

ISPITIVANJE ZAVARLJIVOSTI ČELIKA NA SIMULATORU TOPLINSKOG CIKLUSA

WELDABILITY TESTING ON THERMAL CYCLE SIMULATOR

Marko DUNĐER, Ivan SAMARDŽIĆ, Zvonimir KOLUMBIĆ, Ante PRANIĆ¹⁾

Ključne riječi: zavarljivost, toplinski ciklus zavarivanja, tvrdoća, udarna radnja loma

Key words: weldability, welding thermal cycle, hardness, toughness

Sažetak: U radu su prikazane značajke postupka simulacije toplinskog zavarivačkog ciklusa te navedene karakteristike tri vrste simulatora toplinskog ciklusa: Termoresthor – W, Smitweld i Gleeble. Također su prikazani i rezultati jednoproplazne i višeprolazne simulacije toplinskih ciklusa na simulatoru toplinskog ciklusa tipa "TCS 1405 Smitweld". Na koncu je data usporedba rezultata tvrdoće, udarne radnje loma i mikrostruktura jednoproplazne i višeprolazne simulacije ZUT-a na simuliranim uzorcima iz mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420.

Abstract: In this paper, simulation of welding thermal cycle, and characteristics of the three types of simulators heat cycle (Termoresthor – W, Smitweld and Gleeble) are presented. Also, the results of one-and multi-pass simulation of thermal cycle on the simulator type "TCS 1405 Smitweld" are shown. Finally, the comparison of the results for hardness, impact strength and microstructure testing at one-and multi-pass simulation of HAZ on simulated samples from microalloyed steel TStE 420 are presented.

¹⁾ Strojarski fakultet Slavonski Brod (HR)

1. UVOD

Ispitivanja na simulatoru toplinskog ciklusa omogućavaju kompleksno utvrđivanje sklonosti materijala nastanku pukotina. Kod pojedinih laboratorijskih metoda koje zahtijevaju zavarivanje realnih uzoraka, različitih oblika i dimenzija, jasno se utvrđuje djelovanje pojedinačnog utjecajnog faktora na zavarljivost. Ovakve metode daju informaciju o određenoj vrsti pukotine i za ispitivanje zavarljivosti mora se primijeniti više metoda.

Simulacija toplinskog ciklusa zavarivanja omogućava dobivanje diferencirane ocjene utjecaja pojedinih faktora na nastanak pukotine.

Nedostatak ovih ispitivanja je mogućnost odstupanja parametara simuliranog procesa od stvarnih parametara pri zavarivanju. Pri simulaciji toplinskog ciklusa zavarivanja maksimalna temperatura ciklusa je niža od maksimalne temperature u ZUT-u, praktično ona se približava temperaturi likvidusa osnovnog materijala, a simuliranje također onemogućava utvrđivanje utjecaja metala zavara na svojstva ZUT-a.

Pored navedenih nedostataka dugogodišnja ispitivanja simuliranjem toplinskog zavarivačkog ciklusa su pokazala da se mogu s velikom sigurnošću utvrditi zakonitosti ponašanja određenog materijala pri zavarivanju.

2. SIMULIRANJE TOPLINSKOG ZAVARIVAČKOG CIKLUSA

Simulacija zavarivačkih ciklusa se posljednjih godina upotrebljava pri istraživanju zavarljivosti, što uključuje ispitivanje prisutnosti različitih vrsta mikrostruktura 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 simuliranju toplinskih zavarivačkih ciklusa pojedine mikrostrukture se "sintetički" stvaraju. Tako se ostvaruju povoljni uvjeti za razjašnjenje znatnog broja pitanja koja su u svezi s ponašanjem osnovnog materijala u uvjetima toplinskih zavarivačkih ciklusa. Simulacijom toplinskog ciklusa zavarivanja mogu se ostvariti dovoljno široka područja homogenih i ponovljivih mikrostruktura, tako da se za ispitivanje mehaničkih svojstava mogu upotrebljavati klasični postupci ispitivanja [1].

Međutim, pri simulaciji radi relativno malih dimenzija uzorka, ne dolazi do pojave naprezanja koja se uobičajeno javlja na realnim uzorcima. Nastanak martenzita ili bainita uvjetuje samo lokalnu promjenu volumena što nema izraženiji utjecaj na ukupan volumen i eventualni nastanak naprezanja.

Osim toga, izostaje mogućnost praćenja utjecaja difuzijskog vodika koji može znatno utjecati na svojstva ZUT-a, mada neke suvremene konstrukcije simulatora zavarivačkih ciklusa omogućavaju i praćenje interakcije vodika s metalom. Bez obzira na izvjesna ograničenja, metode simulacije se koriste pri istraživanju utjecaja toplinskih ciklusa na ponašanja osnovnog materijala.

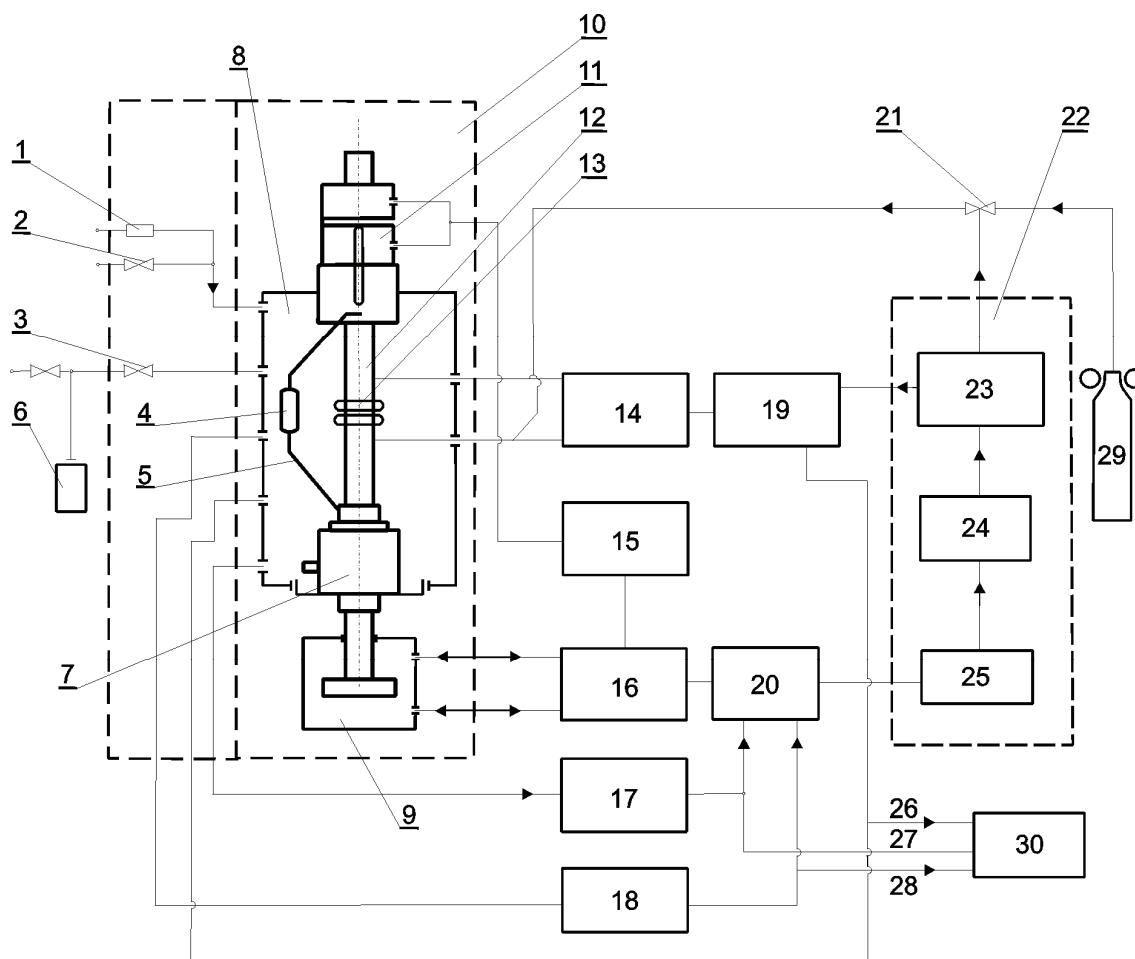
2.1. Vrste simulatora toplinskog zavarivačkog ciklusa

Istraživači koji su se bavili problematikom simulacije toplinskog zavarivačkog ciklusa, razradili su nekoliko modela simulatora toplinskog zavarivačkog ciklusa. Oni se jedan od drugog razlikuju oblikom i dimenzijama uzorka, načinom zagrijavanja i hlađenja, načinom praćenja interakcije vodika s metalom i parametrima zavarivanja [2]. Temeljna razlika između različitih konstrukcija simulatora koji se primjenjuju pri istraživanju zavarljivosti materijala je u

tome koliko i u kojoj mjeri je moguće simulirati sve ono što se događa pri zavarivanju u realnim uvjetima. Starije izvedbe simulatora su uglavnom omogućavale simuliranje toplinskog ciklusa, dok kod novijih izvedbi postoji mogućnost simuliranja i termomehaničkog ciklusa koji postoji u realnim uvjetima zavarivanja. Simuliranje se izvodi na uzorcima takovih dimenzija gdje je moguća primjena klasičnih metoda ispitivanja mehaničkih i drugih svojstava.

Izvori topline za zagrijavanje su na principu elektrootpornog i induksijskog zagrijavanja što omogućava unos dovoljno koncentrirane topline, a potrebna snaga toplinskog izvora je dovoljna za postizanje brzina zagrijavanja koje su jednake brzinama zagrijavanja pri elektrolučnom zavarivanju.

Osim ispitivanja pojedinih mikrostruktura zavarenog spoja, simulatori toplinskog ciklusa omogućuju konstrukciju TTT-dijagrama i CCT-dijagrama.



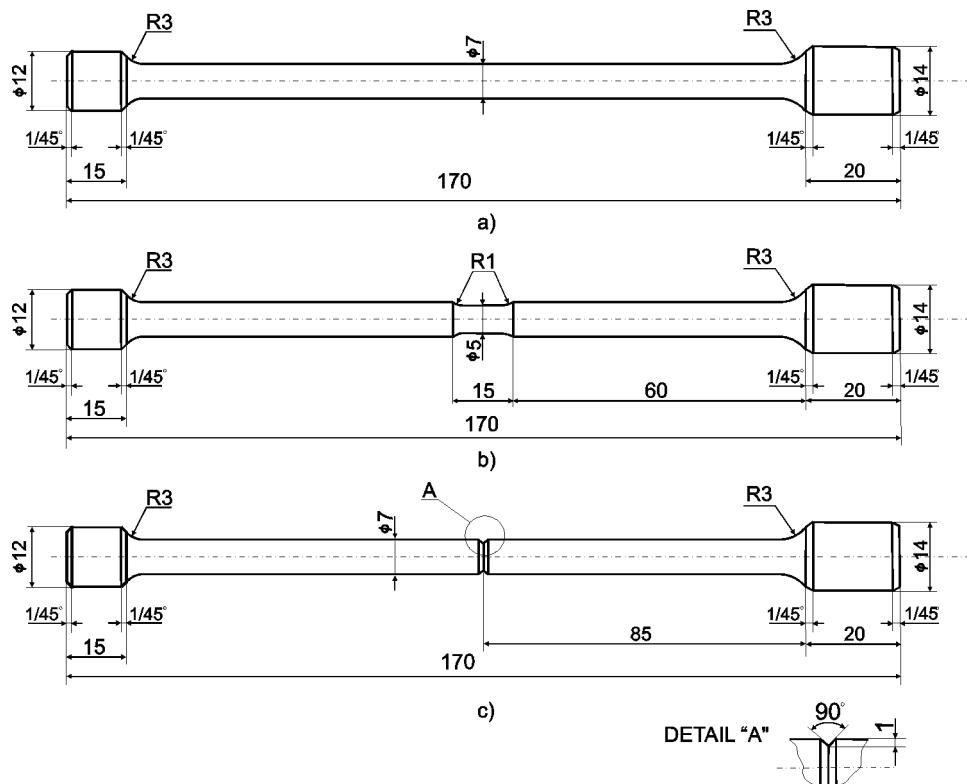
Slika 1. Shematski prikaz uređaja Thermorestor-W [3]

(1 - tlačni ventil, 2 - ventil za ispuštanje plina, 3 - ulazni ventil, 4 - davač izduženja, 5 – termoelementi, 6 - rotaciona pumpa, 7 - davač napona, 8 - vakuum komora, 9 - uljni klip, 10 - kućište, 11 - automatske čeljusti, 12 - ispitni uzorak, 13 - induktor, 14 - VF induktor, 15 - uljna tlačna jedinica, 16 - servo, 17 - pojačalo napona, 18 - pojačalo izduženja, 19 - automatska kontrola temperature, 20 - pomoćno pojačalo, 21 - ventil za hlađenje, 22 - programator, 23 - programator procesa, 24 - postavka programatora, 25 - izmjena programa, 26 - temperatura, 27 - napon, 28 - izduženje, 29 - plin za hlađenje, 30 - trokanalni pisač)

2.1.1. Simulator toplinskog ciklusa Thermorestor-W

Simulator toplinskog ciklusa Thermorestor-W upotrebljava se za kompleksno ispitivanje zavarljivosti tj. sklonosti materijala hladnim, toplim i pukotinama od ponovnog zagrijavanja. Ova vrsta simulatora koji je proizvod japanske tvrtke Fuji Electronic Ind. Co, LTD iz Tokya posjeduje sljedeće programe:

- a) program krutog uklještenja, koji pokazuje sklonost toplim pukotinama u ZUT-u
- b) program rastućih deformacija, kojima se istražuje sklonost toplim pukotinama osnovnog materijala i metala zavara. Ovaj program se preporuča za izbor osnovnog i dodatnog materijala
- c) program nepromijenjenih deformacija za vrijeme hlađenja uzorka sa zarezom koji je zasićen vodikom, te se upotrebljava za istraživanje sklonosti hladnim pukotinama i
- d) program kontroliranih deformacija ili naprezanja za vrijeme toplinske obrade i upotrebljava se za razjašnjenje fenomena relaksacije naprezanja i pukotina od naknadne toplinske obrade.



Slika 2. Skica epruvete za a) ispitivanje toplih pukotina, b) ispitivanje hladnih pukotina i c) ispitivanje pukotina od naknadne toplinske obrade [3].

Osnovne jedinice od kojih se sastoji uređaj su:

- izvor visokofrekventne struje
- kidalica s komorom
- regulacijski ormar s programatorom
- trokanalni pisač i
- hidraulički dio.

Zagrijavanje se izvodi visokofrekventnom strujom, frekvencije 70000 Hz, maksimalne snage 15 kW. Visokofrekventna struja se dovodi na dvostruku induksijsku zavojnicu, unutar koje se postavlja uzorak koji je valjkastog oblika promjera 7 ili 10 mm za probe koje se ispituju na vlak ili četvrtastog presjeka 11×11 mm za određivanje udarne radnje loma. Kod proba za ispitivanje udarne radnje loma se mogu simulirati samo toplinski ciklusi.

Shematski prikaz uređaja Thermorestor-W prikazan je na slici 1.

Ispitivanja koja se provode na Thermorestor-W uređaju zahtijevaju dosta dug vremenski period i veći broj uzoraka. Za svako od navedenih ispitivanja potrebne su odgovarajuće epruvete koje su prikazane na slici 2.

2.1.2. Simulator toplinskog ciklusa tipa Smitweld

Simulator toplinskog ciklusa sastoji se od dva osnovna sustava:

- sustav zagrijavanja i hlađenja
- kontrolni sustav.

Može se koristiti za široko područje metalurških istraživanja vezanih za zavarivanje i toplinsku obradu.

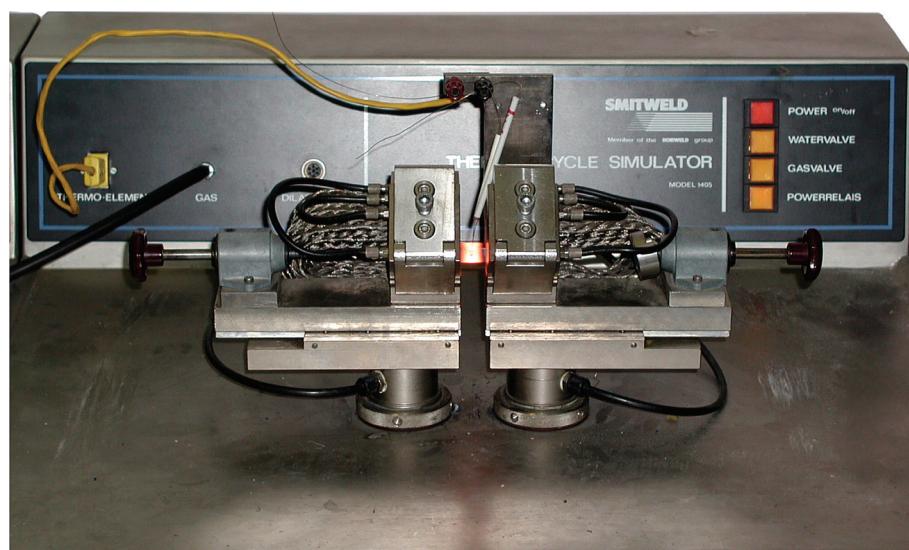
Sustav za zagrijavanje i hlađenje ima takve karakteristike da omogućava ostvarivanje odabranog vremena hlađenja u uskim granicama. Najvažnija funkcija kontrolnog sustava je da uspoređuje izlaz termo-para na epruveti sa zadanim temperaturna-vrijeme ciklusom. Kompjutorizacija kontrolnog sustava omogućuje promjene u ciklusu temperaturna-vrijeme u realnim uvjetima postrojenja.

Faktori ograničenja su maksimalna snaga uređaja (područje zagrijavanja) i maksimalna vrijednost brzine hlađenja.

Na slici 3. prikazan je simulator toplinskog ciklusa TCS 1405 Smitweld u kome se provodi zagrijavanje i hlađenje epruveta.

Na uređaju je moguća i simulacija toplinskog ciklusa u zaštitnoj atmosferi (argon, helij i dr.).

Oprema se priključuje na napon od 380 V i struju frekvencije 50 Hz. Za hlađenje epruvete potreban je priključak na vodovodnu mrežu, a može se koristiti voda slabije kvalitete.



Slika 3. Uređaj za simuliranje uzoraka [4].

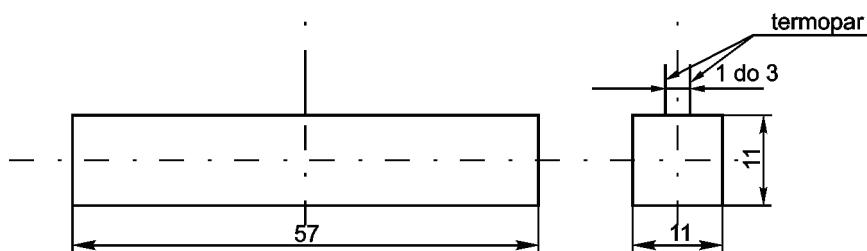
Osobno računalo korišteno u sklopu sustava za ispitivanje je priključeno na napon od 220 V, a ima izlaze za printer, ploter, simulator toplinskog ciklusa i dva priključka za vlačno-tlačnu jedinicu.

Zbog osjetljivosti elektroda za zagrijavanje u svrhu izbjegavanja iskrenja između kontaktne elektrode i površine, epruveta za ispitivanje mora biti polirana. Taj zahtjev je tim jače naglašen ukoliko se želi snimiti dijagram dilatacije. Epruveta za ispitivanje je dimenzija $57 \times 11 \times 11$ mm, a moguće je koristiti i epruvete drugih dimenzija. Moguća su dva načina hlađenja epruvete za vrijeme ispitivanja i to:

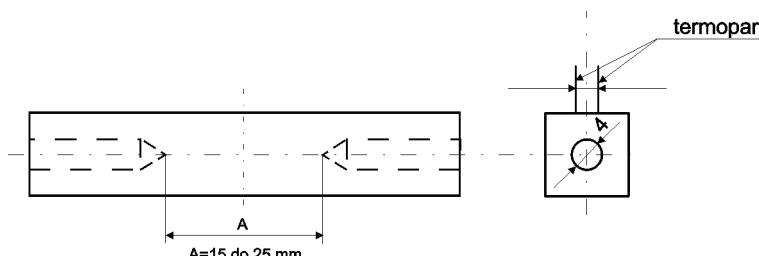
- direktno hlađenje
- indirektno hlađenje.

Da li će se rabiti indirektno ili i direktno hlađenje zajedno, ovisi o zadanom vremenu hlađenja. Za veće brzine hlađenja tj. za kraće vrijeme hlađenja, primjenjuje se direktno i indirektno hlađenje zajedno. Indirektno se hlađenje ostvaruje preko vodom hlađenih čeljusti-elektroda, a direktno kroz prethodno izbušene provrte promjera 4 mm s oba čela epruvete, duljine 15 do 25 mm.

Na slikama 4. i 5. su prikazane dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje i indirektno i direktno hlađenje.



Slika 4. Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno hlađenje [4].



Slika 5. Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno i direktno hlađenje [4].

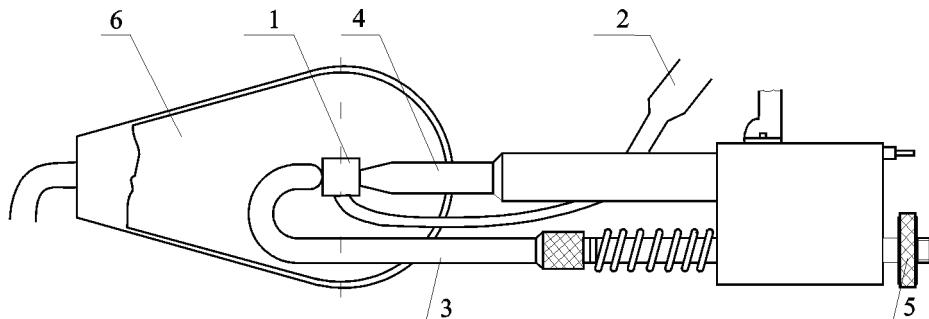
Promjena temperature tijekom ispitivanja registrira se preko termopara postavljenog na površinu epruvete. Postavljanje termopara prikazano je na slici 6.

Termo-parovi se postavljaju na sredini epruvete gledajući po uzdužnoj simetrali. Nakon toga epruveta se postavlja na donji nepomični dio uređaja, a zatim se steže preko steznih čeljusti-elektroda. Udaljenost steznih čeljusti u horizontalnoj ravnini iznosi 10 do 25 mm, ovisno o brzini hlađenja.

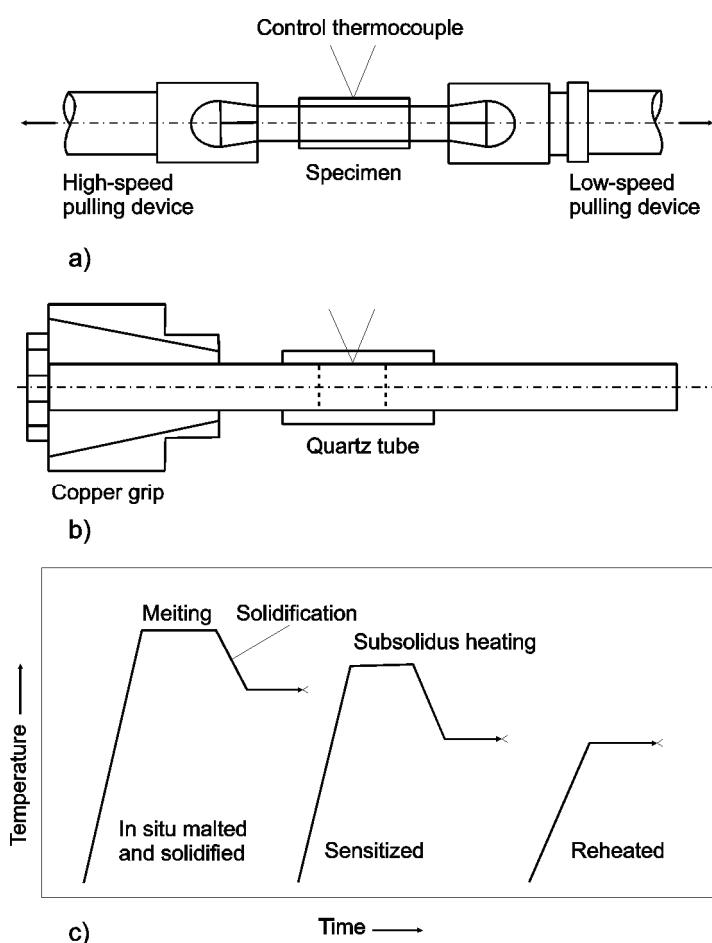
Da bi se spriječio utjecaj okoline može se simulacija provoditi u zaštiti inertnog plina, na primjer argona. Pri ispitivanju se koristi argon čistoće 99,9 %, a protočna količina je 10 l/min.

Pri mjerenu dilatacije za vrijeme toplinskog ciklusa koristi se dilatometar prikazan na slici 6.

Sastoji se od dva kvarcna senzora od kojih je jedan pomičan i daje signal o promjeni dimenzija epruvete. Postavlja se na sredinu epruvete gledano na uzdužnu os epruvete.



Slika 6. Položaj dilatometra, termopara i jedinice plinske zaštite u odnosu na epruvetu za ispitivanje [4] (1 - epruveta, 2 - termopar, 3 - nepomični senzor dilatometra, 4 - pomični senzor dilatometra, 5 - mikrometarski vijak za pridržavanje dilatometra, 6 - jedinica plinske zaštite).



Slika 7. Gleeble test metoda: a) glavni dijelovi, b) zatvoreno ispitivanje na otpornost prema zagrijavanju i c) programirani toplinski ciklus [5].

2.1.3. Simulator toplinskog ciklusa Gleeble

Gleeble simulator se dugo vremena upotrebljava kao uređaj za istraživanje metalurških pojava na istraživačkoj razini i testiranja materijala da bi se predviđelo njegovo ponašanje u proizvodnji. Prednost uređaja nad ostalim ove vrste ogleda se u tome što on stvara veliku količinu mikrostrukture koja predstavlja mali teško shvatljivi sloj u zavaru.

Gleeble uređaj omogućava virtualnu simulaciju bilo kojeg termomehaničkog procesa i shematski je prikazan na slici 8 [5]. To je u potpunosti računalni sustav programiran tako da daje referentne signale za zatvoreni krug kontrole toplinskih i mehaničkih operacija. Gleeble uređaj omogućava virtualnu simulaciju bilo kojeg termomehaničkog procesa. Zagrijavanje se izvodi protokom niskofrekventne izmjenične struje s toplinskom vrijednošću 20 000 °C/s [6].

3. PLAN POKUSA

Za ispitivanje na simulatoru tipa Smitweld pripremljene su probe dimenzija $57 \times 11 \times 11$ mm, od materijala TStE 420. Probe su izrezivane u pravcu valjanja osnovnog materijala. Debljina osnovnog materijala bila je 15 mm.

Predviđeno je ispitivanje tvrdoće i žilavosti simuliranih uzoraka. Ovim ispitivanjem se želi pokazati ovisnost tvrdoće i udarne radnje loma o brzini hlađenja tj. vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ za najkritičniju zonu zavarenog spoja koja se nalazi uz liniju staljivanja.

Pokus simuliranja se sastojao u simuliranju zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu i dva prolaza. Pri simuliranju u jednom prolazu uzorci su zagrijavani na različite temperature (600, 700, 780, 960, 1100 i 1350 °C), a nakon toga uzorci su hlađeni na zraku. Kako su neki uzorci zagrijavani na temperaturu nižu od 800 °C nije se moglo mjeriti vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C, nego se mjerilo vrijeme hlađenja 500 do 300 °C ($\Delta t_{5/3}$).

Parametri simuliranja u jednom prolazu prikazani su u tablici 1. Svrha eksperimenta je utvrđivanje promjene strukture nastale uslijed zagrijavanja i uvid u promjene tvrdoće.

Tablica 1. Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu

Oznaka probe	T_{\max} , °C	v_{zg} , °C/s	Zadržavanje na T_{\max} , s	Vrijeme hlađenja, s	T_z , °C
600	601	200	3	$\Delta t_{5/3}=10,6$	< 150
700	703	200	3	$\Delta t_{5/3}=10,3$	< 150
780	795	200	3	$\Delta t_{5/3}=9,8$	< 150
960	970	200	3	$\Delta t_{8/5}=10,4$	< 150
1100	1109	200	3	$\Delta t_{8/5}=10,5$	< 150
1350	1366	200	3	$\Delta t_{8/5}=9,6$	< 150

gdje je:

v_{zg} - brzina zagrijavanja, °C/s

T_z - izmjerena temperatura na kraju mjerjenja ciklusa zavarivanja, °C

T_{\max} - maksimalna temperatura toplinskog ciklusa °C

$\Delta t_{5/3}$ – vrijeme hlađenja od 500 do 300 °C.

Pri simuliranju u dva prolaza, probe su označavane brojem koji predstavlja temperaturu zagrijavanja, a za svaku temperaturu su načinjena po tri uzorka. Brzina zagrijavanja uzorka je bila 200 °C/s.

U tablici 2. prikazani su parametri simuliranja uzoraka u dva prolaza.

Tablica 2. Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza

Oznaka probe	T_{max} , °C I ciklus	$\Delta t_{5/3}I$ ili $\Delta t_{8/5}I$, s	T_{max} , °C II ciklus	$\Delta t_{5/3}II$ ili $\Delta t_{8/5}II$, s	$v_{zg.}$, °C/s	Zadržavanje na T_{max} , s	T_z , °C
600-1	1357	$\Delta t_{5/3}=9,4$	604	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
600-2	1365	$\Delta t_{5/3}=10,0$	606	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
600-3	1359	$\Delta t_{5/3}=9,9$	601	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
700-1	1358	$\Delta t_{5/3}=9,4$	713	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
700-2	1360	$\Delta t_{5/3}=9,8$	710	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
700-3	1366	$\Delta t_{5/3}=9,8$	708	$\Delta t_{5/3}=10,5$	200	3	< 150
780-1	1355	$\Delta t_{5/3}=10,2$	794	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
780-2	1360	$\Delta t_{5/3}=9,9$	800	$\Delta t_{5/3}=10,3$	200	3	< 150
780-3	1380	$\Delta t_{5/3}=9,7$	796	$\Delta t_{5/3}=10,3$	200	3	< 150
960-1	1356	$\Delta t_{8/5}=10,0$	980	$\Delta t_{8/5}=10,7$	200	3	< 150
960-2	1367	$\Delta t_{8/5}=10,0$	971	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
960-3	1362	$\Delta t_{8/5}=9,6$	993	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1100-1	1365	$\Delta t_{8/5}=9,5$	1148	$\Delta t_{8/5}=10,4$	200	3	< 150
1100-2	1357	$\Delta t_{8/5}=9,4$	1118	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1100-3	1361	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1118	$\Delta t_{8/5}=10,4$	200	3	< 150
1350-1	1357	$\Delta t_{8/5}=9,4$	1372	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1350-2	1356	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1386	$\Delta t_{8/5}=10,2$	200	3	< 150
1350-3	1357	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1412	$\Delta t_{8/5}=9,6$	200	3	< 150

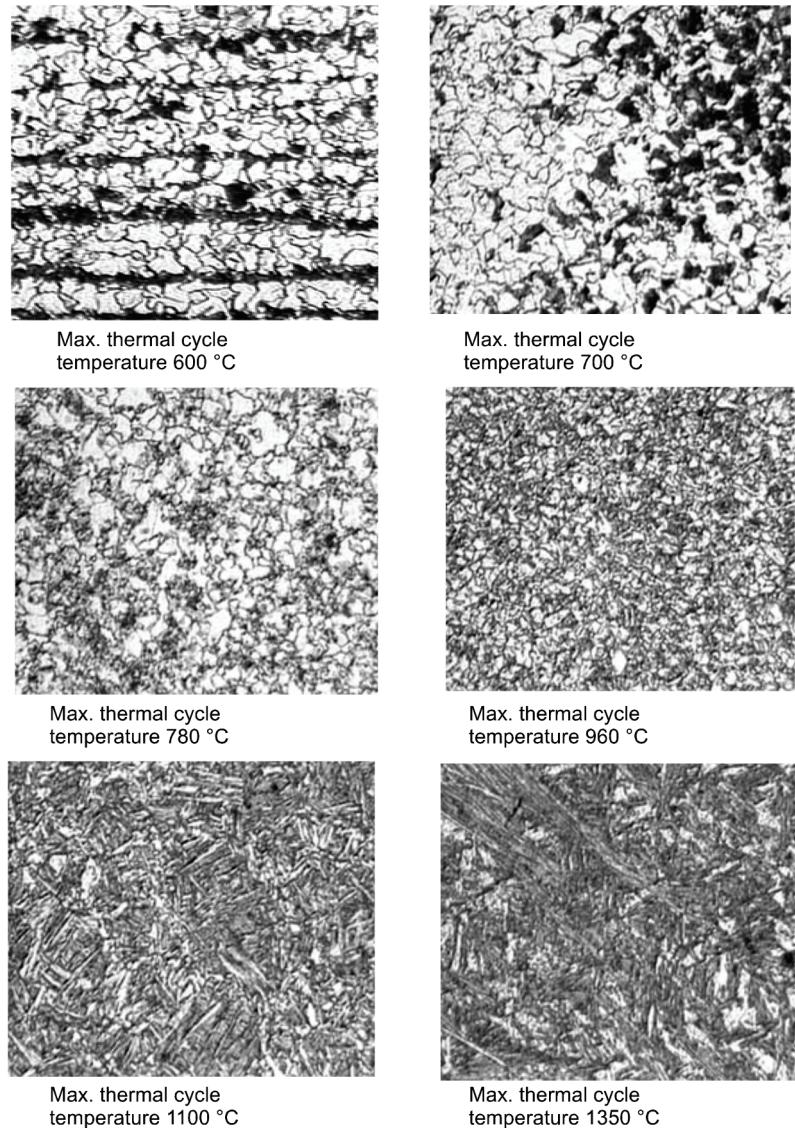
3.1. Rezultati pokusa simuliranja

Nakon pripreme i poliranja uzoraka dobivenih u prvom pokusu snimljene su mikrostrukture pri povećanju 200 puta. Mikrostrukture su prikazane na slici 8.

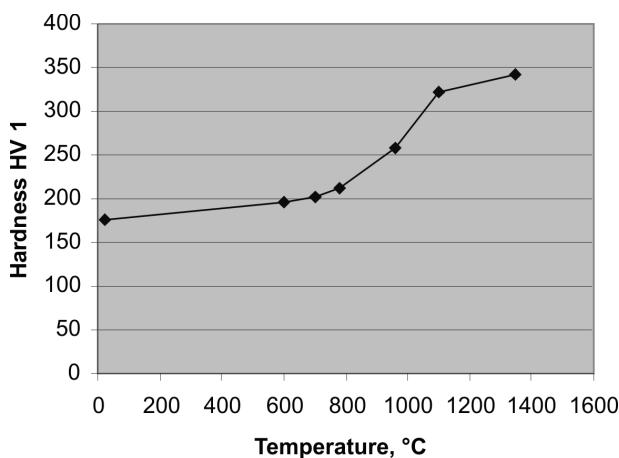
Struktura čelika TStE 420 prije simulacije procesa zavarivanja je sitnozrnata feritno-perlitna koja je trakasta kao posljedica završne obrade valjanjem. Na uzorku koji je zagrijavan do 600 °C nije došlo do značajnih promjena u strukturi. Pri temperaturi zagrijavanja na 700 °C došlo je do povećanja zrna i početka raspada perlitne faze. Pri ispitivanju je uočeno izdvajanje precipitata. Zbog toga dolazi do porasta tvrdoće. Na uzorku koji je zagrijavan na 780 °C došlo je do disperzije precipitata u feritnoj matrici uz daljnji porast tvrdoće, a na temperaturi 960 °C dolazi do usitnjavanja zrna uz ravnomjerniju raspodjelu precipitata. Kod uzorka zagrijivanih na više temperature (1100 i 1350 °C) dolazi do strukturne transformacije u bainitno-troostitnu strukturu nastalu utjecajem topline. Takva struktura uvjetuje još veći porast tvrdoće [7].

Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće mjerene u sredini uzorka o temperaturi prikazana je na slici 9. Pri simuliranju u dva prolaza prema podacima iz tablice 2. dobivena je ovisnost tvrdoće od temperature drugog ciklusa simuliranja prikazana na slici 10.

Također je vršeno mjerjenje udarne radnje loma na simuliranim uzorcima iz ovog pokusa na temperaturi 20 °C. Dijagram ovisnosti udarne radnje loma kod dvostrukog simuliranja o T_{max} drugog ciklusa simuliranja prikazan je na slici 11. Iz dijagrama je vidljivo da su maksimalne vrijednosti udarne radnje loma dobivene kada je T_{max} drugog ciklusa simuliranja iznosila 780 °C.

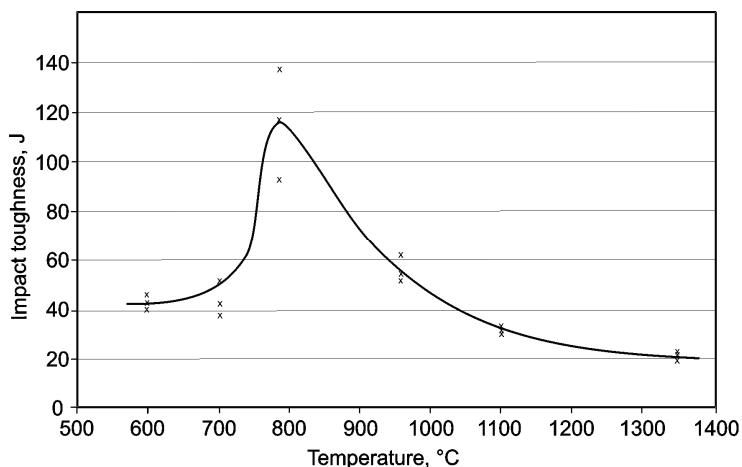
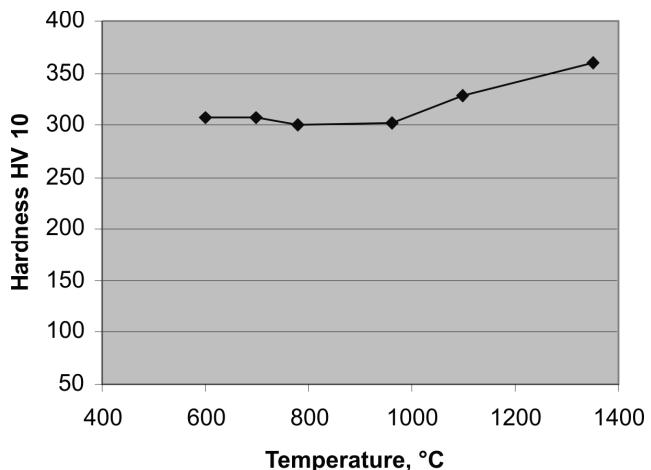


Slika 8. Struktura čelika TStE 420 nakon simulacije procesa zavarivanja (temperatura zagrijavanja 600, 700, 780, 960, 1100 i 1350 °C) – povećanje 200×.



Slika 9. Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće od temperature simuliranja u jednom prolazu (temperatura zagrijavanja 20, 600, 700, 780, 960, 1100 i 1350 °C)

Slika 10. Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće od temperature simuliranja u dva prolaza (temperatura zagrijavanja
 1350 °C - prvi prolaz i 600,700,
 780,960, 1100 i 1350 °C - drugi prolaz)



Slika 11. Dijagram ovisnosti udarne radnje loma o T_{\max} drugog ciklusa simuliranja

4. ZAKLJUČAK

Obično se pri simuliranju jednoprolažnog zavarivanja prihvaćaju toplinski ciklusi s maksimalnom temperaturom između 1200 °C i 1350 °C. U ispitivanjima koja su provodili autori ovog rada maksimalna temperatura toplinskih ciklusa bila je od 1350 do 1380 °C.

Simulacija jednoprolažnog ZUT-a pruža mogućnost za otkrivanje najslabije točke u zavarenom spoju i predstavlja relativno brži i iznimno koristan način za proučavanje relevantnih strukturnih promjena u ZUT-u. Rezultati dobiveni pri jednoprolažnoj simulaciji se ne mogu upotrebljavati pri usporedbi s višeprolažnim zavarivanjem te se smatra da se ispitivanja u cilju svrstavanja čelika i postupka zavarivanja moraju provoditi uz primjenu simulacije višeprolažnog zavarivanja.

Pri jednoprolažnoj simulaciji zadovoljavajuća tvrdoća i mikrostruktura dobivene su pri simulaciji toplinskih ciklusa na temperaturi 1100 do 1350 °C tj. dobivena je bainitno – troostitna struktura i tvrdoće od 320 do 350 HV što garantira i zadovoljavajuću udarnu radnju loma.

Kod simulacije toplinskih ciklusa u dva prolaza utvrđeno je da brzi toplinski ciklus s niskom maksimalnom temperaturom ($T_{\max} < 500$ °C) u narednoj simulaciji nema posljedica na strukturu pa se može odbaciti. Također se ne primjenjuje austenitizacija na visokoj temperaturi jer se njome "briše" utjecaj prethodnih simulacija, odnosno prethodno korištenih toplinskih ciklusa.

Istraživanje pokazuje da su moguće tipične kombinacije u višeprolaznoj simulaciji koje se sastoje od jedne ili dvije austenitizacije s popuštanjem. Kod svih kombinacija, temperatura prvog maksimuma je ≈ 1350 °C i odnosi se na točke koje su udaljene 0,5 mm od linije taljenja.

Za razliku od pojedinih autora, koji smatraju da je potrebno koristiti cikluse koji se dobiju na osnovi konkretnih mjerena pri realnom zavarivanju, noviji radovi pokazuju opravdanost istraživanja uz primjenu "srednjeg" toplinskog ciklusa [5].

Ukoliko se primjenjuje mikrolegirni čelik, toplinski ciklus $T_{\max} > A_{c3}$, dovodi do povećanja austenitnog zrna, što je praćeno smanjenjem žilavosti. Ako se primjeni višestruki toplinski ciklus koji ima dva temperaturna maksimuma, T_1 i T_2 pri čemu je npr. $T_1 = 1300$ °C a $T_2 = 600$ °C doći će do neznatnih promjena strukture nastale nakon prvog ciklusa [7].

Najviše vrijednosti udarne radnje loma su vezane za sitno feritno zrno kao rezultat maksimuma na temperaturi malo višoj od A_{c3} , a u prikazanom istraživanju ta temperatura je iznosila 780 °C. Iznad ove temperature dolazi do smanjenja udarne radnje loma. Osim toga maksimum udarne radnje loma na 780 °C smanjuje tvrdoću. Daljnjim povećanjem temperature dolazi do pada udarne radnje loma (slika 11), što je uvjetovano porastom tvrdoće (dijagram na slici 10).

5. LITERATURA

- [1] Bernasovsky, P. "The study of steels weldability by simulation of thermal and deformation cycles of welding on the equipment thermorestor-w". iiw doc. ix-975-76.
- [2] Böllinghaus, T.; Horst, H. "Hot cracking phenomena in welds", Springer, ISBN-13: 9783540223320, Berlin, 2005.
- [3] Dunder, M.; Ivandić, Ž.; Samardžić, I. "Optimization of welding parameters of micro alloyed hsla steel", The 8th international symposium of Croatian metallurgical society "Materials and metallurgy", Šibenik, Croatia, 2008.
- [4] Dunder, M.; Samardžić, I.; Klarić, Š. "Influence of cooling time $t_{8/5}$ on welded joint properties of the thermal cycle simulated taste 420 specimens", Technical Gazette 14 (2007) (1,2); 47-57.
- [5] Dynamic systems, inc. gleeble.com. retrieved January 31, 2009 from <http://www.gleeble.com>
- [6] Lampman, T. "Weld integrity and performance", Asm international, ISBN 0-87170-600-8, Sheffield, 1997.
- [7] Semjan, V. "Teorija zavarljivosti čelika", Energoinvest, institut za zavarivanje, Sarajevo, 1989.