



Radimir Jovičić<sup>1</sup>, Radica Prokić Cvetković<sup>2</sup>, Olivera Popović<sup>2</sup>, Nenad Milošević<sup>2</sup>

## METODE ZA IZRAČUNAVANJE TEMPERATURA PREDGREVANJA PRI ZAVARIVANJU ČELIKA POVIŠENE I VISOKE ČVRSTOĆE METHODS FOR CALCULATING THE PREHEAT TEMPERATURE WELDING THE HIGH STRENGTH STEELS

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

**Rad primljen / Paper received:**

Septembar 2016.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

**Ključne reči:** metode za proračun temperatura predgrevanja, vreme hlađenja  $t_{8/5}$ , čelici

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup> Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Srbija [rjovicic@mas.bg.ac.rs](mailto:rjovicic@mas.bg.ac.rs)

<sup>2</sup>Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, Srbija

**Key words:** methods for calculation of preheating temperature, cooling time  $t_{8/5}$ , steels

**Abstract:** With preheating of steel the cooling speed of a heat affected zone decreases, which prevents appearance of structure prone to cold cracks. On the other hand, too small cooling speed, in this area, results with growth the metal grains which, also, leads as to the higher prone to cracks. Common used method for calculation of preheating temperature for high strength steels are Itto – Bessyo method, and method by standard SRPS EN 1011-2. This paper presents the methods for calculating the preheating temperature of micro alloyed steel P460 NL1. Analysis of the results obtained from both methods shows significant differences in the amounts calculated preheat temperature. It was concluded that both methods have limitations that must be taken into account in their application in practice.

### UVOD

Predgrevanje čelika povišenih i visokih čvrstoća pred zavarivanje ima višestruki pozitivni uticaj na osobine njihovih zavarenih spojeva [1]. Predgrevanje usporava hlađenje zavarenih spojeva zbog čega se u metalu šava (MŠ) i naročito u zoni uticaja toplote (ZUT) dobijaju strukture koje su manje sklone zakaljivanju, stvaraju se pogodni uslovi za oslobađanje gasova iz MŠ, čime se smanjuje verovatnoća pojave poroznosti i smanjuje se količina rastvorenih gasova u MŠ i ZUT, što je naročito važno kada je u pitanju vodonik. Takođe, zbog smanjenja temperaturnog gradijenta, smanjuju se zaostali naponi. Sve ovo povoljno utiče na smanjenje sklonosti zavarenih spojeva ka pojavi hladnih prslina.

Predgrevanje može da ima i negativan uticaj na osobine zavarenih spojeva, zato što može da poveća njihovu sklonost ka pojavi toplih prslina [1], može da dovede do širenja ZUT, do širenja

**Rezime:** Predgrevanjem čelika se smanjuje brzina hlađenja zone uticaja toplote, čime se izbegava pojava struktura sklonih nastanku hladnih prslina. Sa druge strane suviše mala brzina hlađenja, u ovoj zoni, dovodi do porasta metalnog zrna što, takođe, ima za posledicu povećanje sklonosti ka nastanku prslina. Za izračunavanje temperatura predgrevanja čelika povišenih i visokih čvrstoća koriste se metode Itto – Bessyo i metoda data u standardu SRPS EN 1011-2. U radu su navedene metode primenjene na izračunavanje temperature predgrevanja mikrolegiranog čelika P460 NL1. Analiza rezultata proračuna po obe metode pokazuje značajne razlike u visini izračunatih temperatura predgrevanja. Zaključeno je da obe metode imaju ograničenja, koja se moraju imati u vidu pri njihovoj primeni u praksi.

krupnoznožnog dela ZUT i do rasta zrna u ZUT, što ima za posledicu pad mehaničkih osobina i žilavosti u ovom delu spoja [2]. Predgrevanje i održavanje međuprolazne temperature usporavaju i poskupljuju izradu zavarenih konstrukcija. Zbog toga proizvođači čelika razvijaju nove generacije čelika povišene i visoke čvrstoće kod kojih se temperature predgrevanja snižavaju ili predgrevanje uopšte nije potrebno.

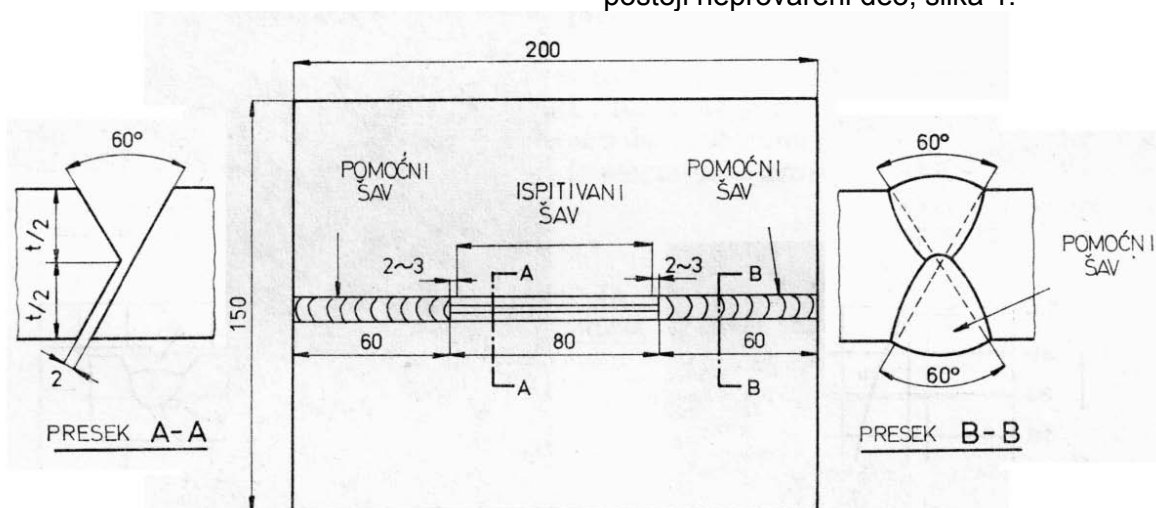
Da bi zavareni spojevi imali osobine koje odgovaraju uslovima eksploatacije, moraju se temperature predgrevanja i međuprolazne temperature, održavati u optimalnom području. Na visinu potrebne temperature predgrevanja i međuprolazne temperature utiču hemijski sastav i mikrostruktura čelika, njegove fizičke osobine, dimenzije i oblik spoja, izabrani postupak zavarivanja, parametri zavarivanja, ambijentalni uslovi itd. Uticaj ovih parametara na visine



navedenih temperatura je definisan različitim računskim metodama. Za izračunavanje temperatura predgrevanja ( $T_p$ ) čelika povišenih i visokih čvrstoća razvijene su metode Itto Bessyo (IB) [1] i metoda definisana u standardu EN 1011-2 (EN) [3].

## 2. METODA ITTO BESSYO

Ova metoda je razvijena na osnovu rezultata ispitivanja Tekken proba [1]. Tekken proba je namenjena za ispitivanje zavarljivosti čelika tj. služi za ispitivanje sklonosti OM i MŠ ka pojavi hladnih prslina pri različitim uslovima zavarivanja. Za Tekken probu je karakteristično da je: dužina ispitivanog šava relativno mala (80 mm), da ispitivani šav očvršćava u uslovima potpuno sprečenog skupljanja i da u korenom delu šava postoji neprovareni deo, slika 1.



Slika 1. Uzorak za ispitivanje sklonosti ka pojavi prslina metodom Tekken

Navedeni uslovi pogoduju pojavi prslina u zavarenom spoju. Mala dužina ispitivanog šava onemogućava povećanje temperature OM usled zagrevanja toplotom, koju oslobađa električni luk. Zbog toga na brzinu hlađenja ZUT tj. vreme hlađenja  $t_{8/5}$  utiče samo toplota uneta predgrevanjem. Pomoćni šavovi onemogućavaju poprečno skupljanje ispitivanog šava zbog čega u njemu, tokom hlađenja, nastaju veliki naponi. Dalje povećanje napona izaziva neprovareni deo u korenu šava. Cilj ispitivanja Tekken metodom je pronalaženje parametara zavarivanja pri kojima se prslina u zavarenom spoju neće pojaviti.

Na osnovu rezultata ispitivanja po Tekken metodi Itto i Bessyo (IB) su izveli empirijske jednačine na osnovu kojih se izračunava  $T_p$ , tabela 1. Metoda IB uzima u obzir hemijski sastav OM, sadržaj difundovanog vodonika i veličinu napona koji deluju na spoj tokom njegovog očvršćavanja. Mala dužina ispitivanog šava, kod Tekken probe, onemogućava da se uoči efekat povećanja temperature OM uz ivicu žleba, zbog zagrevanja toplotom električnog luka. Ovaj efekat se uočava kod dužih spojeva i ima za posledicu produženje vremena hlađenja  $t_{8/5}$  u ZUT.

	Jednačine	Parametri
1	$T_p = 1440 P_w - 392$	$P_w$ – parametar prskanja
2	$P_w = P_{CM} + H/60 + K/40 \cdot 10^4$	$P_{CM}$ – parametar vezan za hemijski sastav čelika H – količina difundovanog vodonika ml/100gr MŠ K – intenzitet ukrućenja
3	$P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + (Mo + V)/15 + 5 B$	% - udeo hemijskih elemenata
4	$K = 1352 d - 14,75 d^2$	d – debljina OM u mm (u slučaju jačeg ukrućenja)
5	$d/600$	(zamenjuje ceo treći član u jednačini (2) u slučaju blažeg ukrućenja)

Tabela 1. Jednačine i parametri za izračunavanje temperatura predgrevanja  $T_p$  po metodi Itto – Bessyo



### 3. METODA PO STANDARDU EN 1011 – 2

Metoda obuhvata uticaj hemijskog sastava i debljine OM, uticaj sadržaja difundovanog vodonika HD i uticaj unosa toplote Q,

pri zavarivanju na  $T_p$  [3]. Temperatura predgrevanja  $T_p$  se izračunava iz zbira temperatura predgrevanja, koje su posledica uticaja pojedinačnih navedenih faktora, tabela 2.

	Jednačine	Parametri
1	$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150$	CET – ekvivalent ugljenika
2	$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$ (%)	% - udeo hemijskih elemenata
3	$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d/35) - 110$	d – debljina OM mm
4	$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100$	HD – sadržaj difundovanog vodonika ml/100 gr
5	$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) Q - 53 \cdot CET + 32$	Q - količina unete toplote KJ/mm
6	$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$	

**Tabela 2.** Jednačine i parametri za izračunavanje temperatura predgrevanja  $T_p$  po metodi datoj u standardu EN 1011 – 2

### 4. PRORAČUN TEMPERATURA PREDGREVANJA I VREMENA HLAĐENJA $t_{8/5}$

Navedene metode za proračun  $T_p$  primenjene su na sučeoni spoj zavaren na čeliku P

460 NL1, debljine 14 mm. Hemijski sastav čelika je određen spektralnom analizom i dat je u tabeli 3.

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
%	0,153	0,380	1,40	0,015	0,0021	0,031	0,037	0,630
Element	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	-
%	0,004	0,061	0,099	0,038	0,004	0,0003	0,0052	

**Tabela 3.** Hemijski sastav osnovnog materijala, P 460 NL1

Spoj je zavaren MIG postupkom. Kao dodatni materijal korišćena je puna žica VAC 65 (AWS ER 70S-6) prečnika 1,2 mm (proizvođač Elektrode Jesenice). Kao zaštitni gas korišćena je mešavina Ar + 5,9% CO<sub>2</sub> + 1,1% O<sub>2</sub>. Zavarivanje je izvedeno na uređaju Kemppi FastMig 350 Pulse, sa dodavačem FastMig MXF 65. Zavaren je spoj dužine 500 mm. Tokom zavarivanja kontinualno su snimani parametri zavarivanja pomoću uređaja Kemppi ARC I.

#### 4.1. Proračun temperature predgrevanja $T_p$ po metodi Itto – Bessyo

Podaci potrebni za proračun  $T_p$  i izračunate vrednosti  $T_p$  za navedeni spoj, po metodi IB, su dati u tabeli 4. Parametar  $P_{CM}$  je izračunat na osnovu jednačine (3), tabela 1. i podataka datih u tabeli 3. Parametar  $P_W$  je izračunat na osnovu jednačine (2), tabela 1. i sadržaja difundovanog vodonika od 5 ml/100gr MŠ [4] i jednačina za dva različita intenziteta ukrućenja, za jače ukrućene spojeve, jednačina (4), tabela 1. i blaže ukrućene spojeve jednačina (5), tabela 1. [5]. Debljina OM je 14 mm. Iz tabele se vidi da povećanje intenziteta ukrućenja tj. ometanja skupljanja spojeva pri hlađenju povećava potrebnu  $T_p$ .

Intenzitet krutosti	$P_{CM}$ (-)	Treći član jednačine (2)	$P_W$ (-)	$T_p$ (°C)
d/600	0,261	0,023	0,367	137
$K = 1352d - 14,75d^2$	0,261	0,040	0,384	161

**Tabela 4.** Temperature predgrevanja  $T_p$  izračunate po metodi Itto – Bessyo



## 4.2. Proračun temperature predgrevanja $T_p$ po metodi datoj u standardu EN 1011 – 2

Podaci potrebni za proračun  $T_p$  i izračunata vrednost  $T_p$  za navedeni spoj, po ovoj metodi su dati u tabeli 5. Parametar CET je izračunat na osnovu jednačine (2), tabela 2. i podataka datih u tabeli 3. Parametri  $T_{pCET}$ ,  $T_{pd}$  i  $T_{pHD}$  su izračunati na osnovu jednačina iz tabele 2. i na osnovu debljine OM od 14 mm i sadržaja difundovanog vodonika od 5 ml/100gr MŠ. Parametar  $T_{pQ}$  je izračunat na osnovu jednačine (5), tabela 2. i količine unete

toplote od 1,25 KJ/mm. Količina unete toplote je izračunata iz jednačine:  $Q = \eta \cdot I \cdot U / (v_z \cdot 1000)$  [KJ/mm]; gde su:  $\eta$  – koeficijent termičkog iskorišćenja za MIG postupak 0,8;  $I$  – jačina stuje zavarivanja A;  $U$  – napon zavarivanja V;  $v_z$  – brzina zavarivanja mm/sec. Parametri za zavarivanje korenog prolaza i prolaza popune navedenog spoja su dati u tabeli 6. Iz tabele 5. se vidi da se, zbog različitih količina unete toplote, parametar  $T_{pQ}$  razlikuje za koreni i prolaze popune. Zato se razlikuju  $T_p$  i međuprolazne temperature, ali ne značajno.

		Jednačine	Parametri	Temp. °C
1	$T_{pCET}$	$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150$	CET = 0,314	+ 85,5
2	$T_{pd}$	$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d/35) - 110$	d = 14 mm	- 49,2
3	$T_{pHD}$	$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100$	HD = 5 ml/100 gr	+ 3,7
4	$T_{pQ}$ - koren	$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) Q - 53 \cdot CET + 32$	Q = 1,25 KJ/mm	- 3,8
5	<b><math>T_p</math> - koren</b>	$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$	-	<b>36,2</b>
6	$T_{pQ}$ - popuna	$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) Q - 53 \cdot CET + 32$	Q = 1,31 KJ/mm	- 4,5
7	<b><math>T_p</math> - popuna</b>	$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$	-	<b>35,5</b>

**Tabela 5.** Proračun temperature predgrevanja  $T_p$  po metodi datoj u standardu EN 1011 – 2

## 4.3. Proračun vremena hlađenja $t_{8/5}$

Uticao brzine, odnosno, vremena hlađenja  $t_{8/5}$  na osobine MŠ i ZUT je objašnjen u literaturi [2, 5, 6] i u tački 1. ovog rada. Preporučena vremena hlađenja  $t_{8/5}$ , za niskouglijenične čelike se kreću u intervalima 10 - 25 sec. [3], 5 - 20 sec. [7] i 15 sec [2]. Razlike u preporučenim vremenima hlađenja su posledica razlika u hemijskim sastavima i mikrostrukturama ispitivanih OM. Za potrebe ovog rada, kao optimalan, usvojen je raspon vremena hlađenja  $t_{8/5}$  od 10 do 20 sec. Postupak za određivanje vremena hlađenja  $t_{8/5}$  je opisan u literaturi [3]. Prvi korak u proračunu je određivanje prelazne debljine OM pri kojoj se odvođenje toplote menja iz dvodimenzionalnog u trodimenzionalno. Ukoliko je debljina OM, u konkretnom slučaju, manja od prelazne debljine odvođenje toplote je dvodimenzionalno, a ukoliko je ta debljina veća odvođenje toplote je trodimenzionalno. Parametri za određivanje načina

odvođenja toplote su debljina OM,  $T_p$  i Q. Za uslove zavarivanja korenog prolaza i prolaza popune, u razmatranom primeru, se iz literature [3] vidi da prelazna debljina iznosi 18 mm. S obzirom da je debljina OM manja od prelazne debljine, u konkretnom slučaju se radi o dvodimenzionalnom odvođenju toplote.

Jednačina za određivanje vremena hlađenja  $t_{8/5}$  za nelegirane i niskolegirane čelike, pri dvodimenzionalnom odvođenju toplote je data u literaturi [3] i glasi:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 T_p) \cdot 10^5 \cdot Q^2 / d^2 \cdot [1 / (500 - T_p)^2 - 1 / (800 - T_p)^2] \cdot F_2 \text{ sec} \quad (1)$$

gde su:  $T_p$  – temperatura predgrevanja °C; Q – količina toplote unete pri zavarivanju KJ/mm; d – debljina OM mm;  $F_2$  – faktor oblika spoja (0,9 za višeprolazni sučeoni spoj). Vremena hlađenja  $t_{8/5}$  izračunata za uslove zavarivanja korenog prolaza i prolaza popune, za različite  $T_p$  su data u tabeli 6.

		$T_p$ °C	I A	U V	$v_z$ cm/min	$v_z$ mm/sec	Q KJ/mm	$t_{8/5}$ sec
1	Proračun $T_p$ po metodi Itto Bessyo manje ukrućen spoj	137	130	16,0	8,0	1,33	1,25	14,2
2	Proračun $T_p$ po metodi Itto Bessyo više ukrućen spoj	161	130	16,0	8,0	1,33	1,25	16,2
3	Propračun $T_p$ za koreni prolaz po metodi datoj u standardu EN 1011	36	130	16,0	8,0	1,33	1,25	8,7
4	Propračun $T_p$ za prolaze popune po metodi datoj u standardu EN 1011	36	230	30,0	25,0	4,17	1,32	9,8

**Tabela 6.** Parametri zavarivanja korenog prolaza, prolaza popune i vremena hlađenja  $t_{8/5}$  za različite temperature predgrevanja  $T_p$



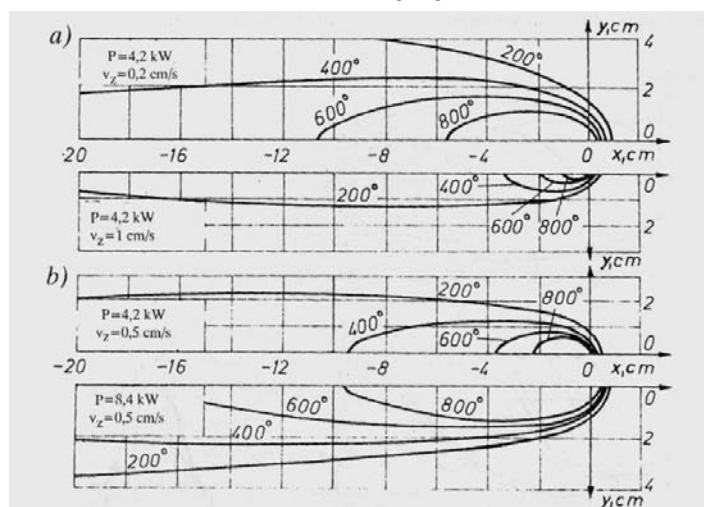
Iz tabele 6. se vidi da su vremena hlađenja  $t_{8/5}$  koja odgovaraju  $T_p$  izračunatim po metodi IB znatno duža od vremena hlađenja koje odgovaraju  $T_p$  izračunatoj po metodi EN. Vremena hlađenja po metodi IB odgovaraju vremenima hlađenja preporučenim za čelik P 460 NL1 i navedeni spoj. Vremena hlađenja određena po metodi EN su manja od preporučenih, što navodi na zaključak da je, u ovom slučaju, potrebno povećati  $T_p$ .

## 5. OPŠTE KARAKTERISTIKE TOPLOTNOG CIKLUSA ZAVARIVANJA

Rasprostiranje toplote u OM, pri zagrevanju toplotom električnog luka, je prikazano na slici 3. [8]. Sa slike se vidi da se raspored temperatura i oblik temperaturnih polja menjaju pri različitim snagama i različitim brzinama kretanja luka. Sa slike se vidi i da se temperatura OM levo i desno i ispred tačke u kojoj se luk trenutno nalazi povećava i to utoliko više ukoliko je snaga luka veća, a brzina njegovog kretanja manja. Slika 3. se odnosi na uslove stacionarnog prenosa toplote tj. na uslove u kojima je količina toplote koju luk preda OM jednaka količini toplote koja se odvede u OM i okolinu. U tim uslovima je razlika u temperaturama ivice žleba i OM, duž šava konstantna, zbog čega

je brzina hlađenja ZUT konstantna, pa se vreme hlađenja  $t_{8/5}$  ne menja duž spoja.

Zagrevanje OM toplotom luka, na vreme hlađenja  $t_{8/5}$ , ima isti uticaj kao povećanje  $T_p$ . Ako je ivica žleba predgrejana do optimalne temperature  $T_{op}$  tj. temperature koja obezbeđuje potrebno vreme hlađenja  $t_{8/5}$ , onda dodatno zagrevanje toplotom luka povećava temperaturu ivice žleba, produžava vreme hlađenja  $t_{8/5}$  i može dovesti do toga da ono bude predugo za zavarivani čelik. Prema tome, pri stacionarnim uslovima prenosa toplote, početna  $T_p$  spoja treba da bude manja od optimalne temperature  $T_{op}$ , jer se temperatura ivice žleba povećava zbog zagrevanja toplotom luka. Slika 3. pokazuje da su temperature ivice žleba u tački u kojoj se luk trenutno nalazi različite i da zavise od snage luka i brzine zavarivanja. Osim toga ove temperature zavise i od oblika i dimenzija žleba, toplotnih karakteristika OM, odabranog postupka zavarivanja, temperature predgrevanja itd. Pošto je povećanje temperature ivice žleba, usled zagrevanja toplotom luka teško precizno odrediti, da bi se utvrdilo da li je određeni spoj zavaren pri optimalnim vremenima hlađenja  $t_{8/5}$  potrebna su naknadna ispitivanja ZUT, npr. mikrostrukturna ispitivanja, merenja tvrdoća i ispitivanje žilavosti loma.



**Slika 3.** Raspored temperatura u OM usled zagrevanja toplotom električnog luka, pri različitim parametrima zavarivanja

Na počecima zavarenih spojeva vladaju nestacionarni uslovi prenosa toplote. Osnovni materijal je hladniji nego na delu spoja gde vladaju stacionarni uslovi. Zbog toga je na počecima spojeva brzina hlađenja ZUT veća, a vreme hlađenja  $t_{8/5}$  kraće nego na delovima spojeva gde vladaju stacionarni uslovi prenosa toplote. Sa povećanjem dužine spoja, luk predaje sve veću količinu toplote OM, zbog čega raste njegova temperatura, a vreme hlađenja  $t_{8/5}$  se produžava i na kraju dostiže veličinu koju ima pri stacionarnim

uslovima. Na deonici zavarenog spoja na kojoj vladaju nestacionarni uslovi prenosa toplote, presudan uticaj na temperaturu ivice žleba i na vreme hlađenja  $t_{8/5}$  ima predgrevanje. Dužinu spoja na kojoj vladaju nestacionarni uslovi prenosa toplote je teško odrediti. Ona zavisi od napred navedenih faktora. Iskustvo pokazuje da deonce spojeva na kojima vladaju nestacionarni uslovi prenosa toplote mogu imati dužine od 50 pa do 300 mm.



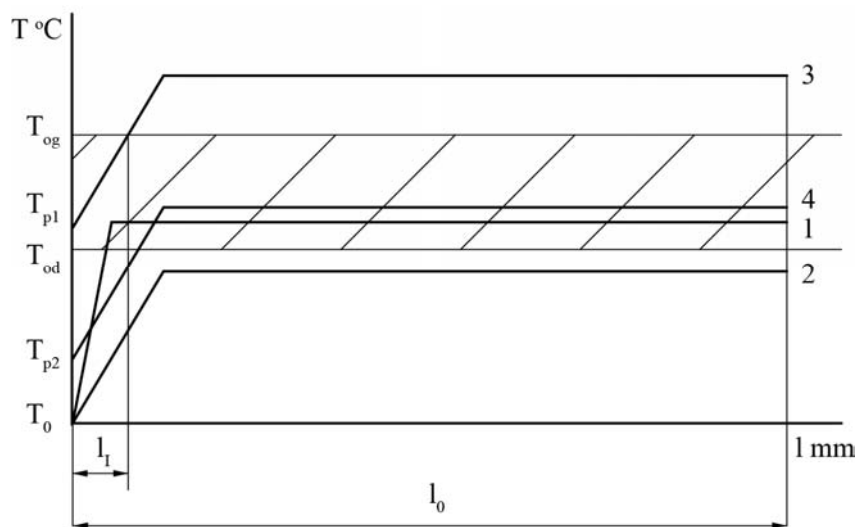
## 6. OGRANIČENJA U PRIMENI METODA ZA IZRAČUNAVANJE TEMPERATURA PREDGREVANJA

Slika 4. prikazuje promene temperatura duž ivice žleba pri različitim  $T_p$ . Temperature  $T_{od}$  i  $T_{og}$  predstavljaju donju i gornju optimalnu temperaturu koje, prema jednačini (1) za datu debljinu i količinu unete toplote, odgovaraju minimalnom, odnosno maksimalnom dozvoljenom vremenu hlađenja  $t_{8/5}$  (u ovom slučaju 10 – 20 sec). Ove temperature predstavljaju granice optimalnog temperaturnog područja u kome treba da se nađu ivice žleba tokom zavarivanja da bi ZUT imala odgovarajuće osobine.

Kriva 1. na slici 4. se odnosi na promenu temperature duž ivice žleba, čelika koji je zavaren bez predgrevanja. Početna temperatura čelika  $T_0$  odgovara ambijentalnoj temperaturi. Sa povećanjem dužine spoja raste temperatura OM uz ivice žleba, dok se ne dostignu stacionarni uslovi. Sa daljim povećanjem dužine spoja temperatura OM uz ivice žleba se ne menja. Kod tanjih materijala količina unete toplote je, obično dovoljna da poveća temperaturu OM preko  $T_{od}$  (linija 1) i

tada predgrevanje OM nije potrebno, a spoj se većim delom nalazi u oblasti optimalnih temperatura. Kod debljih materijala količina unete toplote obično nije dovoljna da zagreje ivice žleba preko  $T_{od}$  (linija 2). Slika 4. pokazuje da je u ovom slučaju temperatura OM uz ivice žleba manja od potrebne celom dužinom spoja.

Zbog toga je potrebno predgrevanje OM. Kriva 3. prikazuje promenu temperature duž spoja kada je  $T_{p1}$  nešto veća od  $T_{od}$ . Kao i u prethodnom slučaju sa povećanjem dužine spoja raste temperatura OM uz ivice žleba, dok se ne dostignu stacionarni uslovi. Sa daljim povećanjem dužine spoja, temperatura OM se ne menja. Slika 4. pokazuje da se, u ovom slučaju, samo deo spoja dužine  $l_1$  nalazi u području optimalnih temperatura. Najveći deo spoja se nalazi van optimalnog područja tj. nalazi se u području previsokih temperatura. Spuštanjem  $T_p$  na  $T_{p2}$  tj. spuštanjem  $T_p$  ispod  $T_{od}$  spušta se cela kriva i na taj način se spoj skoro celom dužinom dovodi u optimalno temperaturno područje, kriva 4. Tada se samo jedan manji deo, na početku spoja, nalazi u području nedovoljnih temperatura predgrevanja.



**Slika 4.** Promene temperatura duž ivica žleba pri različitim temperaturama predgrevanja

Proračun prema metodi IB daje  $T_p$  koja je jednaka ili je nešto veća od  $T_{od}$ , kriva 3. na slici 4. Sa slike se vidi da će se, u ovom slučaju, u području optimalnih temperatura naći samo deo spoja, dužine  $l_1$ . Ako su spojevi koje zavarujemo kraći od  $l_1$ , npr. spojevi na priključcima posuda pod pritiskom (PPP) manjih prečnika, mesta sanacija grešaka u zavarenim spojevima, pripoji i sl., onda se oni celom dužinom nalaze u optimalnom temperaturnom području, pa metoda IB daje odgovarajuću  $T_p$ . U praksi su spojevi najčešće duži

od  $l_1$ . Ovi spojevi se većim delom nalaze van područja optimalnih temperatura, pa za njih proračun po metodi IB ne daje odgovarajuću  $T_p$ . Snižavanjem  $T_p$  kriva raspodele temperatura duž spoja se spušta i većim delom uvodi u područje optimalnih temperatura. Proračun  $T_p$  sa sniženom temperaturom u odnosu na  $T_{od}$  daje metoda EN. Međutim, u ovom slučaju se, jedan kraći deo spoja, na njegovom početku, nalazi ispod temperature koja definiše minimalno dozvoljeno vreme hlađenja  $t_{8/5}$ , zbog čega se, u ovom delu spoja, neće dobiti



zadovoljavajuća struktura u ZUT. Zato ova metoda nije pogodna za proračunavanje  $T_p$  kratkih spojeva.

Na visinu potrebne  $T_p$  utiče i intenzitet ukrućenosti spoja tokom njegovog hlađenja. Sa porastom stepena ukrućenosti raste potrebna  $T_p$ . Metoda IB, zbog načina na koji je koncipirana Tekken metoda, u znatnoj meri uzima u obzir uticaj ometenog skupljanja na visinu  $T_p$ . Promenama člana koji se odnosi na intenzitet napona u jednačini (2), tabela 1. i promenom faktora intenziteta napona  $K$  mogu se obuhvatiti različite situacije ometenog skupljanja pri hlađenju spojeva. Npr. na jednoj PPP ometanje skupljanja pri hlađenju nakon zavarivanja neće biti isto na kružnim i podužnim spojevima na omotaču, na spojevima priključaka i na delovima spojeva na kojima se zavarivanjem otklanjaju neprihvatljive greške. U poslednjem slučaju ometanje skupljanja MŠ pri hlađenju je najveće, što ima za posledicu najveće napone koji deluju na šav tokom hlađenja. Da bi se smanjila sklonost ka pojavi prslina u ovom spoju mora se povećati  $T_p$ . I metoda EN, preko debljine OM, uzima u obzir uticaj napona koji deluju na spoj tokom očvršćavanja. Međutim, mogućnosti metode EN u tom pogledu su manje od mogućnosti koje pruža metoda IB.

## 7. ZAKLJUČCI

Proračun temperature predgrevanja po metodi EN, daje na početku spoja temperaturu, koja je nedovoljna da vreme hlađenja  $t_{8/5}$  bude veće od minimalnog potrebnog za dati OM. To ima za posledicu da se u ZUT kratkih spojeva dobiju neodgovarajuće strukture. Kod dužih spojeva se na početnom delu spoja pojavljuje isti problem, ali se sa porastom dužine spoja usled zagrevanja toplotom luka, temperatura ivice žleba povećava, zbog čega se vreme hlađenja  $t_{8/5}$  produžava i na ostatku spoja se dobijaju optimalne strukture u ZUT. Propračun po metodi Itto - Bessyo daje temperaturu predgrevanja koja, na početku spoja obezbeđuje dovoljno visoku temperaturu, da vreme hlađenja  $t_{8/5}$  bude veće od minimalnog potrebnog za dati OM. Zbog toga se, kod kratkih spojeva, u ZUT dobiju odgovarajuće strukture. Sa porastom dužine spoja, usled zagrevanja toplotom luka raste temperatura ivice žleba, vreme hlađenja  $t_{8/5}$  se produžava i može postati duže od maksimalno dozvoljenog za dati OM, što ima za posledicu neodgovarajuće strukture u ZUT ovog dela spoja.

Na visinu potrebne  $T_p$  utiču i naponi koji deluju na spoj tokom njegovog hlađenja. Što je više ometeno skupljanje spoja tj. što je spoj više

ukrućen, na njega deluju veći naponi i veća je njegova sklonost ka nastanku prslina. Metoda EN uzima u obzir ukrućenost spoja preko debljine OM, dok metoda IB omogućava da se promenom intenziteta ukrućenja  $K$  uzmu u obzir i drugi faktori npr. oblik spoja. Naponi i sklonost ka nastanku prslina se smanjuju povećanjem temperature predgrevanja. U praksi je uočeno da se, pri izradi tehnologija zavarivanja, za sanacije grešaka u zavarenim spojevima, za izračunavanje temperatura predgrevanja koristi metoda po standardu EN. Greške u zavarenim spojevima i naročito prsline otkrivene pri eksploatacijskim ispitivanjima zavarenih konstrukcija obično nemaju velike dužine. One se kreću od nekoliko desetina do par stotina milimetara. Uslovi koji vladaju pri sanaciji grešaka u spojevima, zavarivanjem su: dužine spojeva su male, spojevi se hlade u uslovima ometenog skupljanja i masa spojeva je mala, zbog čega se oni brzo hlade. Jednačine za određivanje temperature predgrevanja po metodi Itto – Bessyo su definisane u sličnim uslovima. Zbog toga je metoda Itto – Bessyo pogodnija za izračunavanje temperature predgrevanja pri sanaciji grešaka u zavarenim spojevima.

Ovo istraživanje je nastalo u okviru nacionalnog projekta TR35024 finansiranog od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] I. Hrivnjak: *Zavarljivost čelika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
- [2] K. Gerić: *Prslina u zavarenim spojevima*, Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2005.
- [3] Standard EN 1011 – 2/2007: *Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika*
- [4] B. Bajić: *Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa MIG-MAG*, Gorenje – Varstroj, Lendava, 1982.
- [5] H. Granjon: *Metalurške osnove varjenja*, prevod na slovenački P. Štular, Zveza društev za varilno tehniko Slovenije, Ljubljana, 1994.
- [6] K. Easterling: *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, 1983.
- [7] Ruukki: *Hot rolled steel sheets, plates and coils, Welding general*, Ruukki Metals Oy, Finland, 2014.
- [8] A. Sedmak i dr.: *Mašinski materijali*, II deo, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, 2000.