

**MATEMATIČKO MODELIRANJE TOPLOTNIH PROCESA
PRI ZAVARIVANJU ČELIKA RAZLIČITIM POSTUPCIMA
MATHEMATICAL MODELLING OF HEAT TRANSFER FOR
DIFFERENT STEEL WELDING PROCESSES**

ZORAN ODANOVIĆ

Vojnotehnički institut VJ, Beograd, Jugoslavija

Primljeno: 23.12. 2002.

IZVOD

U radu su prikazani rezultati numeričke simulacije prenosa toplote pri procesu zavarivanja čelika. Simulacija je vršena za slučaj elektrolučnog zvarivanja MAG postupkom i zavarivanja elektronskim snopom i to na čelicima za poboljšanje Nionikral 70 (NN70) i 18MND5. Rešavanje algoritma matematičkog modela se zasnivalo na primeni dvodimenzionog numeričkog modela nestacionarnog prenosa toplote. Model omogućava proračun dimenzija spoja, temperatura u svakoj tački spoja, kao i brzina zagrevanja i hladjenja u tim tačkama. Provera i potvrda modela obavljena je kroz eksperimente izrade serije modelnih zavarenih spojeva i na osnovu podataka iz literature. Dobijeni rezultati pokazuju zadovoljavajuću tačnost numeričkog modela koja je u ovom slučaju potvrđena poredjenjem proračunatih i izmerenih dimenzija spoja. Odstupanje proračunatih dimenzija spoja od izmerenih u proseku iznosi 12.5%. Prikazani model može da predstavlja dobru osnovu za razvoj modela predviđanja struktura i osobina u ZUT-u zavarenog spoja čelika.

Ključne reči: modeliranje zavarivanja, matematički model, numerička simulacija, prenos toplote

ABSTRACT

A numerical heat transfer simulation during the steel welding is presented. Simulation was performed for MAG and EB welding process on Q&T steels HY 100 and 18MND5. Calculations are based on two-dimensional transient heat transfer model. Mathematical model enables calculations of weld joint dimensions, temperature distribution in weld joint cross section and heating and cooling rates. For model calibration and verification a series of welding experiments are applied by GMA welding method. Numerical model validation is performed also for electron beam welding, based on data from literature. Obtained results show that accuracy of numerical model is very satisfactory and are verified by the comparison with calculated and measured joint dimensions. Numerical results of weld joint geometry deviate from measured values by 12.5%. Presented numerical model could be used as base for developing a model for structure and properties anticipation in welded joints.

Key words: weld modelling, mathematical model, numerical simulation, heat transfer

UVOD

Nagli razvoj računarskih i informativnih tehnologija doveo je do široke primene računara u svim oblastima nauke, tehnike, industrije kao i u svakodnevnom životu. U oblasti zavarivanja primena računara obuhvata analizu troškova nekog procesa zavarivanja, izbor osnovnog i dodatog materijala za određene tehničko - tehnološke zahteve, planiranje tehnologije procesa zavarivanja, predviđanje ponašanja zavarenih spojeva u eksploatacionim uslovima, upravljanje robotima za velikoserijska zavarivanja i dr. Dobijanje potrebnih informacija u ovoj oblasti uz pomoć računarske tehnologije se zasniva na primeni neke od sledećih metodologija:

- **baze podataka**, sa proverenim parametrima zavarivanja za pojedine konkretne slučajeve, sa rezultatima testova zavarljivosti, na primer za hladne i tople prskotine, ili podacima o dodatnim materijalima i dr.,
- **empirijske ili parametarske jednačine**, koje uzimaju u obzir glavne parametre zavarivanja u analitičkom obliku i na osnovu kojih se može predvideti zavarljivost metala iz podataka kao što je hemijski sastav i parametri zavarivanja,
- **ekspertske sistemi**, koji se zasnivaju na primeni raspoloživih znanja iz konkretne oblasti i mogu se koristiti za izbor tehnologije zavarivanja, procene i sprečavanja zavarivačkih grešaka, izbor dodatnog materijala, projektovanje i optimizaciju zavarenih komponenti i dijagnostike zavarenih konstrukcija,
- **matematički modeli**, koji omogućavaju analizu kompleksnih fenomena koji karakterišu procese zavarivanja, kao što su prenos toplote, metalurške promene u osnovnom metalu i metalu šava, zaostali naponi i dilatacije [1,2].

Razvoj savremenih čelika i drugih legura visoke čvrstoće, zahteva i razvoj odgovarajućih tehnologija zavarivanja. U slučajevima kada ne postoji dovoljno prethodnih iskustava, oslanjanje isključivo na eksperimentisanje zahteva puno vremena i sredstava.

Analitičke metode su se pokazale kao vrlo korisne i mogu značajno da smanje vreme i troškove za dobijanje potrebnih informacija. Razvojem računarske tehnike, numeričke metode su se nametnule kao jedna od ključnih mogućnosti za modeliranje procesa zavarivanja i time ekonomičnog dobijanja neophodnih podataka za definisanje tehnologije zavarivanja. Kompleksnost procesa koji se odvijaju tokom zavarivanja, kao i nelinearna priroda protoka toplote tokom procesa, predstavljaju veliki problem pri pokušajima uspešnog modeliranja procesa zavarivanja. Uspešno modeliranje i predviđanje čvrstoće zavarenog spoja, mikrostrukture, zaostalih napona, distorzija, zahteva pouzdanu analizu termalnog ciklusa, kroz poznavanje maksimalnih temperatura u spoju i vremena hladjenja u kritičnoj oblasti od 800 do 500°C. Ova dva faktora

prvenstveno utiču na veličinu metala šava, veličinu zone pod uticajem toplote (ZUT) i zajedno sa hemijskim sastavom i transformacionom kinetikom definišu strukturu spoja.

Prve analize temperaturnih polja pri zavarivanju zasnivale su se na analitičkim rešenjima Fourier-ove diferencijalne jednačine prenosa toplote primenjenoj za slučaj pokretnog izvora toplote koje su definisali Rosenthal [3] i Rikalin [4], međutim analitička rešenja imaju vrlo ograničenu primenu za rešavanje praktičnih problema. Sa napretkom računarskih tehnologija i razvojem numeričkih tehnika, kao što je metoda konačnih razlika i metoda konačnih elemenata, nastali su mnogo ekzaktniji termalni modeli. Oni su omogućavali dodatnu analizu fenomena uključujući nelinearne termalne osobine, latentnu toplotu, kao i različite geometrije zavarenog spoja. Simulacija procesa zavarivanja metodom konačnih razlika prikazana je u radovima Pavelića [5], Grill-a [6], Kou-a [7] i dr. Primena metode konačnih elemenata prikazana je u radovima Friedmana-a [8], Krutz-a [9] i Goldak-a [10]. Poseban problem predstavlja numerička simulacija elektrolučnog postuka zavarivanja sa potrošnom elektrodnom žicom, što je razmatrano u radovima [11-13].

U ovom radu razvijen je i prikazan numerički model zavarivanja, zasnovan na toplotnom bilansu procesa. Provera i potvrda modela vršena je na eksperimentalno dobijenim podacima tokom elektrolučnog zavarivanja topivom elektrodnom žicom u zaštitnoj atmosferi gasa CO₂ (MAG), kao i na podacima iz literature koji se odnose na zavarivanje elektronskim snopom (EBW).

MATEMATIČKI MODEL PROCESA ZAVARIVANJA

Matematičko modeliranje predstavlja pokušaj kvantitativnog opisa nekog fizičkog procesa ili nekog fenomena fizičkog procesa, kroz sistem algebarskih ili diferencijalnih jednačina, zajedno sa polaznim i graničnim uslovima. Principijelni značaj matematičkog modeliranja ogleda se u sledećim aspektima:

i) omogućuje teoretsku analizu promene procesnih promenljivih, uz primenu računara, a sve u cilju optimizacije i praćenja toka procesa. Na taj način se omogućava smanjenje značajnih troškova industrijskih i poluindustrijskih eksperimenata,

ii) unapredjenje opšteg razumevanja suštine pojedinih procesa i medjuzavisnosti izmedju osnovnih procesnih promenljivih,

iii) može da pomogne pri planiranju, projektovanju, kao i interpretaciji rezultata poluindustrijskih i industrijskih ispitivanja.

Matematički modeli mogu biti klasifikovani na razne načine i uglavnom se koristi klasifikacija na osnovu vremenske baze na stacionarne modele, kod kojih se promenljive lokalno ne menjaju sa vremenom, pa su svi akumulativni članovi sistema jednaki nuli, kao i na nestacionarne ili dinamičke modele, kod kojih se zavisno promenljive lokalno menjaju sa vremenom. Dinamičke modele kara-

kteriše daleko veća prilagodljivost i višestranost u odnosu na stacionarne modele, ali u isto vreme su kompleksniji i skuplji.

Razvoj matematičkog modela nekog procesa karakteriše više faza, kao što su: postavka problema, matematička formulacija, matematičko rešenje, potvrda i kao krajnji cilj primena modela. Postavka modela, mora da zadovolji osnovne relacije bilansa energije i mase. Matematička formulacija predstavlja opis procesa od interesa kroz sistem algebarskih ili diferencijalnih jednačina uz definisanje polaznih i graničnih uslova. Matematičko rešavanje može biti analitičko ili numeričko. Modeli se po pravilu rešavaju numeričkim metodama, dok su analitička rešenja korisna u proveru pouzdanosti dobijenih numeričkih rešenja. Izbor numeričkog metoda rešavanja zavisi od više faktora, kao što su vreme rada računara, cena i potrebna tačnost metode. Potvrda modela je od vitalnog značaja u razvoju modela i od ove faze se zahteva da osigura da model verno simulira proces. Pretpostavke modela se proveravaju praktičnim merenjem parametara procesa u realnim uslovima u pogonu, u poluindustrijskim opitima ili na fizičkom modelu. Zadnja faza je primena modela radi simuliranja i predviđanja toka nekog procesa. Medjutim i u ovoj fazi primene modela moraju se imati u vidu ograničenja koja su rezultat usvojenih pretpostavki ugrađenih u matematički model [14].

Model prenosa toplote pri zavarivanju, prikazan u ovom radu se zasniva na proračunu bilansa toplote tokom procesa zavarivanja. Nelinearni sistem je redukovan do kvazi-stacionarnih uslova. Prenos toplote je opisan Furierovim diferencijalnim jednačinama provodjenja toplote, graničnim i polaznim uslovima. Kao rezultat numeričkog proračuna dobijeno je temperaturno polje zavarenog spoja u zavisnosti od položaja izvora toplote, odnosno vremena zavarivanja. Složenost i kompleksnost procesa zavarivanja, kao i ponašanje materijala tokom procesa, zahtevali su uvođenje odredjenih pretpostavki i uopštenja u model [15].

Proračun raspodele temperatura u metalu koji se zavaruje u funkciji položaja i vremena zavarivanja - $T(x,y,z,t)$, se zasniva na rešavanju jednačine nestacionarnog provodjenja toplote, date u obliku paraboličnih diferencijalnih jednačina:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q = \rho * c * \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

gde je: Q - uneta ili odvedena toplota / $W m^{-3}$, k - toplotna provodljivost / $W m^{-1} K^{-1}$, T - temperatura / K , t - vreme / s , ρ - gustina / $kg m^{-3}$, c - specifična toplota / $J kg^{-1} K^{-1}$.

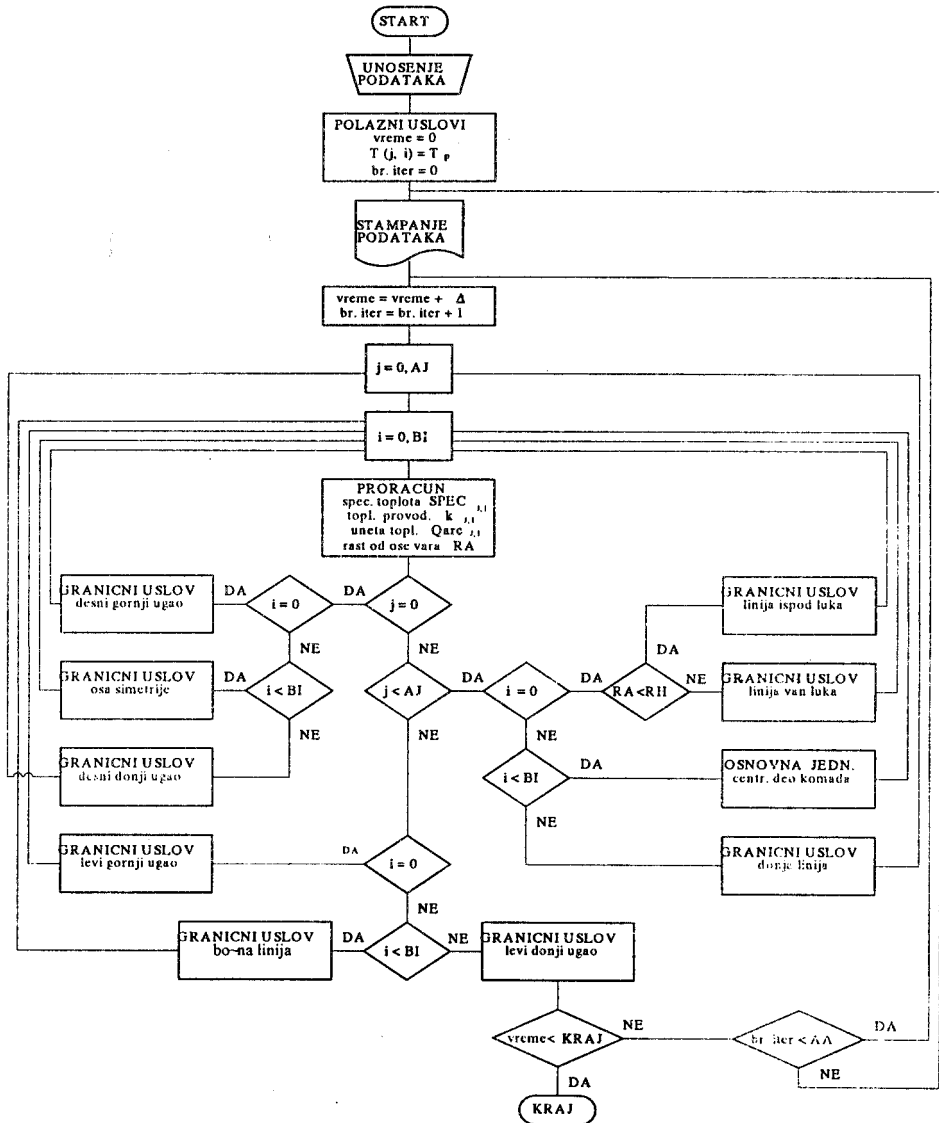
Proračun temperaturnih polja zasnovan na rešavanju trodimenzione jednačine (1) zahteva dugo računarsko vreme, ako se rešava nekim od numeričkih metoda. Medjutim, ako se pretpostavi da se izvor toplote kreće

konstantnom brzinom duž prave linije na definisanom putu, uslovi pod kojima se odvija zavarivanje mogu se usvojiti kao kvazistacionarni. Uvodjenjem pokretnog koordinatnog sistema, čiji se početak postavlja na izvor toplote, raspodela temperatura se tada može smatrati stacionarnom u odnosu na pokretni koordinatni sistem. U tom slučaju moguće je analizu vršiti u ravni normalnoj na pravac zavarivanja.

Kod zavarivanja čelika brzina kretanja izvora toplote je daleko veća od brzine provodjenja u pravcu kretanja izvora toplote. Neto protok toplote unutar bilo kojeg beskonačno malog elementa na poprečnom preseku zavarenog spoja, koji je normalan na pravac zavarivanja, se može zanemariti u odnosu na toplotu koja se provodi kroz sam isečak, odnosno $\delta T/\delta x=0$, pa se i prvi član u jednačini (1) može zanemariti. Razvijanjem jednačine (1) i primenom metode konačnih razlika dobija se jednačina koja opisuje provodjenje toplote u centralnom delu komada koji se zavaruje. Član Q predstavlja toplotni fluks tokom procesa koji može biti pozitivan ili negativan. Unos toplote izvorom toplote ima pozitivan znak, ili je negativan, kada postoje gubici toplote konvekcijom ili radijacijom. Ako u nekoj tački posmatranog sistema postoji dovod i odvod toplote, ovaj član je jednak toplotnom bilansu u toj tački. Granični uslovi modela definisani su kroz jednačine koje opisuju prenos toplote iz elemenata referentne površine normalne na pravac zavarivanja, koji se nalaze na gornjoj, donjoj i bočnoj površini, kao i na liniji koja se nalazi na pravcu zavarivanja i uglovima referentne ravni. Kao polazni uslov, usvojeno je da se sve tačke u komadu koji se zavaruje, a time i u referentnoj ravni, na početku zavarivanja nalaze na jednakoj, sobnoj temperaturi. Model i način proračuna omogućavaju korišćenje i neke druge temperature različite od sobne, što znači da je moguće vršiti celokupan proračun za uslove kada se zavaruje predgrejan komad. Detalji matematičke formulacije problema prikazani su u literaturi [15,17].

Tok proračuna temperaturnih polja pri zavarivanju čelika prikazan je na slici 1. Prvi korak pri radu sa modelom je startovanje modela i unošenje podataka za proračun. Polazni podaci za proračun se sastoje od hemijskog sastava čelika koji se zavaruje, dimenzija komada koji se zavaruje i parametara zavarivanja (napon u V , struja u A , brzina zavarivanja mm/s , postupak) koji se simuliraju. Na osnovu hemijskog sastava (u masenim %) iz jednačina iz literature [18] se izračunavaju likvidus temperatura (T_l), odnosno solidus temperatura (T_s), koje definišu liniju koja razdvaja oblast metala šava i osnovnog nerastopljenog metala. Oblast zavarenog spoja koja je pod uticajem termalnih promena koje dovode do strukturnih promena u osnovnom metalu (ZUT), definisana je kod većine konstrukcionih čelika temperaturama transformacije A_{c1} i A_{c3} i ove temperature izračunavane su na osnovu podataka iz literature [18]. U daljem toku proračuna se izračunava specifična toplota i toplotna provodljivost, za tačke koje su definisane položajem u poprečnoj referentnoj ravni, kao i vremenom t . U zavisnosti od položaja na referentnoj površini primenjuje se osnovna jednačina provodjenja ili jednačine graničnih uslova, a prema toku proračuna prikazanom na slici 1. Izračunate temperature se nakon definisanog broja iteracija memorišu u računaru i to za svaku sekundu trajanja simulacije zavarivanja. Nakon ukupnog zadatog vremena simulacija.

odnosno postizanja uslova završetka simuliranja procesa zavarivanja, proračun se prekida. Kao rezultat proračuna dobijaju se matrice sa vrednostima temperatura na poprečnom preseku komada koji se zavaruje za svaku sekundu trajanja simulacije zavarivanja.



Slika 1 - Blok dijagram toka numeričkog proračuna

Figure 1 - Numerical calculation flow chart

EKSPERIMENT

Provera i primena izloženog numeričkog modela obavljena je kroz eksperimente elektrolučnog navarivanja, koji su izvedeni na čeliku Nionikral 70 (NN70), koji spada u grupu Ni-Cr-Mo niskolegiranih čelika visoke čvrstoće. Čelik je toplo valjan i isporučen u poboljšanom stanju. Provera numeričkog modela vršena je i za slučaj zavarivanja elektronskim snopom, Mn-Ni-Mo čelika 18MND5 u poboljšanom stanju, pri čemu podaci potiču iz literature [19]. Hemijski sastav čelika korišćenih u ovom istraživanju prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1 -Hemijski sastav čelika Nionikral 70 (NN70) i 18MND5 [19]

Table 1 -Chemical composition of HZ 100 and 18MND5 steels

Čelik	Postupak	Hemijski sastav (mas %)										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Al	V	Mo
NN70, lim 6 mm	MAG, navarivanje	0.11	0.31	0.27	0.010	0.004	1.01	0.24	2.64	0.046	0.08	0.28
18MND5, 95x95 mm	Elektronski snop	0.18	0.24	1.51	0.001	0.0005	0.18	0.08	0.63	0.02	/	0.49

Navarivanje je izvedeno elektrolučnim (MAG) postupkom sa žicom VAC 60Ni prečnika ϕ 1.2 mm. Procesi navarivanja vršeni su konstantnom brzinom sa količinama unete toplote od 0.4 do 1.4 kJ/mm. Zavarivanje elektronskim snopom vršeno je elektronskim topom u horizontalnom položaju sa sledećim osnovnim parametrima: napon $U=55$ kV, struja mlaza $I=400$ mA, brzina kretanja el. mlaza $V=3.33$ mm/s, struja fokusiranja $I_f=2.35$ A, radno rastojanje $dt=175$ mm. Zavarivanje je obavljeno na polovini debljine kvadrata od 95 mm [19]. Dimenzije zavarenih spojeva određivane su na poprečnim presecima zavarenih komada uz primenu analize slike. Merene su sledeće dimenzije spoja: širina metala šava, širina ZUT-a, površina metala šava i površina ZUT-a, kao i dubina i širina metala šava i širina ZUT-a na polovini dubine spoja kod elektronskog snopa.

REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju kalibracije i provere numeričkog modela prenosa toplote izvršeno je jednoprolazno navarivanje različitim unešenim količinama toplote, kao i jednoprolazno zavarivanje elektronskim snopom. Za oba postupka poredjeni su rezultati proračunatih i merenih dimenzija zavarenog spoja u zavisnosti od unešene količine toplote.

Tabela 2 - Rezultati merenja i numeričkog proračuna dimenzija spoja u zavisnosti od količine unete toplote pri eksperimentima navarivanja

Table 2 - Measured and numerically calculated weld joint dimensions in dependence of heat input during MAGW

Oznaka uzorka			6	7	8	9	10
Količina toplote	E /KJ/mm/		0.4	0.6	0.9	1.1	1.4
Širina MS	SMS /mm/	Mereni	5.7	7.4	10.3	11.2	13.7
Širina ZUT	SZUT /mm/		7.6	10.0	15.0	16.3	20.4
Površina MS	PMS /mm ² /		14.5	18.7	26.1	32.2	39.7
Površina ZUT	PZUT /mm ² /		12.7	33.5	73.3	84.5	109.1
Širina MS	SMS' /mm/	Model	5.9	6.4	8.2	9.3	12.0
Širina ZUT	SZUT' /mm/		8.8	9.6	13.7	16.2	19.7
Površina MS	PMS' /mm ² /		11.0	13.0	24.0	30.0	50.0
Površina ZUT	PZUT' /mm ² /		15.0	41.0	65.0	73.0	102.0
Širina MS	SMS/SMS %/	Odstupanje	3	-13	-20	-17	-12
Širina ZUT	SZUT/SZUT %/		16	-4	-9	-1	-3
Površina MS	PMS/PMS %/		-24	-30	-8	2	26
Površina ZUT	PZUT/PZUT %/		18	22	-11	-14	-6

Primerba: Odstupanje=100*(proračunata vrednost-merena vrednost)/merena vrednost

Provera modela se zasnivala na poredjenju karakterističnih dimenzija spoja, kao što su dimenzije metala šava, koje su određene izotermama solidus temperature (T_s), odnosno na dimenzijama ZUT-a koje su određene izotermom temperature transformacije Acl. Dobijeni rezultati merenja i proračuna, kao i njihovih odstupanja prikazani su u tabeli 2 i 3. Na slici 2 su prikazane linije spoja i linije ZUT-a u poprečnom preseku dobijene merenjem i numeričkim proračunom pri navarivanju, a na slici 3 su prikazani rezultati za slučaj elektronskog snopa.

Rezultati iz tabele 2 pokazuju da razlika između merenih i numerički proračunatih linearnih dimenzija navara iznosi od 1% do 20% a prosečno 9.8%, odnosno kod površina odstupanja iznose 2% do 30%, odnosno prosečno 16.1%. Ukupno posmatrajući, odstupanja iznose od 1% do 30%, sa srednjom vrednošću od 13%, koja se može smatrati zadovoljavajućim rezultatom. Izloženi rezultati pokazuju relativno niske vrednosti odstupanja dimenzija i veliku osetljivost numeričkog modela na promenu energije zavarivanja koja se direktno odražava na površinske dimenzije spoja, što sa svoje strane ukazuje na dobru energetsku simulaciju prenosa toplote pri zavarivanju.

Tabela 3 - Rezultati merenja i numeričkog proračuna dimenzija spoja pri zavarivanju elektronskim snopom

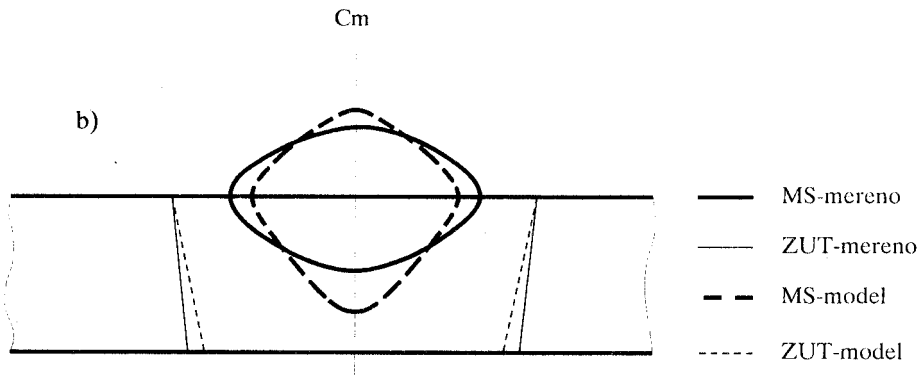
Table 3 - Measured and numerically calculated weld joint dimensions during EBW

	Metal šava (MS)				Zona uticaja toplote (ZUT)			
	Širina	Širina na dubina/2	Dubina	Površina	Širina	Širina na dubina/2	Dubina	Površina
	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm ²
Mereno	7.26	2.31	73.26	202.90	12.66	8.28	74.09	454.48
Model	9.68	2.68	73.00	279.88	13.23	10.00	82.00	443.40
Odstupanje	33 %	16 %	0 %	38 %	4.5 %	21 %	11 %	-2 %

Primedba: Odstupanje= $100 \cdot (\text{proračunata vrednost} - \text{merena vrednost}) / \text{merena vrednost}$

Zavarivanje elektronskim snopom, takodje se energetski može smatrati jednostavnijim slučajem kao i navarivanje, jer je snop elektrona direktno usmeren na površinu komada koji se zavaruje. Numerička simulacija dimenzija metala šava daje odstupanje od merenih dimenzija od oko 16% što se može smatrati zadovoljavajućim, osim površine metala šava koja odstupa za 38%, što u proseku iznosi 22%. Daleko je povoljnija situacija kod simulacije dimenzija ZUT-a, gde je odstupanje u proseku 12%, odnosno kod površine ZUT-a je samo 2%. Prosečno odstupanje simuliranih dimenzija ZUT-a od 12% se može smatrati vrlo zadovoljavajućim i čak najnižim u odnosu na prethodne podatke o simulacijama elektrolučnog zavarivanja.

Poredjenje rezultata sa slike 2, gde je prikazana kontura jednog od modelnih navara, sa rezultatima dimenzija spojeva u tabeli 2, pokazuje da se rezultati proračuna relativno dobro slažu kad je reč o dimenzijama spoja, ali ne i kad je reč o konfiguraciji spoja. To je bitno ograničenje svih dosadašnjih modela koje prističe iz nepotpune simulacije gorenja električnog luka. Ova okolnost u prvi plan postavlja pitanje adekvatnog modeliranja raspodele unete toplote električnog luka u toku zavarivanja. Uspešna simulacija konfiguracije zona zavarenog spoja, zahteva postojanje baze podataka o uticajnim faktorima na geometriju i energetske karakteristike el. luka i na njima zasnovane dalje modifikacije matematičkog opisa izvora toplote - električnog luka.



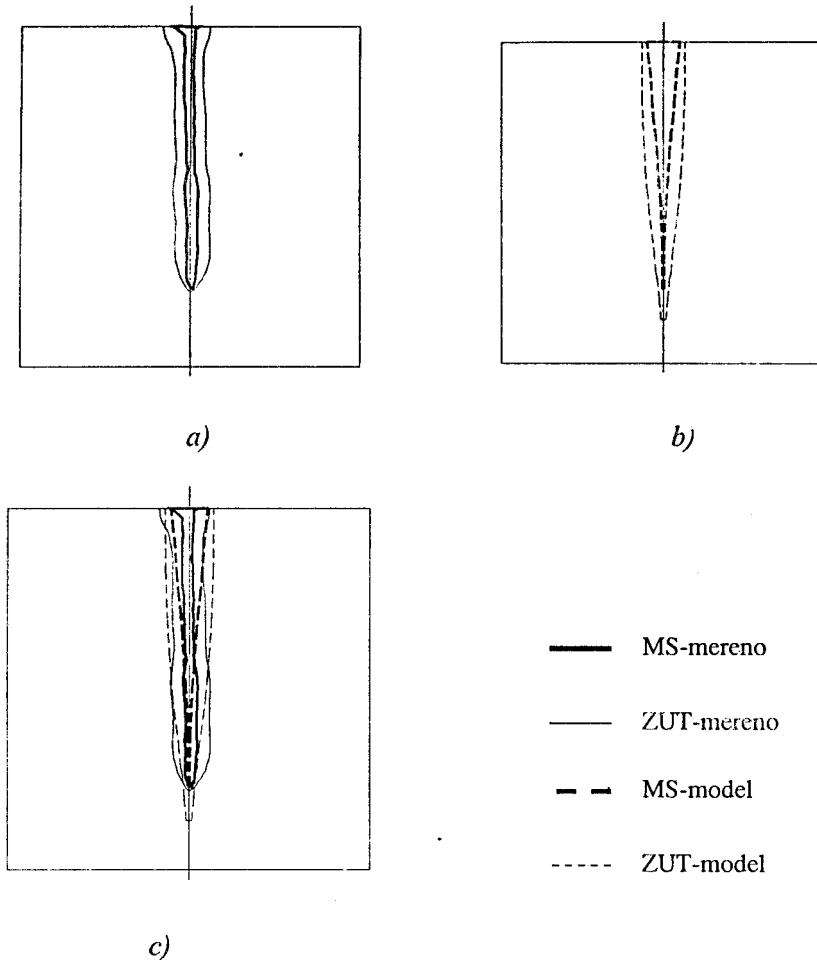
Slika 2 - Grafički prikaz merenih i proračunatih dimenzija u poprečnom preseku ploča navara za uzorak 9 (Cm - osa simetrije merenih dimenzija)

Figure 2 - Graphical presentation of measured and calculated weld contours in cross section for sample 9 (Cm - symmetry axis for measured values)

Isti problem se javlja ako se razmatraju rezultati iz tabele 3 i sa slike 3 gde su prikazani rezultati merenja i proračuna dimenzija i kontura zavarenog spoja elektronskim snopom. Dobijeno je dobro slaganje dimenzija koje karakterišu količinu toplote unesenu izvorom toplote visoke energetske gustine - elektronskim snopom, kao što su površina, širina i dubina ZUT-a, a razlike su izražene u simulaciji konfiguracije spoja. Očigledno je da model ne može da simulira spoj u obliku ključaonice karakterističan za elektronski snop. Rešenje problema treba tražiti u modifikaciji matematičkog algoritma izvora toplote, za koji je korišćen matematički opis elipsoida i za koji ni u postojećoj literaturi nije još uvek predložen adekvatan matematički oblik koji bi uspešno definisao nastali oblik spoja pri zavarivanju elektronskim snopom.

Na osnovu izloženih rezultata, uopšteno se može zaključiti da niske vrednosti odstupanja numerički proračunatih i merenih dimenzija spoja pokazuju visoke mogućnosti i pouzdanost numeričkog modela u simulaciji procesa kako elektrolučnog zavarivanja, tako i zavarivanja elektronskim snopom.

U daljem radu usavršavanje modela trebalo bi usmeriti na poboljšanje simulacije konfiguracije zavarenih spojeva kroz umanjeње uticaja faktora koji nisu bili kontrolisani proračunom, odnosno nisu bili mereni već su korišćeni podaci iz literature za čelike slične ispitivanim, a to su: specifične toplote, koeficijenti prenosa toplote, koeficijentii iskorišćenja postupka zavarivanja i dr. Rešenje za ovo može biti merenje pomenutih veličina ili pronalaženje i korišćenje baze podataka sa ovim vrednostima za čelike za koje se vrši simulacija, kao i za primenjene postupke.



Slika 3 - Grafički prikaz merenih i numerički proračunatih dimenzija zavarenog spoja elektronskim snopom u poprečnom preseku, a) merene dimenzije, b) proračunate dimenzije c) poredjenje rezultata. Dimenzije komada 95x95 mm

Figure 3 - Graphical presentation of measured and calculated EB weld contours in cross section, a) measured, b) numerically calculated c) results of comparison. Sample dimensions 95x95 mm

Uspešnim modeliranjem termalnog ciklusa u ZUT-u zavarenog spoja, moguće je predvideti i metalurško transformaciono ponašanje metala, odnosno vrstu i udeo nastalih struktura u toj kritičnoj oblasti zavarenog spoja. Predviđanje strukture na osnovu prethodno izračunate termalne istorije, kroz povezivanje proračunatih podataka sa bazom podataka koja sadrži dijagrame kontinuiranog hladjenja (KH) za razmatrane čelike, može pružiti informacije o toku transformacija i o nastalim strukturama pri kontinuiranom hladjenju. Ovi

dijagrami mogu sadržati i podatke kao što je tvrdoća i/ili rad udara pojedinih struktura čime se pruža mogućnost predviđanja osobina zavarenog spoja, kao i predviđanje kritičnih mesta u zavarenom spoju, čime se dobijaju dragoceni podaci kako za projektovanje spoja, tako i za kvalitativnu kontrolu zavarenog spoja.

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata proračuna i eksperimentalnih istraživanja u ovom radu, proizilaze sledeći zaključci:

- Prikazan je dvodimenzioni numerički model prenosa toplote pri zavarivanju čelika. Model se zasniva na proračunu toplotnog bilansa, a parcijalne diferencijalne jednačine koje opisuju prenos toplote rešavane su metodom konačnih razlika. Kao rezultat numeričkog proračuna dobijeno je dvodimenziono polje temperatura u zavarenom spoju u zavisnosti od vremena zavarivanja.
- Model je proveren i potvrđen kroz eksperimente serije modelnih navarivanja čelika Nionikral 70 elektrolučnim MAG postupkom. Provera numeričkog modela izvršena je i za slučaj zavarivanja elektronskim snopom čelika 18MND5. Potvrda numeričkog modela prenosa toplote zasnivala se na poredjenju numerički proračunatih sa izmerenim dimenzijama zavarenih spojeva, odnosno izo-termama linije spoja i linija ZUT-a.
- Dobijeni rezultati pokazuju zadovoljavajuću tačnost numeričkog modela, pri čemu dimenzije spoja odstupaju od izmerenih u proseku za 12.5% ako se uzmu obzir sve izvršene simulacije za oba analizirana postupka zavarivanja. Izloženi numerički model predstavlja dobru osnovu za razvijanje modela predviđanja struktura i osobina u ZUT-u zavarenih spojeva čelika.

LITERATURA

- [1] Cerjak H. H., Buchmayr B., ISIJ Int., 10/1995, 1157-1161.
- [2] Tsao K.C., Wu C. S., Welding res. supplement, 3/1988, 70s-75s.
- [3] Rosenthal D., Welding Journal, 5/1941, 220s-243s.
- [4] Rikalin N., Toplovie osnovi svarke, Akademii Nauk SSSR, Moskva, 1947.
- [5] Pavelić V., Welding res. supplement, 7/1969, 295s-305s.
- [6] Grill A., Metall. trans. B, 12B/1981, 667-674.
- [7] Kou S, Le Y., Metall. Trans. A, 14A/1983, 2245-2253.

- [8] Friedman E., Journ. of Press. Vessel Techn., 8/1975, 206-213.
- [9] Krutz G. W., Segerlind L. J., Welding res. supplement, 7/1978, 211s-216s.
- [10] Goldak J., Metall. trans. B, 15B/1984, 299-305.
- [11] Kumar S, Bhaduri S. C., Meall. and mater. transactions B, 25B/1994, 435-441.
- [12] Ushio M., Wu C. S., Meall. and mater. transactions B, 28B/1997, 509-516.
- [13] Yang Z., Debroy T., Meall. and mater. transactions B, 30B/1999, 483-493.
- [14] Brimacombe J.K., Mathem. and Phys. Modeling of Met. Proc. Operations, HPC, Washington, 1980, 1-20.
- [15] Odanović Z., Doktorska disertacija, TMF, 1993. Beograd
- [16] Touloukian Y.S., Specific Heat , Vol. 4, IFI/Plenum, New York, 1970.
- [17] Kowakami K., Niponkoku Technical Report, No. 36, 1982. 26.
- [18] Atkins M., Atlas of CCT diagr., British Steel Corporation, Sheffield 1977.
- [19] Rogeon P., Couedel D., Mathem. Modell. of Weld Phen. 5, IOM Comm., London, 2001, 275-281.

SIMJ

SAVEZ INŽENJERA METALURGIJE JUGOSLAVIJE

i

INSTITUT VINČA

organizuju

VI SAVETOVANJE METALURGA

sa međunarodnim učešćem

Pod pokroviteljstvom

Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije

Savetovanje će biti održano 12-13. juna 2003. godine
u hotelu "Izvor" u Arandelovcu

Prijave za savetovanje dostavljati na adresu:
Savez inženjera metalurgije Jugoslavije, Beograd,
Kneza Miloša 9/IV ili na tel/fax (011) 32 41 613