

*Autori: Saša Radivojević<sup>1</sup>, Radule Savić<sup>2</sup>, Goran Ristić<sup>3</sup>  
Koautori: Miko Maljević<sup>4</sup>, Milan Šveljo<sup>5</sup>*

## **ZAVARIVANJE SUČEONIH MONTAŽNIH SPOJEVA SA ODSTUPANJEM OD PROJEKTOVANOG OTVORA ŽLEBA**

### **Rezime:**

U radu je prikazan metodološki pristup u zavarivanju montažnih sučeonih spojeva u slučaju odstupanja dimenzija otvora žleba,  $\Delta b > 9\text{mm}$ , od projektovanog otvora žleba, b, na Žeželjevom mostu preko reke Dunav u Novom Sadu. Zavarivanje se izvodi, rutilno punjenom žicom u zaštiti aktivnog gasa  $\text{CO}_2$ .

*Ključne reči: Žeželjev most, zavarivanje, otvor žleba.*

## **WELDING OF BUT WELDS ON THE CONSTRUCTION SITE WITH A DEVIATION OF DESIGNED GAP**

### **Summary:**

This paper present a methodological approach in welding of butt welds on the construction site of Zezelj bridge across Danube river in Novi Sad with a deviation of designed gap in a groove,  $\Delta b > 9\text{mm}$ . Welding is carried out with a rutile cored wire in the shielding active gas  $\text{CO}_2$ .

*Key words: Zezelj bridge, welding, a gap in a groove.*

---

<sup>1</sup> Dipl.inž.maš. IWE, inženjer za zavarivanje u PC Batajnica, GP Mostogradnja A.D., Beograd

<sup>2</sup> Dipl.inž.maš. IWE, inženjer za zavarivanje u PC Batajnica, GP Mostogradnja A.D., Beograd

<sup>3</sup> Dipl.inž.maš. IWE, rukovodilac odeljenja za zavarivanje u PC Batajnica, GP Mostogradnja A.D., Beograd

<sup>4</sup> Dipl.inž.maš. IWE, direktor PC Batajnica, GP Mostogradnja A.D., Beograd

<sup>5</sup> Dipl.inž.grad. IWE, inženjer u pogonu montaže u PC Batajnica, GP Mostogradnja A.D., Beograd

# 1. PRIPREMA ZA ZAVARIVANJE ČELIČNE KONSTRUKCIJE ŽEŽELJEVOG MOSTA

## 1.1 Opšte

Priprema i izvođenje zavarivanja novog Žeželjevog mosta izvodi se u skladu sa sledećim normama: EN 1090-2:2008, DIN 18800-7:2008, Ril 804:2003, uzimajući u obzir da je klasa konstrukcije EXC4, a kvalitet zavarenih spojeva zahtevan za ovakav tip konstrukcije.

Na Žeželjevom mostu svi motažni spojevi su sučeoni sa potpunim provarivanjem. Opseg debljina limova koji se spajaju zavarivanjem je 8mm – 50mm, te je predgrevanje korišćeno u značajnom obimu.

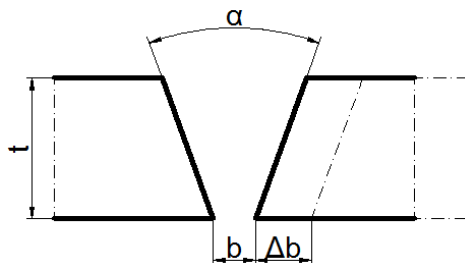
## 1.2 Priprema žlebova za zavarivanje

Priprema za zavarivanje izvodi se prema primenjenom postupku zavarivanja. Obzirom na neophodne kvalifikacije zavarivanja, priprema žlebova za zavarivanje i ispitivanja moraju biti ista i u skladu sa obavezujućim normama. Oblici žlebova treba da odgovaraju i poziciji zavarivanja i pristupačnosti šava.

I pored svih sprovedenih mera za obezbeđivanje kvalitetnog zavarenog spoja mogu se javiti određeni problemi u dimenzijama i oblicima žlebova za zavarivanje, koji mogu uticati na kvalitet zavarenog spoja. Kao jedan od problema može se izdvojiti i problem koji nastaje nakon montaže određenog segmenta mosta, a to je preveliki otvor žleba, odnosno otvor žleba veći od projektovanog.

U slučaju pripreme žlebova za montažne sučeone spojeve i odstupanja  $\Delta b$  od projektovanog otvora žleba  $b$ , važe zahtevi Ril 804:2003, 804.4101 koji je naveden u tehničkim specifikacijama glavnog projekta. Njime su propisani slučajevi odstupanja dimenzija otvora žlebova i utvrđeni nivoi odlučivanja za njihovo ispravljanje:

- $\Delta b \geq 3\text{mm}$ : Koordinator zavarivanja utvrđuje potrebne mere uz svoju odgovornost;
- $3\text{mm} < \Delta b \leq 6\text{mm}$ : Inženjer za zavarivanje utvrđuje potrebne mere i to dokumentuje u pisanom obliku u uputstvu za zavarivanje;
- $6\text{mm} < \Delta b \leq 9\text{mm}$ : Inženjer za zavarivanje utvrđuje potrebne mere i to dokumentuje u pisanom obliku, ali uz obaveznu saglasnost nadzorne službe.
- $\Delta b > 9\text{mm}$ : Potrebne mere se definišu u saradnji sa nadzornom službom i uz povećan obim ispitivanja, u koliko je to neophodno.



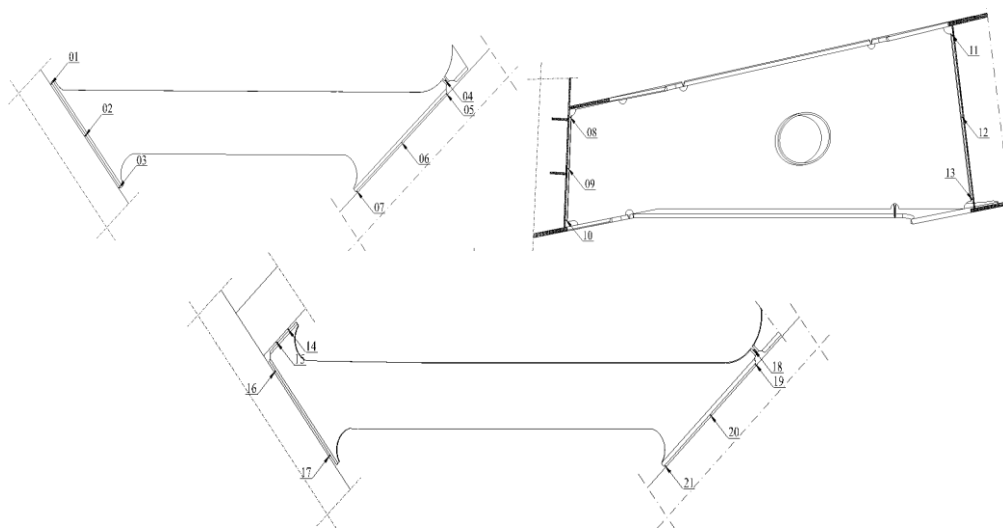
Slika 1 – Odstupanje od projektovanog otvora žleba.

## 2. IZVOĐENJE ZAVARIVANJA SUČEONIH MONTAŽNIH SPOJEVA SA ODSUPANJEM OD PROJEKTOVANOG OTVORA ŽLEBA

Čelici koji su projektom određeni za ugradnju na konstrukciji mosta pripadaju grupi nelegiranih konstrukcionih čelika (EN 10025-2). Odabrani materijali su dobro zavarljivi i sa niskom vrednošću ekvivalentnog ugljenika, CE. Na osnovu zadatih vrsta čelika, debljina limova i položaja za zavarivanje konstrukcije na montaži, GP Mostogradnja AD je izradila kvalifikacije svih predviđenih postupaka zavarivanja (pWPS) vršeci zavarivanje probnih uzoraka i sva standardima predviđena ispitivanja. Svi neophodni parametri dati su u odgovarajućim tehnološkim listama tehnologije zavarivanja (WPS), a u radu su prikazani oni koji utiču na kvalitet zavarenog spoja sa povećanim otvorom žleba.

### 2.1 Dimenziona kontrola

Pre početka zavarivanja bilo kog sučeonog spoja neophodno je izvršiti kontrolisanje dimenzija i oblika žleba. Merenje otvora žleba se izvodi pomoću pomičnog kljunastog merila, merenjem u više tačaka po dužini spoja. U slučajevima kada se utvrdi da dimenzije žlebova odstupaju od dimenzija datih projektom, na osnovu izveštaja kontrole, utvrđuju se potrebne mere za izvođenje zavarivanja ovakvih spojeva kao što je objašnjeno u tački 1.2. Na Slici 2 prikazan je, kao primer, jedan element sa mernim tačkama u spoju, a u Tabeli 1 su prikazani rezultati merenja.



Slika 2 – Element sprega sa mernim tačkama.

Tabela 1 – Rezultati merenja dimenzija i oblika žleba

Merna tačka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zazor (mm)	16	19	24	9	7	6	10	7,5	8	11	8	8	7,5
Smaknuće (mm)	1	1	0,5	0	1	1,5	0	-	-	0	0	0,5	0

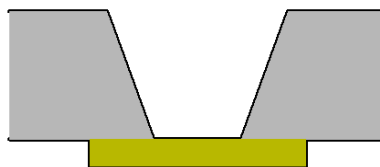
Kao što se iz Tabele 1 može zaključiti, u tačkama 1, 2 i 3 otvor žleba je veći od projektovanog za više od 9 mm, te se ovaj spoj izvodi prema tehnologiji opisanoj u tački 2.2. Na slici 3 može se videti primer dimenzione kontrole jednog spoja sa odstupanjem od projektovane geometrije žleba.



*Slika 3 – Izmereni otvor žleba na jednom od montažnih spojeva.*

## **2.2 Parametri zavarivanja**

Spojevi sa velikim otvorima u žlebu zavaruju se na keramičkim podloškama. U zavisnosti od tipa spoja i veličine otvora žleba na Žeželjevom mostu se koriste i različiti tipovi keramičkih podloški. Za otvore koji su značajno veći u odnosu na projektovane, na gradilištu se koriste ravne keramičke podloške širine 50,8 mm. Jedan takav model prikazan je na Slici 4. Moguće je koristiti i ravnu keramiku sa žlebom širine 25mm, međutim ovaj postupak je složeniji i neće se biti predmet razmatranja ovog rada.



*Slika 4 – Skica žleba sa ravnom keramičkom potkorenom trakom.*

Parametri zavarivanja, su dati u odgovarajućim WPS listama Tehnologije zavarivanja na ukрупnjavanju konstrukcije Žeželjevog mosta, a provereni su tokom kvalifikacije tehnologije koja je vršena u fabrici čeličnih konstrukcija u Batajnici. Zavarivanje se izvodi rutilno punjenom žicom u zaštiti aktivnog gasa CO<sub>2</sub>. Pored velike produktivnosti, punjene žice imaju veliku otpornost na apsorpciju vlage i daju nizak sadržaj vodonika u metalu šava te su pogodne za zavarivanje na otvorenom prostoru [1].

**Tabela 2 – Parametri zavarivanja**

Br. Spoja	Prečnik žičane elektrod e(mm)	Sl. kraj žice (mm)	Zaštit. gas (l/min)	Jačina struje (A)	Napon (V)	Brzina dodavanja žice (cm/min)	Brzina zavarivanja (cm/min)	Uneta količina toplote (kJ/cm)
1-n	1,2	15-20	10-15	185	26,5	300	12,5	20,5
n+ 1 – m	1,2	15-20	10-15	215- 220	28,5	350	25,7-15,9	12,9- 19,6
m+ 1 - z	1,2	15-20	10-15	230- 250	29,5	380	33,2-22,8	11,2- 16,5

U Tabeli 2 prikazani su parametri zavarivanja koji su se koristili upravo za izvođenje spojeva sa velikim otvorom žleba. Prikazani parametri se odnose na PA položaj zavarivanja prema Tehnologiji zavarivanja broj 02/13 [2].

Dotadni materijal koji je izabran za zavarivanje čelika S355J2/K2+N je rutilno punjena žica i njene karakteristike su date u tabelama 3 i 4. Oznake i karakteristike elektrodne žice usvojeni su prema standardu EN 758 (EN 17632 - A).

**Tabela 3 – Hemijske karakteristike čistog metala šava**

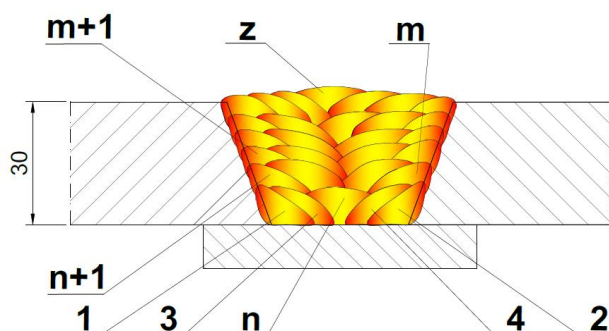
Žičana elektroda	C (%)	Si (%)	Mn (%)
T 42 P C 1 H5	0,04 -0,08	0,30 – 0,60	1,00 – 1,40

**Tabela 4 – Mehaničke karakteristike čistog metala šava**

Žičana elektroda	Gornji napon tečenja, Reh(N/mm <sup>2</sup> )	Zatezna čvrstoća, Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Izduženje, A <sub>5</sub> min %	Žilavost KV, (J)
T 42 P C 1 H5	□ 420	500-640	20	47(-20°C)

### 2.3 Redosled i postupak izvođenja zavarivanja

Redosled nanošenja zavara prikazan je na Slici 5, gde se vidi da zavarivanje počinje sa izvođenjem zavara od 1 do n. Bitno je naglasti da je najpovoljniji redosled izvođenja zavara takav da se prvo uvaruju obe ivice žleba, a zatim se simetrično nanose navari sve do poslednjeg zavara koji treba da bude na sredini keramičke podloške. Na ovaj način se vrši ravnomerno raspoređivanje toplote i kontrolisano hlađenje prethodnih zavara. Nakon toga se izvode zavari od n+1 do m i zavari od m+1 do z sa parametrima datim u Tabeli 2.



Slika 5 – Redosled zavarivanja spoja sa odstupanjem od projektovanog otvora žleba

Naglašava se da zavarivanje žleba sa otvorom većim od onog koji standard propisuje, zahteva povećani utrošak dodatnog materijala, a samim tim i veću količinu unete toplote po jedinici zapremine zavarenog spoja. Da bi se sprečile neželjene posledice kao što su povećanje poprečnog i podužnog skupljanja metala šava, deformacije, nekontrolisan rast zrna u strukturi materijala i pojava zakaljene strukture, neophodno je kontrolisano vršiti unos toplote u zavareni spoj strogim poštovanjem parametara zavarivanja. Takođe je potrebno i da međuslojna temperatura između svakog pojedinog zavara ne prelazi 250°C (temperatura plavog loma) kako bi se izbegla mogućnost pojave prslina.

Zavarivanje ovakvih spojeva izvodi se u više prolaza kao što je i prikazano na Slici 5, praktično navarivanjem na prethodno postavljenu keramičku podlošku uz obavezno predgrevanje i kontrolisano hlađenje svakog zavara. Međuprolazna temperatura ne sme biti manja od 50°C jer se sa malim unosom toplote može pojaviti zakaljena struktura - martenzitna struktura.

Nakon završenog zavarivanja mogu se u naličju, tj. korenu zavarenog spoja javiti veća odstupanja od dozvoljenih za klasu kvaliteta spoja B+ (EN 1090-2, tabela 17). Prevažodno se misli na neuvarene ivice žleba, zajede, međuslojne zajede i nadvišenje naličja šava, koje često može biti konkavnog oblika što je nedostatak rada na ravnoj keramici bez žleba.

Do ovog problema dolazi i kada usled loše pripreme geometrije spoja u probnoj montaži nije moguće izvršiti pravilno postavljanje keramičke podloške ili ukoliko se ne izvrši pravilno postavljanje magnetnih držača koji sprečavaju dislokaciju potkorene trake usled promena temperature i progorevanja.

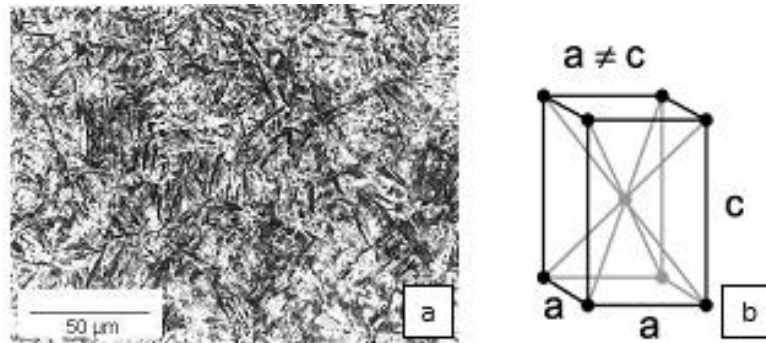
U navedenim slučajevima neophodno je izžlebiti koren na dubini od 5-7mm, izbrusiti površinu do metalnog sjaja i izvesti popunu E postupkom u nadglavnom PE položaju zavarivanja bazičnom elektrodom, propisanom tehnologijom zavarivanja. Tokom izvođenja ove aktivnosti, takođe je neophodno predgrevanje spoja.

U slučaju da postoji potreba za povećanjem obima ispitivanja, Nadzor, odnosno Inženjer može zahtevati i međufazno ispitivanje penetrantima nakon žljebljenja i brušenja korenog zavara, kako bi se utvrdilo da li je dubina žljebljenja dovoljna i da li postoje mikroprslinae.

Kada se počne sa zavarivanjem spoja sa velikim otvorom u žlebu, neophodno je da se spoj zavaruje bez prekida do 1/3 poprečnog preseka spoja. Od velike važnosti je da se zavarivanje ovakvih spojeva dobro isplanira kao i da se pozicija rada obavezno zaštiti od atmosferskih uticaja kako bi se izbegla pojava prslina tokom hlađenja zavara.

## 2.4 Metalurški proces tokom izvođenja zavarivanja

Martenzit je čvrsti mikrokonstituent čelika koji se formira brzim hlađenjem austenita, toliko brzim da atomi ugljenika nemaju dovoljno vremena da difunduju. Uopšteno gledano martenzit je prezasićeni čvrsti rastvor ugljenika u  $\alpha$ -železu. Na Slici 6 se može videti nepovoljna igličasta struktura kao i deformisana kristalna rešetka usled koje dolazi do pogoršanja mehaničkih karakteristika zavarenog spoja za ovaj tip konstrukcije [3].



Slika 6 – a) Mikroskopski prikaz martenzitne strukture; b) kristalna rešetka martenzita

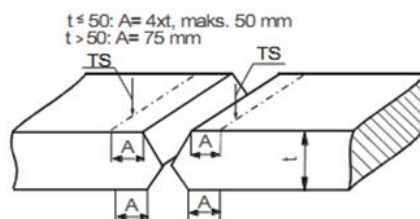
Pojavom martenzita, odnosno zakaljene strukture u zavarenom spoju, dolazi do pada žilavosti, tj. smanjenja plastične deformacije zavarenog spoja, materijal postaje krto i podložan pojavi hladnih prslina. S druge strane, potrebno je voditi računa da sa povećanjem unosa toplote u zavareni spoj (povećani parametri zavarivanja) dolazi do porasta zrna u kristalnoj rešetki i pada mehaničkih karakteristika. Dakle, da bi se izbegla mogućnost pojave zakaljene strukture neophodno je pratiti uputstva i parametre propisane tehnologijom zavarivanja (maksimalno odstupanje parametara ne sme biti veće od 20%) uz obavezno predgrevanje limova u spoju debljina većih od 30mm.

## 2.5 Merenje temperature predgrevanja tokom izvođenja zavarivanja

Zavisno od debljine osnovnog materijala i ekvivalentnog ugljenika (CE), temperatura predgrevanja je različita i usvaja se na osnovu standarda SRPS EN 1011-2. Tačke u kojima se vrši merenje temperature određene su prema standardu EN ISO 13916. Na Žeželjevom mostu pored predgrevanja gasnim gorionikom zastupljeno je i indukciono predgrevanje.

Slika 7. prikazuje pravilan raspored mernih tačaka za merenje temperature predgrevanja. Ukoliko se predgrevanje vrši gasnim gorionikom temperatura predgrevanja je kontrolisana termo kredama i termometrima: kontaktnim, digitalnim i laserskim.

Indukcioni uređaji za predgrevanje koji su korišćeni na izgradnji Žeželjevog mosta imaju svoje termo-sonde koje su povezane na upravljačku jedinicu mašine za predgrevanje i u svakom trenutku moguće je očitati trenutnu temperaturu u spoju tokom zavarivanja.



Slika 7 – Raspored mernih tačaka za predgrevanje

### 3. KONTROLA KVALITETA SUČEONIH MONTAŽNIH SPOJEVA SA ODSUPANJEM OD PROJEKTOVANOG OTVORA ŽLEBA

Nakon izvršenog zavarivanja, pristupa se vizuelno dimenzionoj kontroli spoja, a zatim i proveru homogenosti zavarenog spoja nekom od metoda bez razaranja. Nivo ispitivanja zavarenih spojeva na konstrukciji mosta propisan je standardom EN 1090-2 za klasu konstrukcije EXC4 i kvalitet zavarenog spoja B+. Dodatni zahtevi za B+ kvalitet prikazani su tabeli 17 navedenog standarda. Projektom je zahtevano da se ispitivanje svih sučeonih spojeva konstrukcije mosta izvodi ultrazvučnom metodom, kao jednom od metoda bez razaranja za utvrđivanje homogenosti spojeva i nedozvoljenih grešaka u zavarenom spoju. Projektom je zahtevan obim UZ ispitivanja od 100%. Pored ove metode na gradilištu je vršena i vizuelna kontrola u obimu od 100% i kontrola penetrantima u obimu od 20%.

Po završetku zavarivanja spoj treba pripremiti za ispitivanje ultrazvukom i otkloniti sve nedostatke na spoju i u zoni oko spoja kako bi zavareni spoj bio spreman za predaju investitoru u zahtevanom kvalitetu, B+.

### 4. ZAKLJUČAK

Prilikom ukрупnjavanja i montaže složenih čeličnih konstrukcija kao što je Žeželjev most, nije uvek moguće na svim spojevima postići projektovanu geometriju žlebova. U najvećem broju slučajeva do odstupanja dolazi usled grešaka nastalih tokom izrade i probne montaže elemenata konstrukcije u fabrici proizvođača. Sve greške nastale u izradi moraju biti otklonjene u montaži kako bi se konstrukcija dovela u projektovanu geometriju.

Pravilnim izborom tehnologije zavarivanja i poštovanjem redosleda zavarivanja moguće je izvesti zavarene spojeve koji imaju standardom ne dozvoljena odstupanja u geometriji žleba, tako da se obezbedi potreban kvalitet svih zavarenih spojeva, bez negativnih uticaja na geometriju mostovske konstrukcije.

### LITERATURA

- [1] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: *Mašinski materijali II deo*, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000
- [2] Ristić, G., Savić, R.: *TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA broj 02/13 na ukрупnjavanju konstrukcije luka raspona 220m (OSE 3B-4) železničko drumskog mosta preko reke Dunav "Žeželj" Novi Sad*. GP Mostogradnja A.D., Beograd, 2013
- [3] <http://www.threepines.net/martensite.html>