



## OPTIMIRANJE PARAMETARA ZAVARIVANJA MIKROLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE

## OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS MICRO ALLOYED HSLA STEEL

Marko DUNĐER <sup>1)</sup>, Todor ERGIĆ <sup>2)</sup>, Miroslav DUSPARA <sup>2)</sup>

**Ključne riječi:** mikrolegirani čelici povišene čvrstoće, parametri zavarivanja, vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ , tvrdoća, udarna radnja loma

**Key words:** HSLA, Welding parameters, Cooling time  $\Delta t_{8/5}$ , Hardness, Impact toughness

**Sažetak:** U radu su prikazani rezultati udarne radnje loma i tvrdoće dobiveni na toplinski simuliranim uzorcima s različitim vremenima hlađenja od 800 do 500 °C i to bez zadržavanja na maksimalnoj temperaturi austenitizacije. Pri ispitivanju se koristio mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420, a simulacija je provedena na simulatoru toplinskog ciklusa TCS 1405 SMITWELD. Izvršena je metalografska analiza i predloženi su optimalni parametri zavarivanja ovog čelika.

**Abstract:** In this paper the results of impact toughness and hardness of thermal cycle simulated specimens from differently cooling time from 800 to 500 °C without keeping on highest austenitization temperature are given. The micro alloyed HSLA steel TStE 420 was used for experimental investigations and welding thermal cycle simulation was performed on thermal cycle simulator TCS 1405 SMITWELD. Metallographic analysis is performed and optimal welding conditions for welding of this grade of steel have been suggested.

---

<sup>1)</sup> Dr.sc. Marko Dunder, EWE, HOLDINA d.o.o. Sarajevo

<sup>2)</sup> Doc.dr.sc. Todor Ergić, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg I. Brić-Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod

<sup>2)</sup> Miroslav Duspara, student, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg I. Brić-Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod

---



## 1. UVOD

Zbog mogućih pojava grešaka u zavarenim spojevima, a time i mogućih otkaza zavarenih proizvoda, postavljaju se zahtjevi za pouzdanost i kvalitetu.

Može se reći da je jedan od osnovnih preduvjeta za pouzdan rad zavarenog proizvoda pravilno određivanje parametara i slijeda zavarivanja.

Variranjem parametara zavarivanja, osim na kvalitetu zavarenih spojeva, djeluje se i na utrošak energije, odnosno na troškove zavarivanja, te je zbog toga potrebno parametre zavarivanja odrediti tako da, osim traženih svojstava i dovoljne pouzdanosti, sveukupni troškovi zavarivanja (materijala i energije) budu što manji.

Poznavanje procesa širenja topline i formiranja temperaturnog polja mogu dati odgovore na pitanje kakvu se strukturu može očekivati na osnovi parametara procesa zavarivanja i, povratnom vezom, odgovoriti kakve je parametre potrebno uporabiti da bi se dobilo takvo temperaturno polje koje će osigurati povoljnu strukturu zavara i zone utjecaja topline.

## 2. DEFINIRANJE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA

Iz postojeće literature koja obrađuje utjecaj temperaturnih polja na mehanička svojstva zavarenog spoja od čelika povišene čvrstoće i predpokusima na simulatoru toplinskih ciklusa provedenim u Laboratoriju za zavarivanje Fakultete za strojništvo u Mariboru, proizlazi da je za optimiranje parametara zavarivanja potrebno ispitati utjecaj brzine hlađenja tj. vremena hlađenja od 800 do 500 °C ( $\Delta t_{8/5}$ ) na tvrdoću i žilavost mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420. Posebice je važno istaknuti utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost jednoprolaznog zavara na navedenim čelicima.

Vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5}$  potrebno je odrediti eksperimentalno i to za najslabiju zonu zavarenog spoja, dio ZUT-a uz granicu taljenja. Najvažnija je optimalna vrijednost  $\Delta t_{8/5}$ , ali za mikrolegirane čelike povišene čvrstoće potrebno je znati i donju i gornju graničnu vrijednost. Niže vrijednosti od donje granice znače obično prebrzo hlađenje i mogu uvjetovati suviše krhku strukturu [1]. Više vrijednosti od gornje granice dat će previše grubo zrno i pad čvrstoće.

Kako je za čelik TStE 420 preporučeno  $\Delta t_{8/5} = 8$  do 12 s [2], treba odrediti unos topline za srednju vrijednost  $\Delta t_{8/5} = 10$  s kao optimum, te donju granicu uz 8 s i gornju granicu uz 12 s.

Granice treba izbjegavati, a treba zavarivati s optimalnim unosom topline.

Tablica 1. Kemijska i mehanička svojstva čelika TStE 420

Čelik	Kemijski sastav u masenim postotcima (%)									
	C max.	Si	Mn	P	S	Ni	N	Al	V	Cu
	0,20	0,1 do 0,6	1,0 do 1,7							
	0,18	0,3	1,47	0,017	0,005	0,22	0,016	0,023	0,13	0,02
TStE 420	Mehanička svojstva kod sobne temperature									
	Granica razvlačenja		Vlačna čvrstoća		Istezljivost A <sub>5</sub> %		Kontrakcija Z %		Savijanje $\alpha = 180^\circ$	
	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>		$R_m$ N/mm <sup>2</sup>						uzd.	pop.
	min. 420		520 - 680		min. 19		min. 55			
	422		577		30		61,9		+	+
Vrijednost udarne radnje loma, KV u J kod 20°C, -20°C i -40°C										
40 J, 27 J i 20 J prema podacima [3], a ispitivanjem je dobiveno: 261 J, 245 J i 182 J										

## 2.1. Izbor osnovnog materijala

Za eksperimentalna istraživanja koja se obrazlažu odabran je mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420. Podaci o sadržaju kemijskih elemenata te podaci o mehaničkim svojstvima ovog čelika prikazani su u tablici 1.

Za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa zavarivanja priređene su probe dimenzija 55x11x11 mm (1 mm je dodatka zbog korozije pri simuliranju toplinskog ciklusa na probama koje su rađene bez zaštite Ar). Probe su izrezivane u pravcu valjanja osnovnog materijala. Na svakoj ploči iz koje su izrezivani uzorci provjeren je smjer vlakana pri valjanju. Debljina osnovnog materijala bila je 15 mm.

## 2.2. Simuliranje toplinskog ciklusa zavarivanja

Simulacija zavarivačkih ciklusa se posljednjih godina koristi pri istraživanju zavarljivosti, što uključuje ispitivanje prisutnosti različitih vrsta diskontinuiteta i detaljno istraživanje zone utjecaja topline (ZUT-a), koja je sa stajališta mikrostrukture izrazito heterogeni dio zavarenog spoja.

Pri istraživanju ZUT-a realnih zavarenih spojeva, često nije moguće pripremiti odgovarajuće epruvete radi veoma uskog ZUT-a, a samim tim i pojedinih uskih područja unutar ZUT-a.

Pri simulaciji toplinskih zavarivačkih ciklusa pojedine strukture se "sintetički" realiziraju. Tako se ostvaruju povoljni uvjeti za razjašnjenje znatnog broja pitanja koja su u svezi s ponašanjem materijala u uvjetima toplinskih zavarivačkih ciklusa. Pomoću simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja mogu se ostvariti dovoljno široka područja homogenih i ponovljivih struktura, tako da se za ispitivanje mehaničkih svojstava mogu koristiti klasični postupci ispitivanja [4].

Za ova istraživanja na raspolaganju je bio simulator toplinskog ciklusa zavarivanja tipa Smitweld.

Na simulatoru toplinskog ciklusa TCS 1405 Smitweld provodilo se zagrijavanje i hlađenje epruveta. Zagrijavanje epruveta bilo je elektrootporno. Toplina se iz epruveta kod vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 10, 25$  i  $50$  s odvodila pomoću vodom ohlađenih čeljusti tj. indirektno. Kod najbržeg vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 5$  s potrebno je toplinu odvoditi još brže te su u epruveti bile izrađene uzdužne bušotine za direktno hlađenje protokom vode.

Na sredini epruveta za ispitivanje simulacijom toplinskog ciklusa zavarivanjem je priključen termoelement Ni - CrNi.

Simuliranje toplinskog ciklusa obavljeno je na uzorcima bez zadržavanja na najvišoj temperaturi. Hlađenje je bilo uvjetovano propisanom brzinom hlađenja.

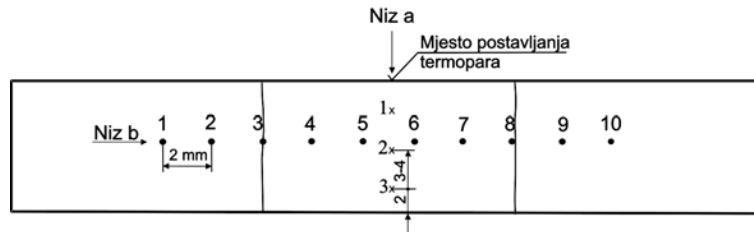
## 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### 3.1. Rezultati ispitivanja tvrdoće

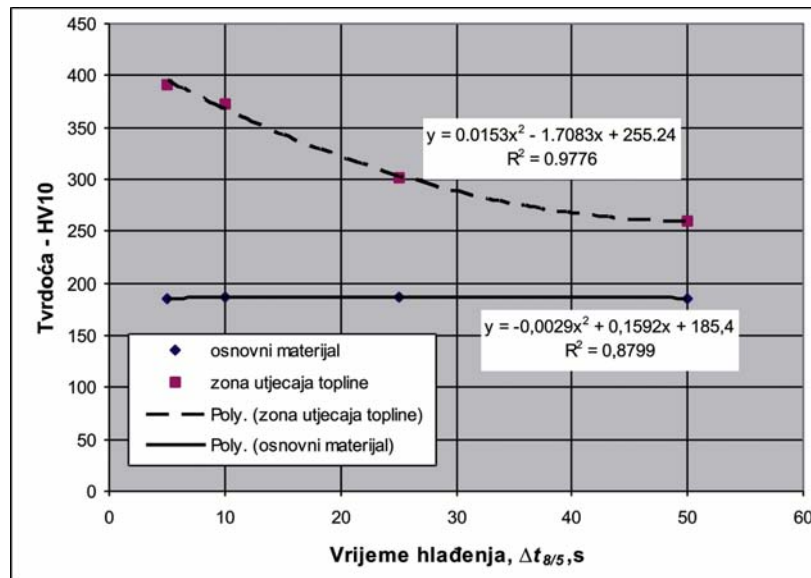
Tvrdoća u zavarenom spoju se mjeri obično u skladu s preporukama dokumenta MIZ-a IX-1609-90. Na slici 1. dan je shematski prikaz mjerenja tvrdoće na simulirani uzorcima.

Kada je u pitanju maksimalna dozvoljena tvrdoća ZUT-a, općenito prihvaćeni limit u šezdesetim godinama bio je 350HV, odnosno za niskolegirane čelike koji rade u području temperatura puzanja 400 HV (ali ne više od 125 HV iznad tvrdoće osnovnog materijala). Danas neki autori maksimalnu tvrdoću povezuju s kemijskim sastavom čelika i sadržajem difuzijskog vodika [5].

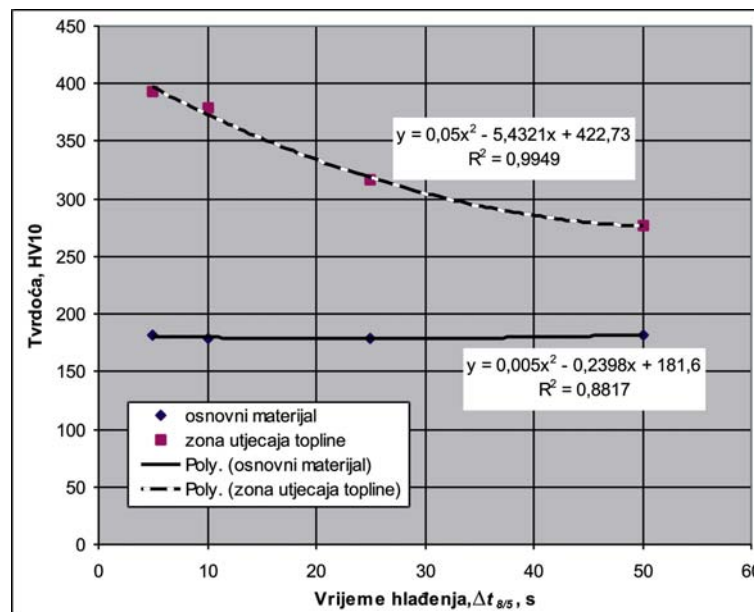
Rezultati ispitivanja tvrdoće prikazani su na slikama 2 i 3.



Slika 1. Mjerenje tvrdoće na simuliranim uzorcima  
 Niz a – mjerenje po vertikali; Niz b – mjerenje tvrdoće po presjeku



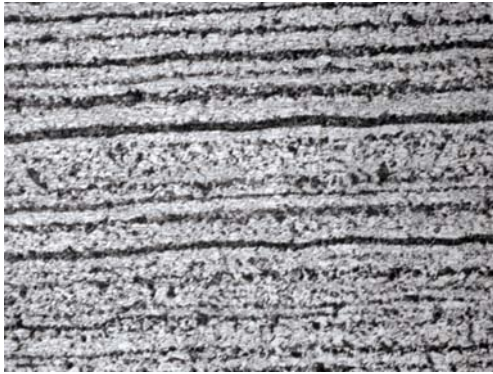
Slika 2. Ovisnost aritmetičke vrijednosti tvrdoće ZUT-a od vremena hlađenja 800 do 500 °C ( $\Delta t_{8/5}$ ) - tvrdoća mjerena po vertikali (Niz a - slika 1.)



Slika 3. Ovisnost aritmetičke vrijednosti tvrdoće ZUT-a od vremena hlađenja 800 do 500 °C ( $\Delta t_{8/5}$ ) - tvrdoća mjerena po presjeku (mjerenje 5 i 6 iz niza b - slika 1.)

### 3.2. Metalografski pregled pojedinih zona simuliranog uzorka

Na uzorcima je također proveden metalografski pregled pojedinih zona nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja, a karakteristične mikrostrukture prikazane su na slikama 4 i 5.



Slika 4. Mikrostruktura osnovnog materijala, TStE 420 normalizirano stanje, povećanje 200x

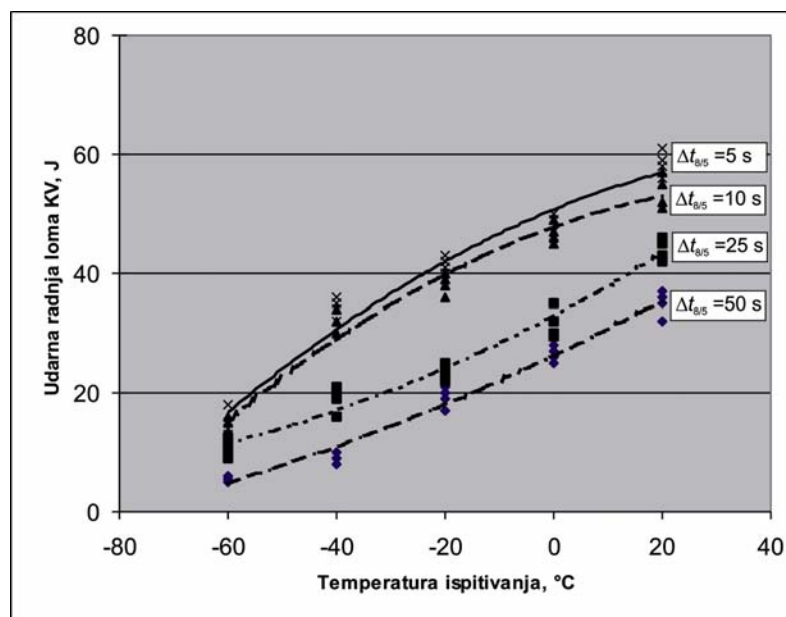


Slika 5. Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420 povećanje 200 x,  $\Delta t_{8/5} = 10$  s

### 3.3. Rezultati ispitivanja udarne radnje loma

Obično nema problema kod postizanja tražene vrijednosti čvrstoće, ali je mnogo veći problem kod zahtjeva jednolike žilavosti u ZUT-u.

Udarne radnje loma na uzorcima zavarenim simuliranim ciklusom zavarivanja ispitivana je po Charpy-ju, na temperaturama 20 °C; 0 °C; -20 °C; -40 °C i -60 °C. Rezultati ispitivanja za uzorke simulirane na simulatoru tipa Smitweld bez držanja na temperaturi austenitizacije, prikazani su na slici 6.



Slika 6. Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja 800 do 500 °C ( $\Delta t_{8/5}$ ) simuliranih uzoraka



Sa slike se može uočiti da su udarne radnje loma manje kod nižih temperatura ispitivanja, što je u skladu sa očekivanjem. Pri svim ispitnim temperaturama uočen je pad udarne radnje loma s porastom vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ , što je posljedica strukturnih promjena koje su nastupile pri simulaciji toplinskog ciklusa zavarivanja. To je vidljivo na karakterističnim mikrostrukturama uzoraka kod pojedinih vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ .

Iz dijagrama se također može zaključiti da zadovoljavajuću ukupnu udarnu radnju loma (veću od 27,5 J) imaju simulirani uzorci čiji je ZUT dobiven pri vremenu hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 5$  i 10 s. Kako su pored ukupne energije udara ispitivane i tvrdoće simuliranih uzoraka, sigurno je da vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 10$  s u potpunosti zadovoljava zahtijevane kriterije ukupne energije loma i vrijednosti maksimalno dozvoljene tvrdoće.

#### 4. ZAKLJUČAK

Zavarivanje mikrolegiranih čelika može se izvesti većinom uobičajenih postupaka zavarivanja. Kvalitetne zavarene spojeve koji će zadovoljiti predviđene uvjete eksploatacije moguće je postići isključivo uz primjenu odgovarajuće tehnologije zavarivanja. To prije svega podrazumijeva izbor optimalnih parametara zavarivanja koji kroz efektivno unesenu energiju daju prihvatljiva mehanička svojstva i mikrostrukturu pojedinih zona zavarenog spoja.

Simulacija toplinskog ciklusa zavarivanja može se koristiti za procjenu zavarljivosti čelika jer se na taj način može značajno skratiti opseg istraživanja i vrijeme iznalaženja optimalnih parametara zavarivanja. To je metoda koja se često koristi u svrhu procjene zavarljivosti, posebice kod korištenja novih ili nedovoljno istraženih materijala sa stajališta zavarljivosti.

Provedena istraživanja u ovome radu obuhvatila su eksperimentalno utvrđivanje ovisnosti tvrdoće i udarne radnje loma o vremenu hlađenja ( $\Delta t_{8/5}$ ), pri temperaturama 20, 0, -20, -40 i -60 °C. Na slikama 2 i 3 vidljiva je ovisnost tvrdoće HV10 o vremenu hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ . Sa stajališta zavarljivosti (smanjenje vjerojatnosti nastajanja hladnih pukotina, pojave korozije uz naprezanje u eksploataciji, ...) poželjne su niže vrijednosti tvrdoće. S druge strane, pretjerano niske vrijednosti tvrdoće povezane su s nižim vrijednostima udarne radnje loma (slika 6). I maksimalna vrijednost tvrdoće i udarna radnja loma opadaju s povećanjem vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ . Iz toga proizlazi da je vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5}$  prihvatljivo kod stanja pokusa gdje su vrijednosti tvrdoće niže a udarna radnja loma viša od minimalno zahtijevane. Temeljem provedenih istraživanja na uzorcima nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja pokazalo se da je interval vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$  od 8 do 12 sekundi prihvatljiv sa stajališta kriterija minimalne tvrdoće i zadovoljavajuće udarne radnje loma. U tom intervalu vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$  postiže se mikro struktura (slika 5) koja daje tvrdoću i udarnu radnju loma kod kojih je smanjena opasnost od nastajanja hladnih pukotina u izradi i korozije uz naprezanje u eksploataciji, te krhkog loma.

Također se nikako ne smije zaboraviti da je verifikacija postupka zavarivanja konačna provjera zavarljivosti, kojoj mogu prethoditi različita druga ispitivanja kao što su simulacija toplinskog ciklusa zavarivanja i ispitivanja zavarljivosti na realno zavarenim uzorcima.

#### 5. LITERATURA

- [1] Novosel, M., Krumes, D. "Željezni materijali I. dio, Konstrukcijski čelici", Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 1995.
- [2] Blume, F., Kalisch, D. "Berechnung von Temperaturfeldern beim MAG-Schweissen mit der EVD", Schweisstechnik, 12/1984.
- [3] Wegst, C.W. "Stahlschlüssel", Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Düsseldorf, 2001.
- [4] Imamović, A., Semjan, V. "Pojave krhkosti u ZUT-u čelika HSLA", Zavarivanje 1-2, 1997.
- [5] Chan, B. "Welding Hardness", Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Otaw, 1994.
- [6] Dunder, M. "Utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost mikrolegiranih čelika", Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2005.