstvom toplote i sile pritiska (sl. 1). Mada se najviše izrađuju spojevi od dva lima, moguće su i kombinacije sa više limova. U svakom slučaju kroz delove se propušta električna struja velike jačine, napona ( $U < 10 V$ ), u toku veoma kratkog vremena ( $t = 0.06 - 3 s$ ). Kada se struja isključi, "formiranje sočiva" - rastopljenog jezgra, se završava pod još uključenom silom pritiska. Aparati za tačkasto zavarivanje mogu biti stacionarni i pokretni.

Elektrode za tačkasto zavarivanje imaju sasvim drugu ulogu nego elektrode kod drugih postupaka zavarivanja. Osnovna uloga elektroda je zatvaranje strujnog električnog kola, provođenje električne struje, prenošenje sile zavarivanja i odvođenje toplote. Zbog toga su elektrode izložene visokim mehaničkim opterećenjima i zamornim termičkim ciklusima. Izrađuju se od legura: Cu-Cr, Cu-Cr-Zr i u najnovije vreme na bazi disperzno otvrdnutih materijala-disperzno ojačanog bakra [2, 3].

## 2.3 Parametri tačkastog zavarivanja

Osnovni parametri tačkastog zavarivanja (jačina struje  $I_z$ , sila pritiska  $F_z$ , vreme zavarivanja  $t_z$  i prečnik vrha elektrode  $d_e$ ) biraju se tako da prečnik rastopljenog jezgra (sočiva) odgovara približno prečniku vrha elektrode [6, 9].

Prečnik vrha elektrode  $d_e$  usvaja se prema ekvivalentnoj debljini lima ( $s$ ) i u zavisnosti od vrste zavarivanih materijala, npr.  $d_e = 5 \cdot \sqrt{s}$  - za niskouglenične čelike,  $d_e = 4 \cdot \sqrt{s}$  - za visokolegirane čelike,  $d_e = 10 \cdot \sqrt{s}$  - za aluminijum itd. Kao kriterijum postojanosti elektroda usvaja se broj tačaka do proširenja prečnika vrha elektrode za 20%. Prekoračenjem te vrednosti, neophodno je ponovno preoštravanje vrha elektrode na početnu meru, jer se uvećanim prečnikom dobijaju spojevi lošijeg kvaliteta. Kod elektroda namenjenih zavarivanju Al i njegovih legura kriterijum postojanosti jeste zaprljanost vrha elektrode.

Prečnik vrha elektrode za slučaj tačkastog zavarivanja dva ili tri lima jednakih ili različitih debljina, određuje se na osnovu tzv. ekvivalentne debljine lima [6, 9].

Ostali parametri zavarivanja ( $I_z$ ,  $t_z$ ,  $F_z$ ) određuju se na osnovu tzv. ekvivalentne debljine lima, npr.  $I_z = 6500 \cdot s$  (A),  $t_z = (0.16 \div 0.36) \cdot s$  (s) i  $F_z = p \cdot d_e^2 \cdot \pi / 4$  (daN) - za niskouglenične čelike debljine  $s = 1 \div 3$  mm i  $p = 49 \div 118$  MPa, ili se usvajaju iz odgovarajućih preporuka što je u praksi češći slučaj. Posle kontrole ostvarenog spoja bira se odgovarajući režim zavarivanja.

U tablici 1 date su preporučene vrednosti za izbor parametara tačkastog zavarivanja za niskouglenične čelike ( $C < 0.25\%$ ). Kada se zajedno zavaruju tri lima, zahtevi za otpornost na smicanje i veličinu jezgra propisuju se posebno za svaki par limova.

Tablica 1. Parametri tačkastog zavarivanja niskougljeničnih čelika [2, 3, 6, 7, 9]

s	d <sub>e</sub>	Zavarivanje - klasa A ("oštar" režim)				Zavarivanje - klasa B ("srednji" režim)				Zavarivanje - klasa C ("blag" režim)			
		t <sub>z</sub>	F <sub>z</sub>	I <sub>z</sub>	F <sub>r</sub> **	t <sub>z</sub>	F <sub>z</sub>	I <sub>z</sub>	F <sub>r</sub>	t <sub>z</sub>	F <sub>z</sub>	I <sub>z</sub>	F <sub>r</sub>
mm	mm	per*	kN	kA	kN	per	kN	kA	kN	per	kN	kA	kN
0.5	4.5	6	1.35	6.1	2.5	9	0.90	5.2	2.25	20	0.43	3.9	1.8
0.6	4.5	6	1.55	6.8	3.15	10	1.05	5.7	2.5	22	0.50	4.3	2.5
0.7	4.5	7	1.7	7.5	3.7	12	1.10	6.2	3.4	24	0.58	4.6	3.2
0.8	5.5	8	1.9	8.1	4.5	14	1.25	6.6	4.3	27	0.63	4.9	3.6
0.9	5.5	9	2.1	8.7	5.2	15	1.40	7.0	5.0	30	0.72	5.2	4.5
1.0	5.5	10	2.3	9.3	6.0	17	1.55	7.1	5.65	32	0.81	5.5	5.4
1.2	6.2	11	2.8	10.3	7.5	20	1.80	8.0	7.2	35	0.90	6.0	6.3
1.5	6.2	14	3.5	11.5	10.0	25	2.20	9.0	9.5	40	1.11	6.7	9.3
1.8	6.2	16	4.2	12.8	13.0	29	2.65	9.8	12.2	45	1.35	7.4	11.8
2.0	7.0	18	4.8	13.5	15.5	34	3.00	10.3	14.0	48	1.55	7.8	13.5
2.5	7.0	21	6.1	15	21.0	40	3.70	11.5	19.0	56	1.80	9.0	18.0
3.0	7.0	21	7.7	16.6	28.0	48	4.70	12.7	25.5	63	2.30	9.7	23.5

\* - vreme zavarivanja izražava se u periodama (per = 1/50 Hz = 0.02 s).

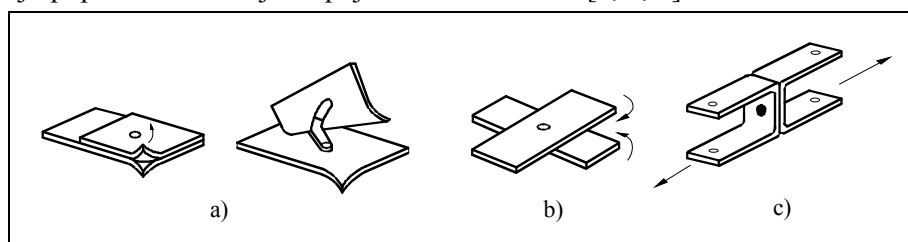
\*\* - minimalna sila razaranja koju zavareni spoj mora da izdrži pri smicanju.

## 2.4 Metodi kontrole tačkasto zavarenih spojeva

Tačkasto zavareni spojevi povremeno se kontrolišu na uzorcima zavarenim istom tehnologijom kao i dati proizvod. Kvalitet izvedenog zavarivanja se utvrđuje tehnološkim probama, ispitivanjem mikrostrukture i određivanjem jačine spoja. Pri ispitivanju zatezanjem razaranje može nastati: smicanjem sočiva (tačke, jezgra), čupanjem sočiva i kidanjem lima.

Razaranje čupanjem ("otkopčavanjem") sočiva nastaje kod materijala veće plastičnosti i uopšte kod spojeva na tanjim limovima (0.3-0.8 mm). Spojevi limova velike jačine ili velike debljine razaraju se smicanjem. Tom prilikom otkrivaju se unutrašnje greške sočiva: prsline, poroznost, prskotine (rasprskivanje). Zavareni spojevi koji se razore kidanjem lima pokazuju da nisu pravilno dimenzionisani (mala širina ili preklop).

Tehnološke probe za određivanje nekih drugih karakteristika date su na slici 2. Za preciznije određivanje dimenzija sočiva, dubine otiska elektroda i otkrivanje eventualnih grešaka, izrađuje se šlif za ispitivanje mikrostrukture. Metalografski šlifovi (izbrusci) se prave i pripremaju poprečnim isecanjem spoja kroz centar šava [1, 2, 6].



Slika 2. Tehnološke probe kontrole za: a) prečnik sočiva, b) moment uvijanja i c) normalnu silu

## 2.5 Merenje osnovnih parametara tačkastog zavarivanja

Najvažniji parametar-efektivna vrednost struje zavarivanja ne može se direktno izmeriti jer je prejaka za obične merne instrumente. Zato se koriste strujni transformatori koji se

postavljaju oko elektrode (prstenasti transformatori), a na njihovim izvodima se vezuju specijalni analogni ili digitalni merni uređaji. U toku procesa zavarivanja u prstenastom transformatoru se indukuje električna struja čija jačina zavisi kako od struje zavarivanja tako i od broja navojaka u prstenu. Odgovarajućim baždarenjem svakog mernog prstena moguće je na ampermetru registrovati efektivnu jačinu struje u sekundarnom kolu aparata za zavarivanje.

Sila pritiska može se izmeriti pomoću mehaničkih dinamometara, hidrauličkih dinamometara, mernih traka ili direktnim očitavanjem pritiska komprimovanog vazduha za pomeranje elektroda. Zavisnost između pritiska vazduha očitano na manometru ugrađenom kod većine aparata za zavarivanje i sile pritiska dovedene na elektrode, utvrđuje se merenjem sile pri različitim pritiscima vazduha. Pomoću mernih traka na nosačima elektroda može se meriti promena sile pritiska u fazi formiranja sočiva.

Za merenje jačine struje, vremena i sile pritiska postoje savremeni univerzalni merni uređaji koji pored navedenih parametara mogu meriti i druge električne veličine bitne za kvalitet izvedenih spojeva.

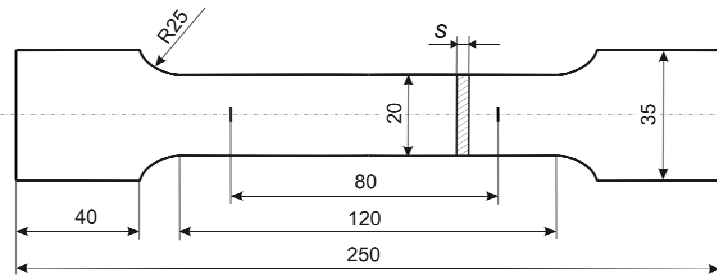
### **3. ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA OSNOVNOG MATERIJALA**

Čelici za karoserije automobila izrađuju se najčešće od tankih niskougljeničnih čeličnih limova namenjenih plastičnoj preradi. Imaju veoma nizak sadržaj ugljenika (oko 0.1% C), a podesni su za izvlačenje, savijanje i utiskivanje. Površina ovih limova je veoma pogodna za nanošenje boja, lakova, metalnih prevlaka, što u slučaju školjki automobila ima poseban značaj. Zavarljivost ovih limova topljenjem, s obzirom na mali sadržaj ugljenika, je veoma dobra. Mikrostruktura limova sastoji se od svetlih žilavih zrna ferita između kojih su smeštena ostrvca perlita [1, 2].

Na kvalitet zavarene tačke veliki uticaj imaju: jačina lima, tvrdoća lima, stepen hladne obrade lima, stanje površine i druge osobine lima koji se zavaruje. S obzirom na vrlo složen tehnološki postupak dobijanja karoserijskog lima veoma je teško obezbediti stabilnost kvaliteta od proizvođača. Ovo je delimično i posledica što odgovarajući standardi za kvalitet lima propisuju samo minimalne odnosno maksimalne vrednosti mehaničkih karakteristika.

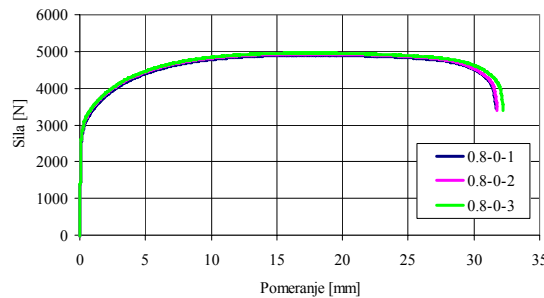
Standardna ispitivanja limova pri proizvodnji i preradi uglavnom se zasnivaju na ispitivanju zatezanjem, određivanju hemijskog sastava, metalografskom ispitivanju mikrostrukture, kontroli tvrdoće, proveru dubokog izvlačenja i stanja površine. Pored navedenih karakteristika, za definisanje kvaliteta lima, u novije vreme sve veći značaj imaju vanstandardni pokazatelji, kao što je stepen deformacionog ojačanja ( $n$ ) i koeficijent anizotropije ( $r$ ) [8]. Najznačajnije karakteristike lima koje se u ovom radu razmatraju, određene su laboratorijskim ispitivanjima.

Pri ispitivanju zatezanjem (JUS C.A4.002) određuje se veliki broj karakteristika materijala bitnih za ocenu sposobnosti lima za duboko izvlačenje. Za ovo ispitivanje potrebno je dosta vremena i materijala, pogotovu ako se probni uzorci seku pod različitim uglovima. U našem slučaju probne uzorke smo sekli iz table lima u tri pravca: u pravcu valjanja lima ( $0^\circ$ ), pod uglom  $45^\circ$  u odnosu na pravac valjanja lima i upravno na pravac valjanja lima ( $90^\circ$ ). Izgled epruveta na kojima je obavljeno ispitivanje prikazan je na slici 3.

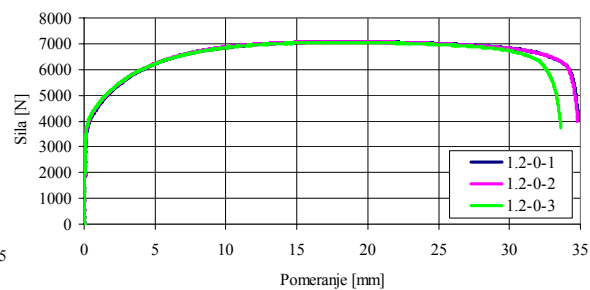


Slika 3. Izgled i dimenzije epruvete za određivanje mehaničkih karakteristika materijala

Cilj ovih ispitivanja je provera neujednačenosti osobina (anizotropije) materijala u različitim pravcima, do koje kod limova dolazi prvenstveno pod uticajem njihove proizvodnje (valjanja). Anizotropija u ravni lima najčešće se uzima u obzir na taj način, što se po određivanju date karakteristike u pravcu valjanja, normalno na njega i pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na te pravce, nalazi srednja karakteristika, kao:  $X = (X_{0^\circ} + 2X_{45^\circ} + X_{90^\circ})/4$ , pri čemu se indeksi odnose na pravce sečenja u odnosu na pravac valjanja. Ispitivanja zatezanjem izvedena su na mehaničkoj kidalici i na savremenoj mašini za ispitivanje na sobnoj i povišenim temperaturama (Zwick/Roell Z100). Srednje vrednosti dobijenih rezultata ispitivanja zatezanjem prikazane su u tablici 2, a na slikama 4 i 5 su prikazane grafičke zavisnosti sila-pomeranje za dve različite debljine lima i za samo dva karakteristična pravca valjanja [1].



Slika 4. Dijagram sila - pomeranje  
( $s = 0.8 \text{ mm}$  - Č0146P3 -  $0^\circ$ )



Slika 5. Dijagram sila - pomeranje  
( $s = 1.2 \text{ mm}$  - Č0148P3 -  $0^\circ$ )

Tablica 2. Najvažnije mehaničke karakteristike ispitivanih materijala-Č0146P3 (srednje vrednosti) [1]

Materijal	Ugao, $^\circ$	$R_p$ , MPa	$R_m$ , MPa	$R_p/R_m$ , -	A, %	n, -	r, -	$E$ , MPa
$s = 0.8 \text{ mm}$	$0^\circ$	179.13000	305.07333	0.58717	39.74000	0.20367	1.86700	185300
	$45^\circ$	193.49000	314.93333	0.61438	36.98000	0.19533	1.54600	207200
	$90^\circ$	187.63667	302.29667	0.62070	38.38000	0.19433	2.27567	194466
	$X_{sr}$	188.43667	309.30916	0.60916	38.02000	0.19716	1.80867	198541
$s = 1.2 \text{ mm}$	$0^\circ$	155.99667	291.10000	0.53589	42.94667	0.22333	1.96200	164233
	$45^\circ$	155.82667	297.18000	0.52435	40.41667	0.22000	1.65667	193166
	$90^\circ$	153.70000	285.62667	0.53811	41.22333	0.21867	2.36300	173266
	$X_{sr}$	155.33750	292.77167	0.53067	41.25084	0.22050	1.90958	180958

#### 4. IZBOR 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 preklopni spojevi od dva lima iste debljine ( $s= 0.8$  i  $1.2$  mm), početni parametri zavarivanja birani su na osnovu preporuka datih u tablici 1. Posle preklopnog tačkastog zavarivanja epruveta - uzoraka, ( $20 \times 100$  mm za  $s= 0.8$  mm i  $25 \times 100$  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 3.

Tablica 3. Parametri tačkastog zavarivanja ("srednji" režim) [1, 2, 3, 6, 9]

Debljina lima, mm	Parametri tačkastog zavarivanja				
	$d_e$ , mm	$I_z$ , A	$t_z$ , per	$F_z$ , daN	$F_r$ , daN
0.80	5.5	6600	14	125	430
1.20	6.2	8000	20	180	720

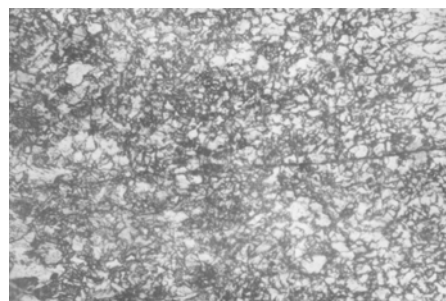
Pri zatezanju zavarenih spojeva sile razaranja bile su znatno veće od preporučenih. U slučaju spojeva ostvarenih od limova debljine  $s= 0.8$  mm vrednosti sile razaranja bile su: 450, 452, 463, 433, 461, 454, 469, 470, 476 i 480 daN (10 zavarenih uzoraka). U slučaju spojeva ostvarenih od limova debljine  $s= 1.2$  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 ZAVARENIH SPOJEVA

Mikrostruktura je određivana na metalografskim šlifovima, pripremljenim iz tačkasto zavarenih spojeva. Mikrostruktura metala tačke ocenjena je kao Vidmanštetenova, dok su mikrostrukture O.M. i ZUT-a prikazane na slici 6 [1, 2].



O.M. - Sitnozrna, pretežno feritna struktura sa neznatnim učešćem perlita (200 $\times$ )



ZUT - usitnjena, normalizovana feritna struktura sa neznatnim učešćem perlita (200 $\times$ )

Slika 6. Mikrostruktura pojedinih zona tačkasto zavarenog spoja

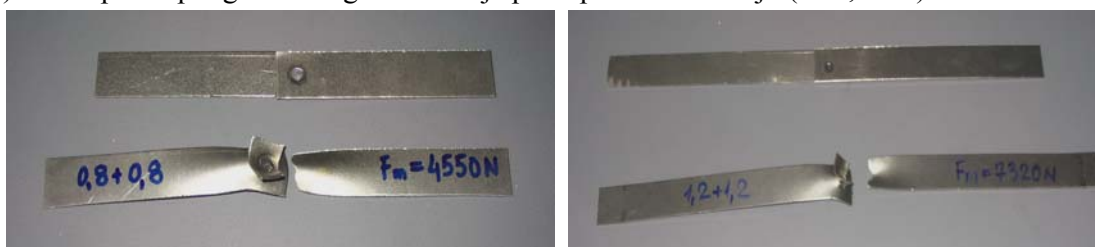
Posle ispitivanja zatezanjem, vizuelne kontrole i metalografskih ispitivanja, može se zaključiti da zavareni spojevi zadovoljavaju tehničke zahteve i interne fabričke propise, a dubina otiska i geometrijske mere ostvarenih tačaka ispunjavaju tražene zahteve [8]. Sva naredna ispitivanja izvedena su sa optimalno utvrđenim režimima zavarivanja.

#### 6. MEHANIČKA ISPITIVANJA TAČKASTO ZAVARENIH SPOJEVA

##### 6.1 Ispitivanje zatezanjem preklopno tačkasto zavarenih spojeva

Posle određivanja mehaničkih svojstava OM i usvajanja režima tačkastog zavarivanja,

pristupilo se elektrootporskom tačkastom zavarivanju 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 (tab. 4 i 5). Posle preklopnog tačkastog zavarivanja pristupilo se zatezanju (sl. 7, 8 i 9).



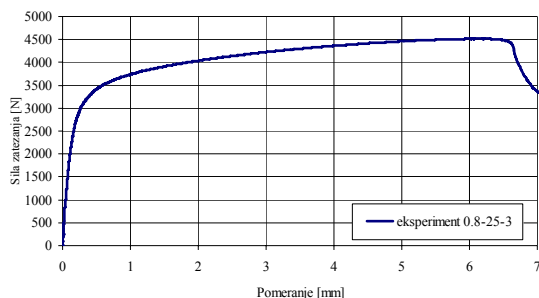
Slika 7. Izgled epruveta pre i posle kidanja (0.8+0.8) i (1.2 + 1.2) mm

Tablica 4. Vrednosti maksimalne sile zatezanja tačkasto zavarenih spojeva različite širine ( $s= 0.8 \text{ mm}$ )

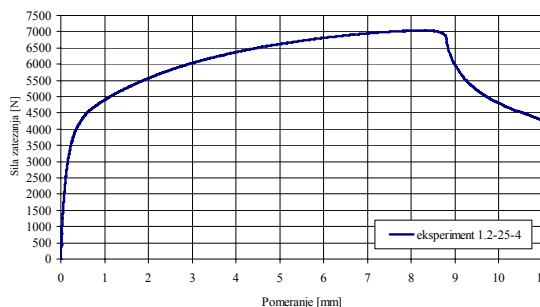
Širina lima, mm	Vrednosti sile zatezanja					
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>
20	422.4	437.8	411.4	411.4	427.9	411.4
25	469.7	454.3	448.8	448.8	-	-
30	480.7	480.7	469.7	469.7	464.2	-
35	480.7	469.7	486.2	464.2	-	-
40	486.2	491.7	491.7	-	-	-
45	491.7	486.2	491.7	-	-	-
50	507.1	523.6	518.1	512.6	-	-

Tablica 5. Vrednosti maksimalne sile zatezanja tačkasto zavarenih spojeva različite širine ( $s= 1.2 \text{ mm}$ )

Širina lima, mm	Vrednosti sile zatezanja					
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>
25	756.8	683.1	730.4	704.0	-	-
30	788.7	778.8	794.2	816.2	-	-
35	816.2	848.1	848.1	837.1	-	-
40	863.5	863.5	858.0	869.0	-	-
45	895.4	917.4	895.4	-	-	-
50	927.3	932.8	917.4	-	-	-



Slika 8. Dijagram sila - pomeranje; zatezanje tačkasto zavarene epruvete debljine 0.8 mm i širine 25 mm



Slika 9. Dijagram sila - pomeranje; zatezanje tačkasto zavarene epruvete debljine 1.2 mm i širine 25 mm



## 6.2 Ispitivanje uvijanjem (torzijom)

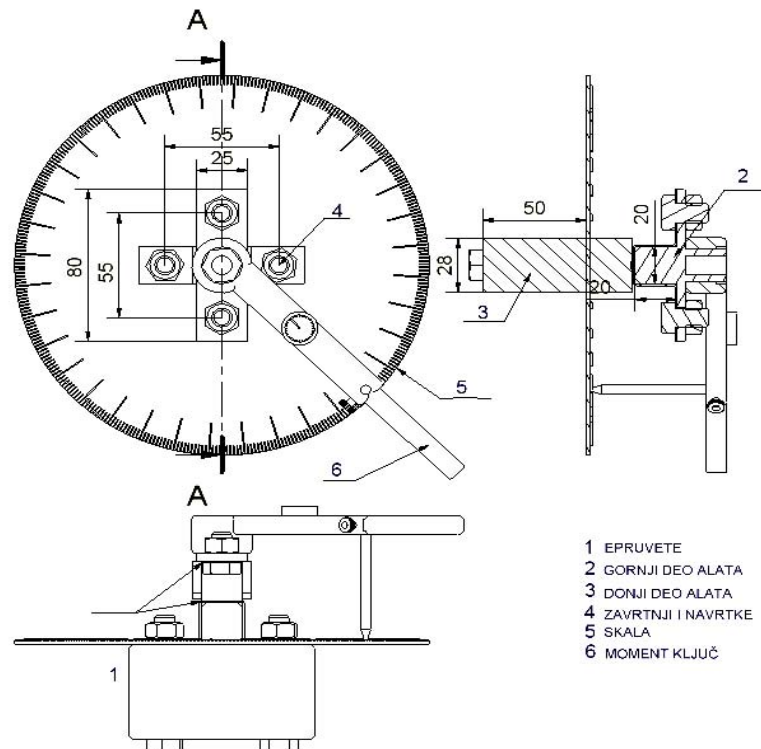


Slika 10. Izgled krstasto zavarenih epruveta različite debljina

Za potrebe ispitivanja uvijanjem krstasto zavarenih spojeva (sl. 10) 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 najpre uvijane pomoću improvizovanog (priručnog) alata. Na taj način je proveravan moment uvijanja i prečnici sočiva.

Zatim je za potrebe modifikacije i unapređenja ove nove originalne metode kontrole sa razaranjem, konstruisan i izrađen specijalni alat (sl. 11) pomoću kojeg se posredno proverava kvalitet tačkasto zavarenog

spoja (direktnim merenjem momenta uvijanja i veličine deformacije-ugla uvijanja). Primenom ove metode, tzv. "metode na moment uvijanja", ustanovljene su granične vrednosti momenta torzije za datu vrstu spoja, odnosno debljinu zavarivanih uzoraka kojima se proverava kvalitet ostvarenog spoja. Komparacijom dobijenih rezultata ove probe, sa rezultatima proba na zatezanje i metalografskom metodom, uočava se velika podudarnost dobijenih rezultata. Ova metoda kao efikasno sredstvo kontrole mogla bi biti široko prihvaćena i u pogonima, kako pri izboru optimalnih parametara zavarivanja tako i pri proveru postojećih tehnologija.



Slika 11. Sklopni crtež alata za uvijanje krstasto zavarenih epruveta [1]

U tablici 6 date su izmerene vrednosti momenata torzije i ugla uvijanja, a na slici 12 prikazan je jedan razoreni tačkasto zavareni krstasti spoj. Prema obliku prekida spoja, kao i prema izmerenom momentu može se ustanoviti najpovoljniji režim zavarivanja.

Tablica 6. Ispitivane vrednosti momenta torzije za epruvete debljine  $s=0.8\text{ mm}$  i  $s=1.2\text{ mm}$  [1]

Broj ispitivanja	$s=0.8\text{ mm}$		$s=1.2\text{ mm}$	
	Ugao, °	Moment torzije, Nm	Ugao, °	Moment torzije, Nm
1	95	17	90	40
2	93	20	108	38
3	88	19.8	155	37
4	101	20	100	35
5	87	19	145	32
6	86	22	120	35
7	81	19	132	36
8	102	22	150	35
9	90	20.5	112	37



Slika 12. Izgled razorenog krstato zavarenog tačkastog spoja ( $s=1.2\text{ mm}$ )

## 7. ZAKLJUČAK

Provera kvaliteta tačkasto zavarenog spoja izvedena „metodom na moment uvijanja“ ukazuje na minimalne granične vrednosti momenta uvijanja izmerene razaranjem ostvarenog tačkastog spoja. Pored momenta uvijanja, pomoću izbaždarene podele moguće je registrovati ukupni ugao uvijanja–od momenta početka uvijanja (elastične deformacije) do potpunog otkopčavanja tačkasto zavarenog spoja. Ugao uvijanja može se po analogiji sa ispitivanjem na zatezanje poistovetiti sa veličinom deformacije. Dakle, kao kriterijum kvaliteta tačkasto zavarenog spoja, pored navedenih metoda kontrole, može se usvojiti i vrednost momenta torzije. Ostvarena vrednost momenta uvijanja može se povezati sa silom kidanja tačkasto zavarenog spoja, odnosno prečnikom sočiva otkopčane tačke.

Budući da je pri ovim ispitivanjima, broj uzoraka bio relativno mali, za izvođenje pouzdanijeg zaključka, moguće je uspostaviti korelaciju između pomenutih veličena, a ova nova metoda bi pritom mogla biti šire zastupljena ne samo pri laboratoriskim, već i proizvodnim-radioničkim uslovima. Na ovaj način bi se ubrzao postupak određivanja najpovoljnijih parametara tačkastog zavarivanja.

## 8. LITERATURA

*Teze*

- [1.] Vuković, M: Eksperimentalna ispitivanja i numerička analiza čvrstoće tačkasto zavarenih spojeva i konstrukcija, magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2006.

[2.]Lazić, V.: Prilog proračunu temperaturnih polja pri tačkastom zavarivanju, magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 1990.

[3.]Janota, M.: Procesy a riadenie odporoveho zvarania, Bratislava, 1985.

*Knjige*

[4.]Metals Handbook: Welding and brazing ASM, Metals Park Ohio, USA, 1979.

[5.]Majstorović, A., Jovanović, M.: Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja, Naučna knjiga, Beograd, 1991.

[6.]Jovanović, M., Adamović, D., Lazić, V.: Tehnologija zavarivanja-priručnik, samostalno autorsko izdanje, Kragujevac, 1996.

[7.]Sedmak, A. i dr.: Mašinski materijali-drugi deo, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.

[8.]Devedžić, B.: Plastičnost i obrada metala deformisanjem, Naučna knjiga, Beograd, 1992.

*Standardi*

[9.]Standardi i prospekti: JUS, DIN, PN, Fiat-Iveco, Zastava, ....