



Radomir Jovičić¹, Radica Prokić Cvetković², Branko Zrilić³, Katarina Jovičić Bubalo⁴

HEAT INPUT WELDING UNOS TOPLOTE PRI ZAVARIVANJU

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.75

Rad primljen / Paper received:

Mart 2015.

Adresa autora / Author's address:

¹Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

²Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

³Fin Import DOO, Dobropoljska 39, Beograd

⁴Institut Goša, Milana Rakića 35, Beograd

Ključne reči: količina unete toplote, brzina hlađenja, prslina, struja, napon

Key words: heat input, cooling rate, cracks, current, voltage

Rezime: Jedan od osnovnih parametara koji utiče na osobine spojeva zavarenih elektrolučnim postupcima je količina unete toplote. Obezbeđenje dovoljne pouzdanosti zavarenih konstrukcija pogotovo konstrukcija izrađenih od čelika povišene i visoke čvrstoće i razvoj novih materijala nameću potrebu za preciznijim merenjem parametara na osnovu kojih se izračunava količina unete toplote. U ovom radu je pokazano da je za preciznije izračunavanje količine unete toplote neophodno kontinualno merenje struje i napona tokom zavarivanja. Rezultati merenja su pokazali da jačine struje može značajno da osciluje tokom zavarivanja jednog zavara, da prosečna jačina struje u jednom delu zavara može bitno da se razlikuje od prosečne vrednosti struje u drugom delu istog zavara i da obe mogu da se razlikuju od prosečne vrednosti jačine struje za ceo zavar.

Abstract: One of the main parameters that influence the properties of the welded joints made by arc welding processes is heat input. Providing sufficient reliability of welded structures, especially structures made of high strength steels and development of new materials create a need for more precise measurement parameters on the basis of which to calculate the amount of heat input. In this paper, it is for precisely calculate the amount of heat input necessary to continuously measure the current and voltage during welding. The measured results showed that the current can significantly fluctuate during welding of a weld, that the average current in one part of the weld may vary significantly from the average value of current in the second part of the same weld and that both may be different from the average value for a current for the whole weld.

1. UVOD

Energija koja se, pod dejstvom električnog luka, unese u zavareni spoj predstavlja jedan od najvažnijih faktora koji utiču na osobine novonastalog spoja. Ova energija utiče na oblik i dimezije metala šava i spoja u celini, na intenzitet i stepen završenosti metalurških reakcija u tečnom metalu, na mikro i makrostrukturu metala šava i njegove osobine, na pojavu grešaka u zavarenom spoju, na strukturne promene i osobine zone uticaja toplote (ZUT) osnovnog materijala i na veličinu zaostalih napona [1].

Izrada visokonapregnutih zavarenih konstrukcija i razvoj novih materijala namenjenih za zavarene konstrukcije čine razmatranja količine energije tj. toplote, koja se pod dejstvom električnog luka

unese u zavareni spoj sve važnijim. Da bi zavarene konstrukcije mogle dovoljno dugo i pouzdano da rade u uslovima za koje su projektovane, njihovi zavareni spojevi moraju da imaju odgovarajuće osobine. Ove osobine se mogu postići samo ako je količina unete toplote u području optimalnih vrednosti. Ovo područje je npr. kod niskouglničnih konstrukcijskih čelika nižih čvrstoća dosta široko. Međutim, porast čvrstoća kod čelika povišene i visoke čvrstoće uslovljava sužavanje područja optimalnih količina unete toplote i to utoliko više ukoliko je čvrstoća čelika veća. Zbog toga su tehnolozi često u situaciji da moraju preciznije da definišu minimalnu i maksimalnu dozvoljenu količinu unete toplote [2].



2. KOLIČINA UNETE TOPLOTE

Količina unete toplote je deo energije električnog luka koji se utroši na obrazovanje jedinice dužine zavarenog spoja. Prema literaturi [3] količina unete toplote se određuje iz izraza:

$$Q = k (U I) / v \cdot 10^{-3} \text{ [KJ/mm]} \quad (1)$$

gde je: k – koeficijent toplotne efikasnosti, U – napon električnog luka, V; I – struja u električnom luku, A; v – brzina zavarivanja, mm/s.

Koeficijent toplotne efikasnosti predstavlja odnos unete toplotne energije u zavarni spoj i električne energije utrošene za električni luk za vreme izvođenja zavarivanja [3]. Razlika dve navedene energije predstavlja toplotne gubitke koji nastaju usled odvođenja toplote zračenjem, strujanjem i provođenjem i zbog razbrizgavanja dodatnog materijala. Koeficijenti toplotne efikasnosti za različite postupke zavarivanja su dati u tabeli 1. [3,4,5].

Broj postupka	Postupak	Koeficijent
111	Elektrolučno zavarivanje elektrodom sa rutilnom oblogom	0,9
	Elektrolučno zavarivanje elektrodom sa bazičnom oblogom	0,8
131	Elektrolučno zavarivanje u zaštititi inertnih gasova - MIG	0,8
135	Elektrolučno zavarivanje u zaštititi aktivnih gasova - MAG	0,8
114	Elektrolučno zavarivanje samozaštitnom punjenom žicom	0,8
141	Elektrolučno zavarivanje TIG postupkom	0,6
121	Elektrolučno zavarivanje pod praškom - EPP	0,9 – 1,0

TABELA 1. Koeficijenti toplotne efikasnosti za različite postupke zavarivanja

S obzirom da veličina koeficijenta toplotne efikasnosti postupka zavisi od veličine toplotnih gubitaka, može se očekivati da pri zavarivanju u različitim uslovima, zbog razlika u toplotnim gubicima, koeficijent toplotne efikasnosti jednog postupka ima različite vrednosti. Na primer, pri zavarivanju ispitnog uzorka za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja u radionici, toplotni gubici usled provođenja toplote će, zbog manje mase uzorka, biti manji nego pri zavarivanju istog spoja na jednoj masivnoj mostovnoj konstrukciji. Zbog toga se mora voditi računa da ispitni uzorci imaju dovoljno veliku masu tj. dovoljno velike dimenzije.

Izraz (1) podrazumeva da su struja, napon i brzina zavarivanja tj. brzina kretanja luka konstantni. Međutim, praćenjem struje i napona na ampermetru i voltmetru uređaja za zavarivanje, u toku zavarivanja, konstatuje se da se ove veličine neprestano menjaju. Ovo je naročito izraženo kod MIG i MAG postupaka. Zbog toga se postavlja pitanje koje vrednosti struje i napona predstavljaju reprezentativne vrednosti za korišćenje u izrazu (1), tj. koje vrednosti omogućavaju tačno izračunavanje količine unete toplote.

Sa ampermetra i voltmetra uređaja za zavarivanje moguće je pouzdano očitavanje samo minimalne i maksimalne vrednosti struje i napona. Izračunavanja količina unete toplote na osnovu ovih vrednosti daju vrednosti koje su manje, odnosno veće od stvarno unete količine toplote. Jasno je da se reprezentativne vrednosti struje i napona nalaze između njihovih minimalnih i maksimalnih vrednosti. Kako će se dalje videti, reprezentativne vrednosti nisu srednje vrednosti minimalne i maksimalne vrednosti struje i napona, nego su njihove prosečne vrednosti tokom zavarivanja. Ove vrednosti je moguće dobiti samo na osnovu rezultata merenja dobijenih tokom zavarivanja.

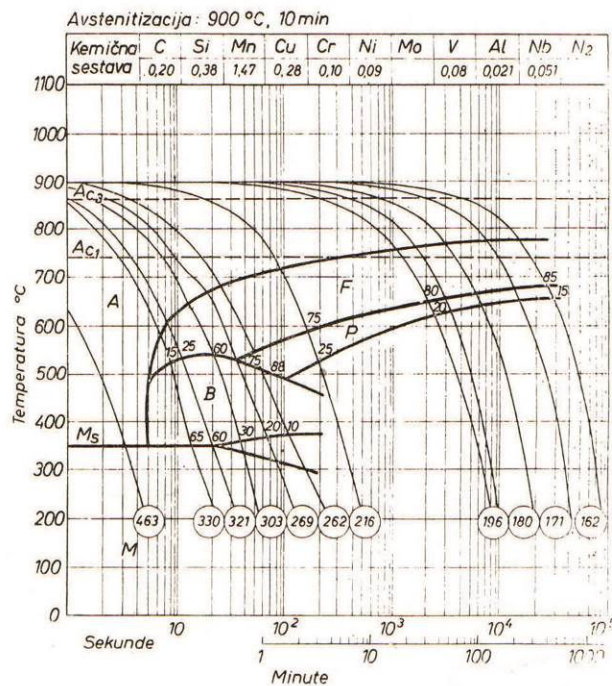
I brzina zavarivanja često nije konstantna. Pripoji u žljebovima i neujednačene dimenzije žljebova uslovljavaju da se brzina zavarivanja menja ili da se zbog uklanjanja pripoja zavarivanje mestimično prekida. Zbog toga, u ovim slučajevima, nije logično očekivati da je količina unete toplote duž zavarenog spoja jednaka. Ovaj problem se može prevazići pozicioniranjem delova u alatima i preciznijom izradom ivica žljebova mašinskom obradom.



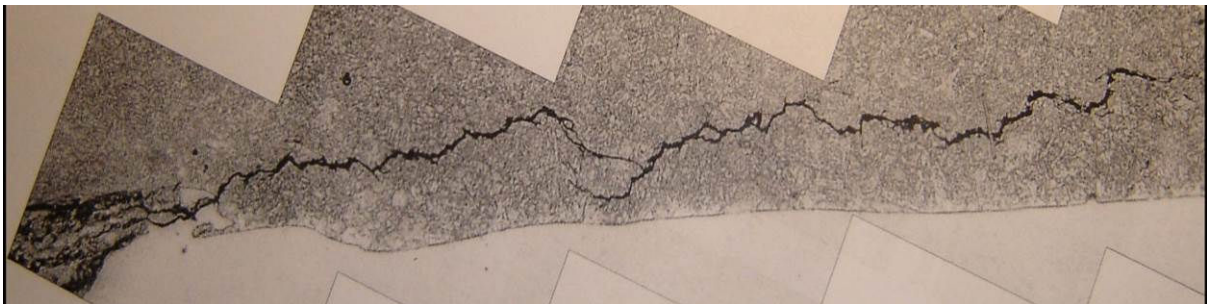
3. KOLIČINA UNETE TOPLOTE I BRZINA HLAĐENJA ZONE UTICAJA TOPLOTE

Optimalne mikrostrukture ZUT čelika se biraju pomoću njihovih dijagrama kontinualnog hlađenja tj. pomoću TTT dijagrama. Optimalne mikrostrukture nastaju pri određenim brzinama hlađenja tj. pri određenim vremenima $\Delta t_{8/5}$. Obezbeđenjem odgovarajućeg unosa toplote postižu se željene brzine hlađenja u ZUT.

Na slici 1. [6] prikazan je TTT dijagram čelika P 460 NL1 (Nioval 47). Sa slike se vidi da pri većim brzinama hlađenja tj. pri manjem unosu toplote, u strukturi ZUT raste udeo tvrdih i krutih mikrokonstituenata. Tvrdi i kruti mikrostrukture su nepoželjne, zato što imaju sklonost ka obrazovanju hladnih prslina. Slika 2. prikazuje hladne prsline uz liniju stapanja u ZUT čelika P460 NL1 koje su nastale iz navedenog razloga [7].



Slika 1. TTT dijagram čelika P 460 NL1



Slika 2. Prsline u ZUT čelika P 460 NL1

Sa povećanjem količine unete toplote, brzina hlađenja u ZUT se smanjuje što dovodi do obrazovanja mekših stuktturnih komponenti, slika 1. U slučaju da je količina unete toplote suviše velika i brzina hlađenja suviše mala, krupnozrna zona ZUT se širi, zrna postaju veća i kao posledica toga opadaju čvrstoća, plastičnost i otpornost na lom ovog dela ZUT. Zbog toga sklonost ka nastanku

prslina u ZUT opet raste [8]. Zaključuje se da količina unete toplote mora biti unutar jednog optimalnog područja. Na brzinu hlađenja ZUT, pa prema tome i na potrebnu količinu unete toplote se može uticati uvođenjem predgrevanja. Predgrevanje usporava hlađenje ZUT i time smanjuje potrebnu količinu unete toplote. Za kontrolu količine unete toplote najpodesnije je



merenje vremena $\Delta t_{8/5}$. Međutim, retke su laboratorije koje za to imaju odgovarajuću opremu. Količinu unete toplote je moguće kontrolisati i posredno ispitivanjem mikrostruktura i merenjem tvrdoća na kontrolnim uzorcima.

Pri definisanju potrebne količine unete toplote treba imati u vidu da na brzinu hlađenja ZUT imaju uticaja i debljina osnovnog materijala, izabrani postupak zavarivanja, ugao luka u odnosu na osnovni materijal i način vođenja luka, unapred ili unazad.

4. EKSPERIMENTALNI DEO

Promene jačine struje i napona su snimane tokom zavarivanja uzorka za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja jednog sučeonog spoja na čeliku P 460 NL1, debljine 14mm. Spoj je zavaren MIG postupkom. Ostali podaci o tehnologiji zavarivanja su dati u tabeli 2.

Parametar	Veličina
Oznaka postupka zavarivanja	131
Vrsta i dimenzije dodatnog materijala (DIN 8559)	SG 3, Ø 1,2 mm
Oblik žljeba, ugao otvora žljeba, veličina zatupljenja korena, zazor u korenu	V, 60°, 1-2 mm, 3-4 mm
Vrsta i protok zaštitnog gasa	Ar + 5% CO ₂ + 1% O ₂ , 15 l/min
Temperatura predgrevanja i međuprolazna temperatura	150° C
Položaj zavarivanja	PA
Smer zavarivanja i ugao MIG pištolja	ulevo, 70 - 80°
Ukupni broj i raspored prolaza	5, 1. koren, 2. i 3. popuna, 4. i 5. lice šava
Zavarivanje jednostrano bez podloške	

TABELA 2. Parametri zavarivanja uzorka za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja

Za snimanje promena struje i napona korišćen je uređaj Data Catch, proizvođača KEMPPI Oy Finska, slika 3. [9]. Uređaj je namenjen za snimanje podataka samo za MIG i MAG postupke.

Pre početka zavarivanja uređaj se priključuje na aparat za zavarivanje. U toku zavarivanja uređaj, u određenim vremenskim intervalima, beleži podatke o jačini struje i naponu zavarivanja, brzini dodavanja elektrodne žice i jačini struje na pogonskom

elektromotoru dodavača žice. Nakon zavarivanja, uređaj se povezuje na računar u kome je instaliran program koji omogućava grafički prikaz svih zabeleženih podataka. Na osnovu izmerenih vrednosti i broja merenja, program izračunava prosečne vrednosti struje i napona u električnom luku. Program takođe omogućava očitavanje veličina struje i napona u svakoj tački dijagrama.

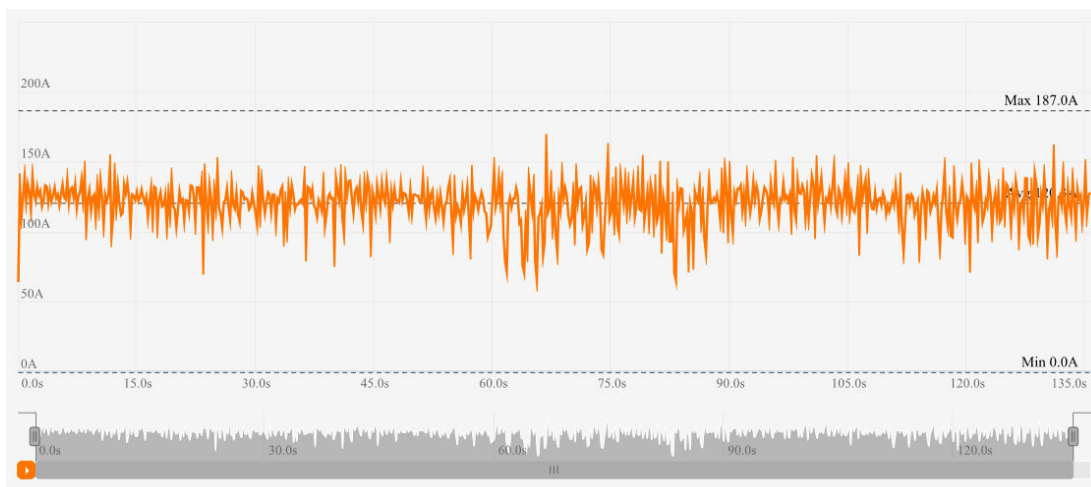


Slika 3. Uređaj DataCatch

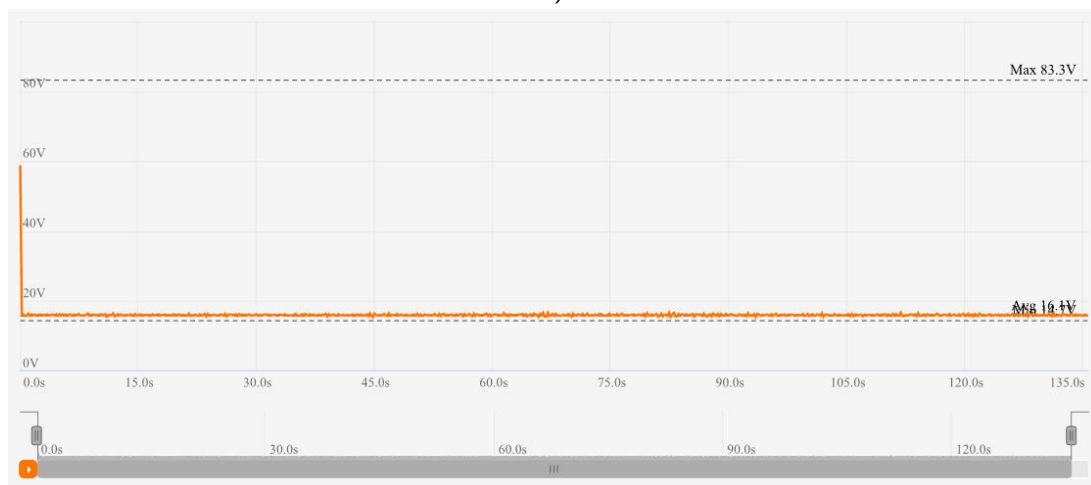


Na narednim slikama su prikazani rezultati merenja struja i napona dobijeni tokom zavarivanja navedenog uzorka. Slika 4. se odnosi na koreni

zavar, slika 5. na jedan od zavara popune, a slika 6. na jedan od zavara u završnom sloju tj. licu šava.

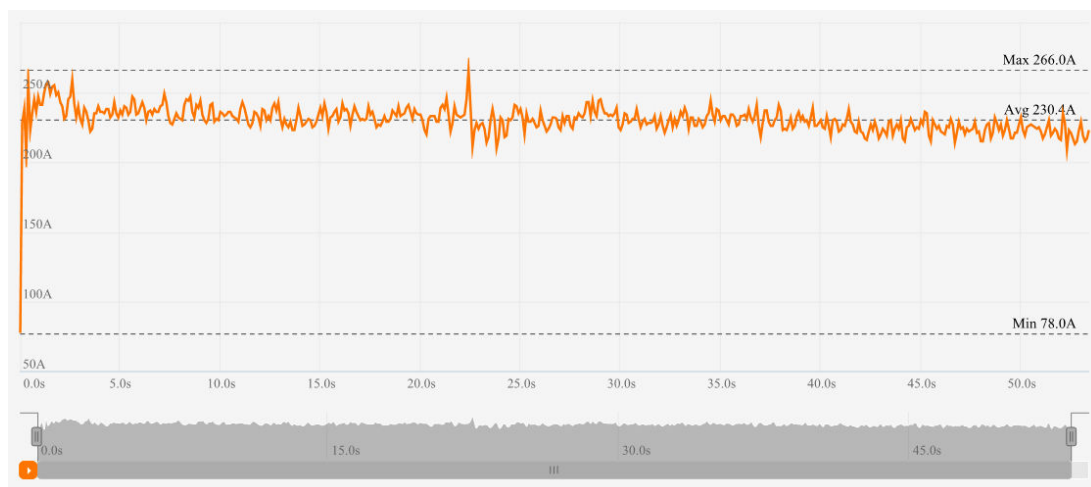


a)

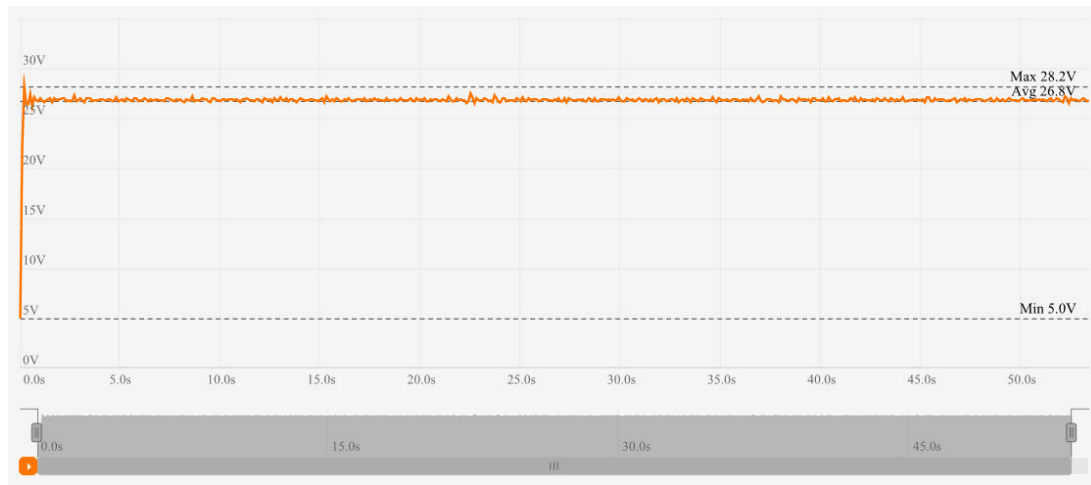


b)

Slika 4. Promene struje a) i napona b) tokom zavarivanja korenog zavara

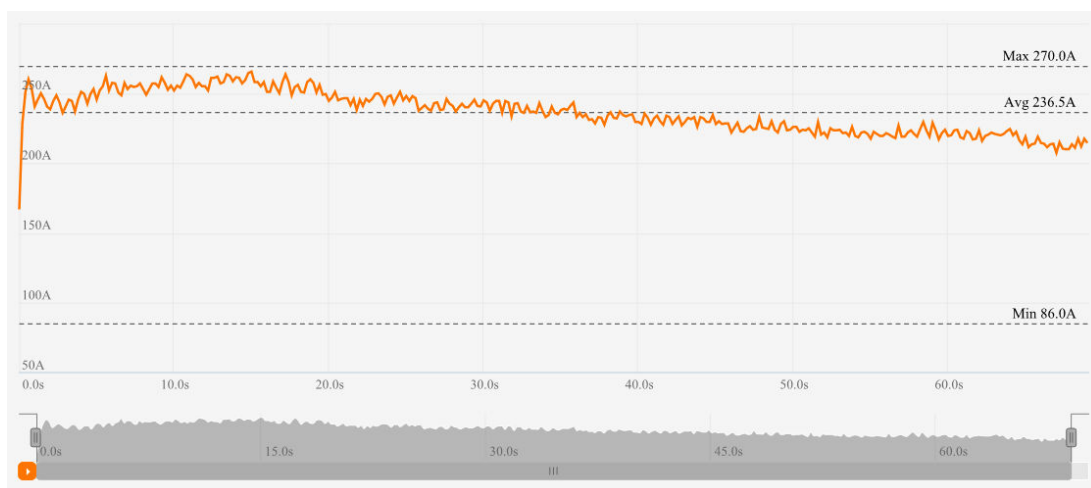


a)

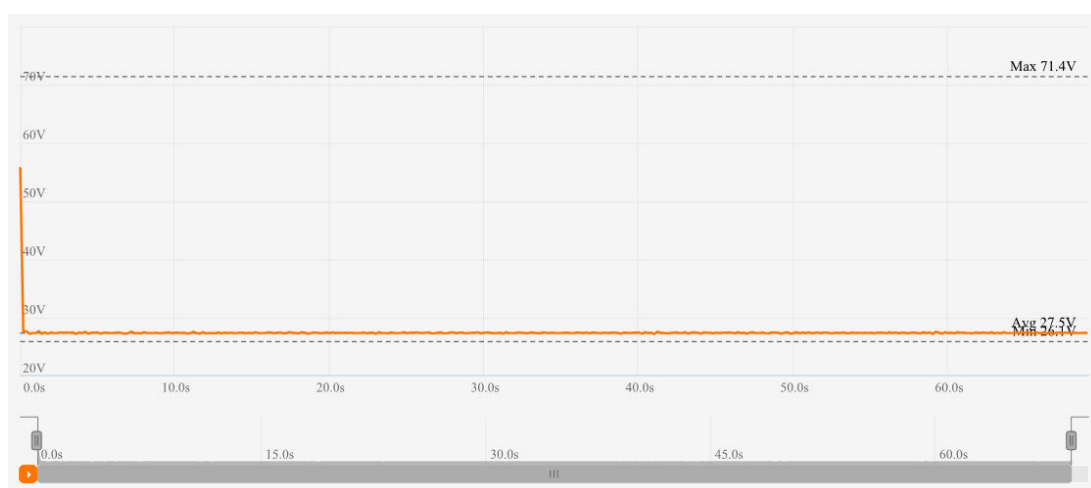


b)

Slika 5. Promene struje a) i napona b) tokom zavarivanja jednog od zavara u popuni



a)



b)

Slika 6. Promene struje a) i napona b) tokom zavarivanja jednog od zavara u završnom sloju, tj. licu šava



5. ANALIZA REZULTATA

Slika 4. se odnosi na zavarivanje dela korenog zavara opisanog spoja. Sa slike 4. a) se vidi da jačina struje osciluje celom dužinom ovog zavara i da se te oscilacije povećavaju od sredine ka kraju zavara. Prosečne jačine struja na svakoj deonici zavara su jednake prosečnoj jačini struje na

celokupnoj dužini zavara. Treba napomenuti da je uređaj za zavarivanje bio dobro pripremljen i potpuno ispravan i da je zavarivanje izveo dobro obučeni zavarivač. Sa slike 4. b) se vidi da je napon bio konstantan tokom zavarivanja. U tabeli 3. su dati podaci na osnovu kojih je izračunata količina unete toplote, a koji su uzeti sa dijagrama na slici 4.

I_{pr}	I_{max}	I_{min}	ΔI	U_{pr}	U_{max}	U_{min}	ΔU	Q	v_z
A	A	A	A	V	V	V	V	KJ/mm	mm/sec
120,0	146	80	66	16,1	16,4	15,7	0,7	0,672	2,3

TABELA 3. Podaci o zavarivanju korenog zavara

Veličine u tabeli 3. predstavljaju: I_{pr} , U_{pr} – prosečne vrednosti struje i napona, slika 4, I_{max} i I_{min} – za reprezentativne vrednosti maksimalne i minimalne struje, slika 4. a), ΔI – rasipanje vrednosti jačina struje, U_{max} , U_{min} – maksimalne i minimalne vrednosti napona, ΔU – rasipanje vrednosti napona, Q – količina unete toplote izračunata iz izraza (1) i usvojene vrednosti za koeficijent efikasnosti 0,8, v_z – brzina zavarivanja.

Slika 5. se odnosi na zavarivanje dela jednog od zavara popune. Sa slike 5. a) se vidi da jačina struje osciluje celom dužinom zavara i da su te oscilacije ujednačenih veličina. Sa slike se vidi i da se prosečna jačina struje postepeno smanjuje od

početka ka kraju zavara tj. da je na prvoj trećini zavara prosečna jačina struje veća od prosečne za ceo zavar, da je na drugoj trećini zavara prosečna jačina struje jednaka prosečnoj za ceo zavar i da je na trećoj trećini zavara prosečna jačina struje manja od prosečne za ceo zavar. Sa slike 5. b) se vidi da je napon luka i u ovom slučaju bio konstantan tokom zavarivanja. U tabeli 4. su dati podaci na osnovu kojih je izračunata količina unete toplote, a koji su uzeti sa dijagrama na slici 5., a u tabeli 5. su na osnovu prosečnih vrednosti za jačine struja u svakoj trećini zavara date i odgovarajuće količine unete toplote.

I_{pr}	I_{max}	I_{min}	ΔI	U_{pr}	U_{max}	U_{min}	ΔU	Q	v_z
A	A	A	A	V	V	V	V	KJ/mm	mm/sec
233,4	261	215	46	26,9	27,1	26,7	0,4	1,617	3,1

TABELA 4. Podaci o zavarivanju zavara popune

$I_{pr I}$	$I_{pr II}$	$I_{pr III}$	U_{pr}	Q_I	Q_{II}	Q_{III}	v_z
A	A	A	V	KJ/mm	KJ/mm	KJ/mm	mm/sec
246	233	222	26,9	1,707	1,617	1,529	3,1

TABELA 5. Promene jačina struje i količina unete energije duž zavara popune

Veličine u tabelama 4. i 5. predstavljaju iste veličine kao u tabeli 3. Iz tabele 5. se vidi da je razlika u količinama unete toplote na početku i na kraju zavara oko 11%. Ona je posledica promena u

prosečnoj vrednosti jačine struje u tim delovima zavara.

Slika 6. se odnosi na zavarivanje jednog od zavara u završnom sloju tj. licu šava. Sa slike 6.a) se vidi da i u ovom slučaju jačina struje osciluje celom



dužinom zavara i da su te oscilacije ujednačene veličine. Sa slike se vidi i da se prosečna jačina struje i u ovom slučaju, postepeno smanjuje od početka ka kraju zavara tj. da je na prvih 35% dužine zavara prosečna jačina struje veća od prosečne za ceo zavar, da je na narednih 20% dužine zavara prosečna jačina struje jednaka prosečnoj za ceo zavar i da je na preostalih 45%

dužine zavara prosečna jačina struje manja od prosečne za ceo zavar. Sa slike 6. b) se vidi da je napon luka bio konstantan tokom zavarivanja. U tabeli 6. su dati podaci sa dijagrama na slici 6., a u tabeli 7. su na osnovu prosečnih vrednosti za jačine struja u pojedinim delovima zavara date i odgovarajuće količine unete toplote.

I_{pr}	I_{max}	I_{min}	ΔI	U_{pr}	U_{max}	U_{min}	ΔU	Q	v_z
A	A	A	A	V	V	V	V	KJ/mm	mm/sec
236,5	264	213	51	27,5	27,6	27,3	0,3	0,913	5,7

TABELA 6. Podaci o zavarivanju zavara u završnom sloju

$I_{pr I}$	$I_{pr II}$	$I_{pr III}$	U_{pr}	Q_I	Q_{II}	Q_{III}	v_z
A	A	A	V	KJ/mm	KJ/mm	KJ/mm	mm/sec
258	236	221	27,5	0,996	0,913	0,853	5,7

TABELA 7. Promene jačina struje i količina unete energije duž završnog zavara

Veličine u tabelama 6. i 7. predstavljaju iste veličine kao u tabeli 3. Iz tabele 7. se vidi da je razlika u količinama unete toplote na početku i na kraju završnog zavara oko 17%. Kao i u prethodnom slučaju ona je posledica promena u prosečnoj vrednosti jačine struje u pojedinim delovima zavara.

U toku zavarivanja navedenih zavara nije menjana regulacija uređaja, pa su promene prosečne jačine struje pojedinih delova zavara, slike 5. a) i 6. a) u odnosu na prosečnu jačinu struje na celokupnoj dužini zavara, posledica promena u načinu vođenja

luka. Sa slika 4. do 6. se vidi da su oscilacije jačina struje najveće kod korenog, a najmanje kod završnog prolaza. Razlog za ovo nije utvrđivan. Može se pretpostaviti da je do smanjenja oscilacija jačina struje došlo zbog promene oblika prenosa dodatnog materijala iz kratkospojenog u krupnokapljičasti, zbog porasta jačine struje zavarivanja. Inače na veličinu oscilacija jačina struja jako utiču uvežbanost zavarivača, ispravno podešavanje dodavača žice, polikabla i pištolja za zavarivanje i kalibracija žice.



Slika 7. Instuktor pokazuje zavarivaču grafički prikaz kretanja parametara zavarivanja tokom obuke



6. ZAKLJUČCI

Količina unete toplote je jedan od osnovnih faktora koji utiču na osobine zavarenih spojeva.

Da bi zavareni spojevi mogli, dovoljno dugo i pouzdano da rade u uslovima za koje su projektovani, moraju da imaju odgovarajuće osobine. Ove osobine se postižu samo ako je količina unete toplote u području optimalnih vrednosti za zavarivani materijal.

Porast čvrstoća čelika povišene i visoke čvrstoće uslovljava sužavanje područja optimalnih količina unete toplote i to utoliko više, ukoliko je čvrstoća čelika veća. Zbog toga se, pri izradi tehnologije zavarivanja, moraju definisati minimalna i maksimalna dozvoljena količina unete toplote. Ako je količina unete toplote suviše mala spoj se hladi većim brzinama. Zato, u strukturi ZUT, raste udeo tvrdih i krutih mikrokonstituenta koji povećavaju njegovu sklonost ka obrazovanju hladnih prslina. Ako je količina unete toplote suviše velika, brzina hlađenja spoja je mala, pa se krupnozrna zona ZUT se širi, zrna postaju veća i kao posledica toga opadaju čvrstoća, plastičnost i otpornost na lom ovog dela ZUT. Zbog toga sklonost ka nastanku prslina u ZUT opet raste.

Parametri za izračunavanje količine unete toplote su koeficijent toplotne efikasnosti postupka

zavarivanja, jačina struje, napon luka i brzina zavarivanja. Koeficijent toplotne efikasnosti postupka zavarivanja se može smatrati konstantnom veličinom. Jačina struje, napon luka i brzina zavarivanja su veličine koje su promenljive tokom zavarivanja. Zbog toga se moraju definisati njihove reprezentativne vrednosti koje se koriste za izračunavanje količine unete toplote.

Reprezentativne vrednosti struje i napona su njihove prosečne vrednosti, ne i srednje vrednosti. Ove prosečne vrednosti se mogu dobiti samo na osnovu rezultata kontinualnog merenja tokom zavarivanja. Ti rezultati pokazuju da jačina struje i napon osciluju u toku zavarivanja, pri čemu su oscilacije struje mnogo veće. Rezultati pokazuju i da se prosečne vrednosti jačina struja u pojedinim delovima istog zavara mogu razlikovati i da se one mogu razlikovati od prosečne vrednosti za ceo spoj. To onda uslovljava da se i količine unete toplote razlikuju u pojedinim delovima istog zavara. U razmatranom slučaju ove razlike su bile posledica promena u načinu vođenja luka.

Rad je proizašao iz istraživanja na projektu TR 35024 "Istraživanje mogućnosti unapređenja tehnologije zavarivanja mikrolegiranih čelika" finansiranom od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

LITERATURA

[1] R. Jovičić: Analiza uticaja prslina na integritet feritno – austenitnih zavarenih spojeva, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.

[2] R. Jovičić: Žilavost zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika na niskim temperaturama, Časopis Zavarivač, Vol. 35, No 1 (1990), str. 5 – 13

[3] SRPS EN 1011-1: 2007 Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo 1: Opšte uputstvo za elektrolučno zavarivanje

[4] M. Jovanović, D. Adamović, V. Lazić: Tehnologija zavarivanja, samostalno autorsko izdanje, Kragujevac 2011.

[5] The procedure handbook of arc welding, The Lincoln electric company, Cleveland, Ohio, USA, 1973.

[6] M. Gabrovšek: Smeri razvoja proizvodnje jekel s povišano mejo plastičnosti in dodajnega materiala za varjenje v Železarni Jesenice, Strokovno posvetovanje "Dodajni materiali Železarne Jesenice", Bled, Republika Slovenija, april 1987. str. 7 -15.

[7] R. Jovičić, S. Petronić, S. Sedmak, U. Tarić, K. Jovičić: *Integrity assessment of tanks with microcracks in welded joints*, Structural Integrity and Life, Vol 13, No 2 (2013), str. 131-136, ISSN/ISBN 1451-3749, COBIS SR-ID 181616135

[8] R. Jovičić: Prsline u zavarenim spojevima, Predavanjenakursa IiW, Beograd, 2006.

[9] Kemppi DataStore concept wins the Quality Innovation of the Year 2010 award, Kemppi ProNews, No 1, 2011. p.p. 6