

KOMPARACIJA NUMERIČKIH I EKSPERIMENTALNIH METODA ZA ODREĐIVANJE TEMPERATURNIH POLJA PRI ZAVARIVANJU

COMPARISON OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELDS DURING THE WELDING

Sead PAŠIĆ, Safet ISIĆ, Edin DŽIHO ¹⁾

Ključne riječi: temperaturno polje, metoda konačnih elemenata, termovizija, termopar

Key words: temperature field, finite elements method, thermo vision, thermocouple

Sažetak: Poznavanje distribucije topline u osnovnom materijalu pri zavarivanju je od suštinskog značaja za potpuno razumijevanje procesa i postizanje potrebne kvalitete. U tom smislu je precizno definiranje temperaturnih polja vrlo važno, pogotovo za neke specifične slučajeve zavarivanja. Temperaturno polje pri zavarivanju zavisi od velikog broja varijabli, u prvom redu od vrste materijala i njegove debljine, zatim od unosa topline, parametara okoline i slično. Do pouzdanih podataka o temperaturnom polju možemo doći na više načina, analitički, numerički ili eksperimentalno. U ovom radu su opisane spomenute metode, a njihova komparacija u pogledu točnosti, kao i glavnih prednosti i nedostataka, napravljena je kroz eksperimentalno istraživanje. U eksperimentalnom dijelu rada je promatrano temperaturno polje pri navarivanju na tri različita materijala, uz variranje pogonske energije. Temperaturno polje je registrirano termokamerom na čitavoj površini materijala i termoparovima u određenim karakterističnim tačkama. Nakon toga je za dani materijal, njegova fizikalna svojstva i unos topline identičan kao i u eksperimentu, učinjena numerička simulacija metodom konačnih elemenata. Komparacija numeričkih i eksperimentalnih metoda pri određivanju temperaturnih polja je napravljena kroz preklapanje temperaturne distribucije karakterističnih točaka, odnosno točaka u kojima je bio postavljen termopar.

Abstract: Knowing of the heat distribution in the parent material during the welding process has the fully importance to completely understanding the process and achieving the required quality. In this sense, the precise definition of temperature fields is very important, especially for some specific cases of welding. Temperature field during welding depends on a large number of variables, primarily the type of material and its thickness, then the heat input, parameters of the environment etc. Reliable data on the temperature field can be obtained in different ways, analytical, numerical or experimental. This paper describes these methods and their comparison in terms of accuracy, as well as the main advantages and disadvantages, which was made through experimental research. In the experimental part of the work is observed the temperature field onto parent material on three different materials, during the welding with the variation of the heat input. Temperature field is registered by thermo camera across the surface

¹⁾ Univerzitet "Džemal Bijedić", Mašinski Fakultet Mostar, B&H



of materials and thermocouples in some characteristic points. After that is for the identical material, with its physical characteristics, and identical heat input like in the experiment, made numerical simulation using finite elements method. Comparison of numerical and experimental methods in determining the temperature field is done through the overlapping temperature history characteristic points or points in which was appointed thermocouples.

1. UVOD

Svojstva zavarenih spojeva su u značajnoj mjeri funkcija djelovanja topline dovedene tijekom zavarivanja. Zbog toga je neophodno poznavanje termičkog ciklusa zavarivanja, odnosno mogućnost mjerenja temperaturnih promjena u bilo kojoj točki tijekom procesa zavarivanja.

Određivanje temperature i analiza temperaturnih polja može se vršiti analitičkim, numeričkim i eksperimentalnim metodama. Postoji više eksperimentalnih metoda određivanja temperaturnih polja u procesu zavarivanja. Izbor metode zavisi od njene osjetljivosti i pouzdanosti pri registraciji velikih temperaturnih promjena koji se javljaju pri zavarivanju. Svaka od mjernih metoda za analizu temperaturnih polja pri zavarivanju mora zadovoljiti:

- mogućnost praćenja temperatura na više mjesta u osnovnom materijalu kako bi dobili potpuniju predstavu o temperaturnom polju u periodu toplinskog zasićenja, periodu ustaljenog režima i periodu nakon prestanka djelovanja.
- neovisnost mjerne metode od toplinskih procesa koji se odvijaju u radnom predmetu; mjerna metoda ne smije narušiti procese provođenja topline pri zavarivanju.
- mogućnost mjerenja temperature u rasponu od 0 do 1.500 °C s dovoljnom tačnošću.

S obzirom na ove zahtjeve danas se u svijetu koriste dvije osnovne metode - mjerenje pomoću termoelemenata i mjerenje infracrvenim kamerama. Termoelementi predstavljaju pogodno sredstvo za mjerenje temperatura. Područje njihove primjene je vrlo široko, od -200 do 3.000 °C, ali temperaturu mogu mjeriti samo u jednoj točki. Mjerenje infracrvenom kamerom je relativno novija metoda i može se koristiti za analizu temperaturnih polja na čitavom objektu mjerenja, kao i za praćenje brzine zagrijavanja i hlađenja promatranog objekta.

Međutim, eksperimentalne metode za određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju ne mogu biti uvijek primijenjene iz više razloga. Stoga, kao vrlo pouzdan alat, jako često se koristi numerička metoda za predviđanje temperaturnih promjena pri zavarivanju. Numeričko određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju se najčešće radi korištenjem metoda konačnih elemenata ili konačnih volumena. Na ovaj način rade mnogi komercijalni programi kao što su ANSYS, I-DEAS, ABACUS i sl. Ovi programi imaju široke mogućnosti primjene, međutim njihov glavni nedostatak je nedostupnost originalnog koda i njihovog prilagođavanja konkretnom problemu. Zbog toga je za rješavanje problema u znanstvenom radu ponekad potrebno napraviti vlastiti program.

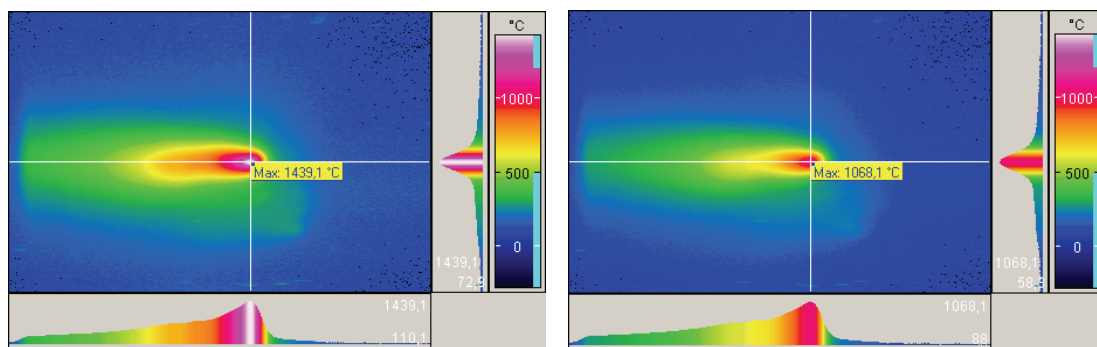
2. TERMOGRAFSKA METODA

Relativno noviji način koji se može primijeniti kod ispitivanja temperaturnih polja je infracrvena (IC) termografska metoda. Termografska metoda je našla široku primjenu u proizvodnim procesima kao što su lijevanje, oblikovanje, zavarivanje. Ova metoda se koristi infracrvenim zračenjem koje je dio elektromagnetskog spektra i počinje ispod vidljivog dijela spektra, a proteže se do mikrovalnog područja. S obzirom da infracrveno zračenje nije vidljivo mora se pretvoriti u neki drugi oblik energije kako bi se onda izvršila analiza. Pretvaranje se vrši u detektorima kao što su termoparovi, termometri, bolometri, fotografske ploče i slično. Danas

se uređaji za detekciju IC zračenja mogu svrstati u dvije osnovne grupe. Prva grupa su uređaji za mjerenje temperature na kojima se vrši samo očitavanja zagrijavanja, a druga grupa su uređaji koji omogućavaju termografsku analizu. Uređaji iz druge grupe daju potpunu sliku temperaturnih polja promatranog objekta. Ovi uređaji imaju relativno veliku točnost od 1 do 4% na udaljenosti od 6 m od objekta.

2.1 Faktor termičke emisije

Točnost od 1 % može oduševiti u prvi čas, međutim svaka metoda ima svoje nedostatke, a kod ove metode je to faktor termičke emisije. Svi objekti iznad apsolutne nule zrače u okolinu. Valna duljina zračenja je obrnuto proporcionalna temperaturi dok je fluks zračenja proporcionalan temperaturi objekta. Količina zračenja je veličina koja se koristi za određivanje temperature na objektu. Ako neki objekt apsorbira svu dozračenu energiju, a ništa ne reflektira i ne propušta kod svojih valnih dužina, nazivamo ga crnim tijelom. Ako apsorbira samo dio dozračene energije na svim valnim dužinama, nazivamo ga sivim tijelom. Ukoliko objekt apsorbira različite količine dozračene energije pri različitim valnim dužinama, nazivamo ga selektivno tijelo. U prirodi ne postoji potpuno crno tijelo, pa je s toga neophodno korigirati razliku između stvarno emitiranog zračenja u odnosu na ono s crnog tijela. Ovaj odnos između stvarnog i teoretskog zračenja naziva se faktor emisije. Tako crno tijelo ima faktor emisije $\varepsilon = 1$. Realna tijela nemaju tu efikasnost i njihov faktor emisije $\varepsilon < 1$. Faktor termičke emisije nije apsolutna veličina, a na njega utiče temperatura, vrsta materijala, struktura i stanje površine, kut promatranja i slično. Svi ovi parametri moraju se uzeti u obzir kod analize. Neki tipovi IC uređaja obično su baždareni na $\varepsilon = 1$, pa korisnik mora biti oprezan i poznavati karakteristike promatranog objekta, te predvidjeti mogućnost greške pri mjerenju. Sofisticirani uređaji imaju mogućnost korekcije koeficijenta prilikom očitavanja.

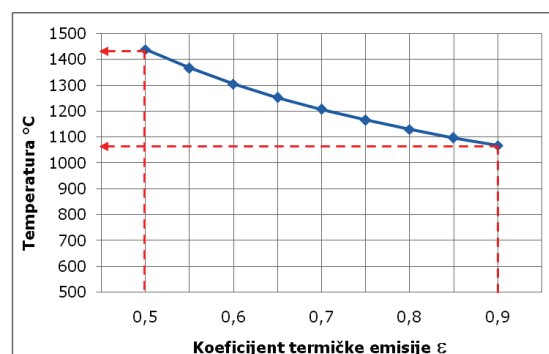


Faktor emisije 0,5 - max. temper. 1.439,1°C

Faktor emisije 0,9 - max. temper. 1.068,1°C

Slika 1. Dijagram temperaturnog opterećenja posmatrane tačke

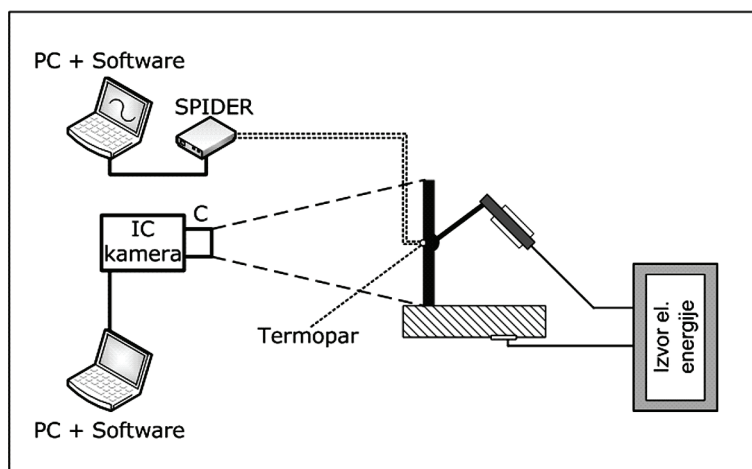
Slika 2. Dijagram uticaja faktora termičke emisije na rezultat mjerenja



Slike 1 i 2 prikazuju uticaj koeficijenta termičke emisije na rezultat mjerenja pomoću IC kamere. Vidi se da se povećanjem koeficijenta izmjerena temperatura u promatranoj tački smanjuje. Kako bi postigli potrebnu točnost termografske analize potrebno je utvrditi točnije vrijednosti za koeficijent termičke emisije.

2.2 Eksperimentalno određivanje koeficijenta termičke emisije

Kako bi se IC termografija mogla tačno i pouzdano primjenjivati u analizi temperaturnih promjena tokom procesa zavarivanja, potrebno je precizno odrediti koeficijent termičke emisije za određeni materijal u temperaturnom intervalu od sobne temperature do temperature topljenja. Da bi se ovo postiglo planirana je i realizirana serija eksperimenata na materijalima različite klase i sa različitim pogonskom energijom zavarivanja. Kod svih eksperimenata je vršeno navarivanje dodatnog materijala na osnovni materijal, u jednom prolazu, a kako bi se izbjegao utjecaj električnog luka na rezultat IC termografskog snimanja, ploča osnovnog materijala je bila postavljena tako da je sprečavala da IC zračenja, nastala uslijed električnog luka, dođu do senzora IC kamere. Na svaku ploču je prije zavarivanja postavljen termopar, koji je registrovao temperaturne promjene tijekom zavarivanja. Za sve eksperimente su korištene ploče dimenzija 300 x 250 mm i debljine 5 mm. Ukupno je napravljeno 9 eksperimenata, sa 3 različite vrste osnovnog materijala i sa različitim parametrima zavarivanja. Radni predmet se nalazio na udaljenosti od 180 cm od objektiva IC kamere. Na slici 3. danje shematski prikaz položaja kamere i termopara u odnosu na radni materijal i način navarivanja.



Slika 3. Šematski prikaz eksperimenta

Za obradu termograma je korišten software IRBIS Plus, koji omogućava detaljno praćenje temperaturnog opterećenja većeg broja tačaka na ploči. Očitanjem tih temperatura i upisivanjem u program dobije se dijagram temperaturnog opterećenja za odabrane tačke. Software omogućava da se na osnovu većeg broja termograma napravi detaljna analiza toka zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Zavarivanje je vršeno u normalnim uvjetima pri temperaturi okoline od približno 20 °C i normalnoj vlažnosti. Ovi parametri su korišteni prilikom podešavanja IC kamere.

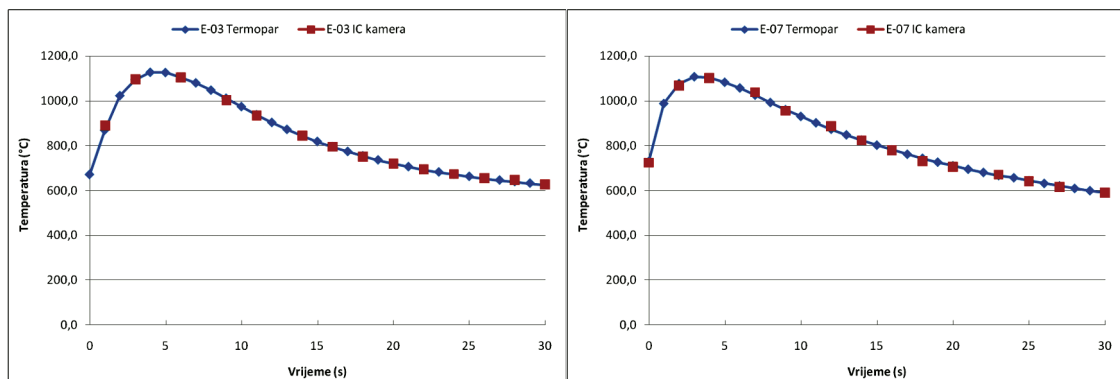
Za sva eksperimentalna ispitivanja vršeno je mjerenje temperature u jednoj tački, čije su koordinate u svim eksperimentima bile ista, a koja se nalazi u području ZUT-a. Mjerenje temperatura u toj tački vršeno je pomoću termopara, a rezultati su zapisivani, te je kasnije vršena računarska obrada i upoređivanje rezultata mjerenja sa mjerenjima dobijenim pomoću IC

opreme. Maksimalne temperature promatrane točke, kao i ostali parametri zavarivanja, prikazani su u tablici 1.

Tabela 1. Parametri zavarivanja i postignute maksimalne temperature promatrane točke

Vrsta materijala	S235 JRG2			P265GH			X5CrNiTi1810		
Oznaka uzorka	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	E-09
Struja zavarivanja A	130	120	110	110	120	130	110	120	130
Brzina zavarivanja cm/min	14,5	13,8	12,0	13,8	12,0	13,8	22,2	19,8	18,6
Maksimal. temperatura °C	1.171	1.227	1.106	903	1.304	1.311	1.103	969	1.311

Rezultati mjerenja pomoću termoparova i snimanja IC kamerom su analizirani i usklađivani tako da se dobije poklapanje dviju krivulja termičkog ciklusa zavarivanja. Pri tome je poklapanje krivulja termičkog ciklusa za svaki od izvedenih eksperimenata postignuto mijenjanjem koeficijenta termičke emisije u software-u termo kamere, sve dok se ne postigne zadovoljavajuće preklapanje s krivuljom dobivenom pomoću termopara. Na slici 4. prikazano je preklapanje krivulja termičkog ciklusa za uzorke E-03 i E-07, izrađene od različitih materijala i zavarene s različitim parametrima.



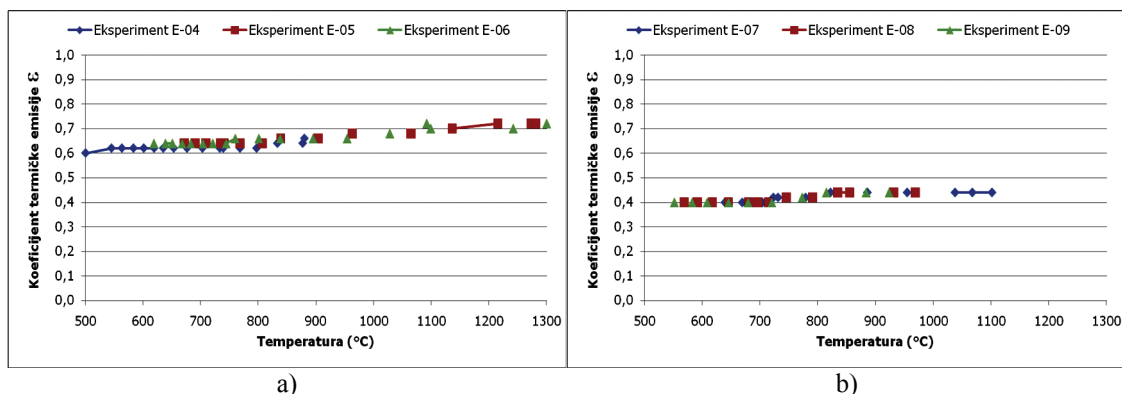
Materijal: S235 JRG2
 Pogonska energija $q = 12 \text{ kJ/cm}$
 Max. temperatura $t_{MAX} = 1.170 \text{ °C}$

Materijal: X5CrNiTi1810
 Pogonska energija $q = 7.0 \text{ kJ/cm}$
 Max. temperatura $t_{MAX} = 1.103 \text{ °C}$

Slika 4. Poklapanje krivulja termičkog ciklusa promatrane točke na uzorcima E-03 i E-07

Prema opisanoj proceduri dobili su se podaci o realnim vrijednostima koeficijenta termičke emisije za ispitivane materijale u temperaturnom opsegu od 500 do 1.300 °C.

Koeficijent termičke emisije čelika S235JRG2 se kreće u intervalu od 0,6 do 0,8 a ako bi se doveo u funkciju sa temperaturom mogla bi se razgraničiti tri područja: od 550 do 750 °C koeficijent termičke emisije se kreće u granicama od 0,6 – 0,65, od 750 do 950 °C iznosi 0,65 – 0,70, dok se pri višim temperaturama, u intervalu od 950 do 1.250 °C, koeficijent emisije kreće od 0,7 – 0,8. Kod čelika P265GH koeficijent termičke emisije se kreće u granicama od 0,6 do 0,7, i to u temperaturnom intervalu od 500 do 1.300 °C, pri čemu povećanje koeficijenta ima skoro linearnu promjenu sa povećanjem temperaure, slika 5a. Visokolegirani čelik X5CrNiTi1810 ima znatno niži koeficijent termičke emisije i kreće se u relativno uskim granicama od 0,40 - 0,44 u temperaturnom intervalu od 550 do 1.150 °C, slika 5b. Pri tome, promjena koeficijenta ima znatno manju tendenciju promjene sa povećanjem temperature u usporedbi s niskougljičnim čelicima.

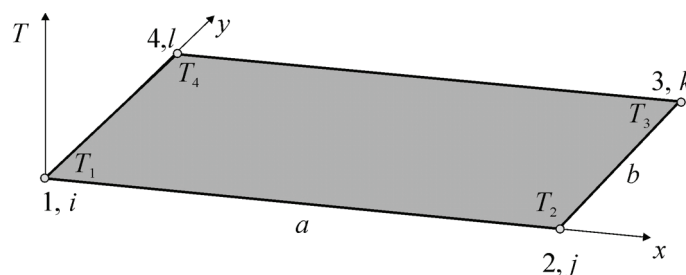


Slika 5. Dijagram porasta koeficijenta termičke emisije ovisno o porastu temperature za čelike P265GH i X5CrNiTi1810

S prezentiranih dijagrama se jasno može uočiti da je koeficijent termičke emisije različit za različite materijale i da ima tendenciju porasta povećanjem temperature.

3. NUMERIČKO ODREĐIVANJE TEMPERATURNOG POLJA

Numeričko određivanje temperaturnog polja tijekom zavarivanja je rađeno korištenjem metode konačnih elemenata. Za usporedbu rezultata dobivenih numeričkim i eksperimentalnim metodama su korišteni ravni pravokutni elementi s četiri čvora i četiri stepnja slobode, slika 6.



Slika 6. Ravni konačni element za analiziranje temperaturnog polja ploče

Temperaturno polje unutar jednog konačnog elementa je pretpostavljeno u sljedećoj formi:

$$T(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy, \quad (1)$$

gdje je:

T - temperatura u proizvoljnoj točki konačnog elementa,

x, y - koordinate u lokalnom koordinatnom sistemu elementa,

$a_i, i=1..3$ - nepoznate konstante dobivene iz graničnih uvjeta (temperatura u čvorovima elementa).

Funkcional prenosa topline za ploču je dan na sljedeći način:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \left(\iint \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} T_{,x} \\ T_{,y} \end{Bmatrix}^T [\mathbf{k}] \begin{Bmatrix} T_{,x} \\ T_{,y} \end{Bmatrix} + \rho c \dot{T} T \right) dx dy - \sum_{i=1}^n \int h(T_f T - \frac{1}{2} T^2) dS - \int q_B T dS \quad (2)$$

gdje je:

n – ukupan broj konačnih elemenata;

h – koeficijent provođenja topline;

T_f – temperatura okoline;

ρ – gustoća materijala;

q_B – zadani fluks normalan na površinu;

$[k]$ – dijagonalna matrica čiji koeficijenti su koeficijenti provođenja topline materijala.

Izračunavanjem stacionarnog stanja funkcionala, $\delta\Pi = 0$, dobiva se jednadžba provođenja u sljedećoj formi:

$$([\mathbf{K}] + [\mathbf{H}])\{\mathbf{T}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{T}}\} = \{\mathbf{R}_q\} + \{\mathbf{R}_h\} \quad (3)$$

gdje je:

$[K]$ – matrica provođenja;

$[H]$ – matrica konvekcije;

$\{\mathbf{R}_q\}$ – vektor temperaturnog opterećenja usljed električnog luka i

$\{\mathbf{R}_h\}$ – vektor temperaturnog opterećenja usljed provođenja.

Pretpostavljeno je da je provođenje najveće kroz latelarne strane konačnog elementa. Temperaturni fluks usljed električnog luka je dan izrazom:

$$q(x, y, t) = \frac{3Q}{\pi r^2} e^{-3\left(\frac{\Delta x - v_x t}{r}\right)^2} e^{-3\left(\frac{\Delta y}{r}\right)^2} \quad (4)$$

gdje je:

Q – unos topline,

v_x – brzina zavarivanja,

r – radijus električnog luka, i

t – vrijeme.

3.1 Rješavanje jednadžbe provođenja

Za rješavanje jednadžbe (3) je korištena implicitna shema integracije. Vektor temperature čvorova u $(n+1)$ -om temperaturnom koraku $\{\mathbf{T}\}_{n+1}$ je izračunat iz jednadžbe:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t}[\mathbf{C}] + \beta[\mathbf{K}] + \beta[\mathbf{H}]\right)\{\dot{\mathbf{T}}\}_{n+1} = \\ \left(\frac{1}{\Delta t}[\mathbf{C}] + (1-\beta)([\mathbf{K}] + [\mathbf{H}])\right)\{\mathbf{T}\}_n \\ + (1-\beta)(\{\mathbf{R}_q\}_n + \{\mathbf{R}_h\}_n) + (1-\beta)(\{\mathbf{R}_q\}_{n+1} + \{\mathbf{R}_h\}_{n+1}) \end{aligned}$$

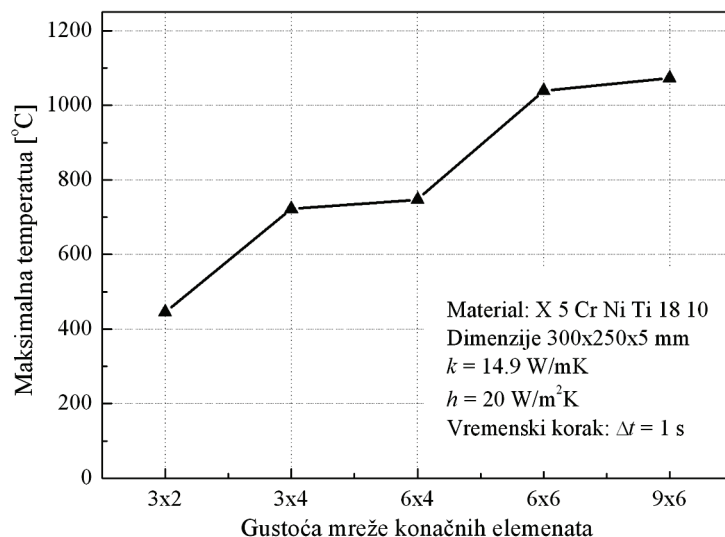
gdje je:

Δt - vremenski korak, i

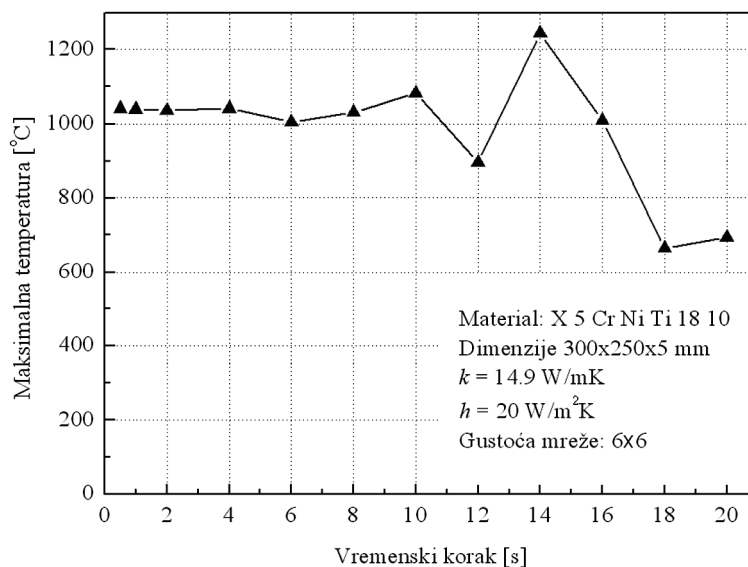
β - integracijska konstanta.

Korištena je vrijednost $\beta = 1/2$, što vodi eksplicitnoj Crank-Nicholsonovoj shemi integracije, koja je bezuvjetno stabilna za bilo koji vremenski korak. Ploča je podijeljena u uniformnu mrežu pravokutnih konačnih elemenata. Gustoća mreže konačnih elemenata i veličina vremenskog koraka birani su na način da se omogući konvergencija rezultata.

Slike 7. i 8. prikazuju maksimalnu temperaturu krivulja za različite gustoće mreže i duljine temperaturnog koraka Δt , za ploče dimenzija 300 x 250 x 5 mm, izrađene od čelika X5CrNiTi1810, zavarene sa strujom zavarivanja od 110 A i naponom luka od 22 V, što bi odgovaralo eksperimentalnom uzorku E-07.



Slika 7. Maksimalne temperature za različite gustoće mreže konačnih elemenata



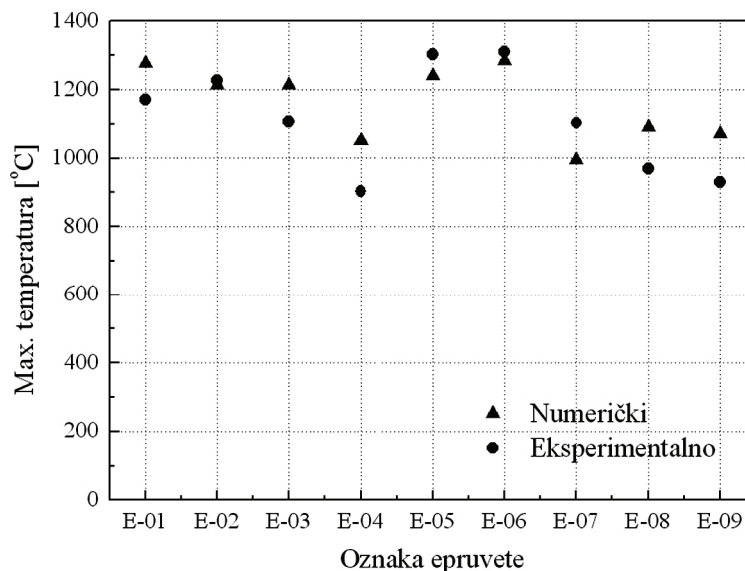
Slika 8. Maksimalne temperature za različite vremenske korake

Slika 7. pokazuje konvergenciju maksimalne temperature za mrežu od 9x6 konačnih elemenata, a na slici 8. je prikazan utjecaj veličine vremenskog koraka na konvergenciju maksimalne temperature, pri čemu je korištena mreža od 6x6 elemenata. Za dane uvjete zavarivanja vremenski korak od 5 [s] osigurava konvergenciju rezultata. Vremenski korak od 10 [s] daje još uvijek stabilan proces integracije, ali dolazi do velikog rasipanja rezultata.

4. KOMPARACIJA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA

Komparacija numeričkih i eksperimentalnih rezultata izvršena je usporedbom maksimalnih temperatura u promatranoj točki, a grafički prikaz dan je na slici 9. Maksimalne temperature svih krivulja su izračunavane u točkama u kojima je bio postavljen termopar. Za numeričko određivanje maksimalne temperature je korištena mreža od 9x6 elemenata, što omogućava da čvorovi elemenata leže na liniji spoja i u točkama u kojima je bio postavljen termopar, pri čemu je korišten vremenski korak od $\Delta t = 1$ [s].

Na osnovu prikazanih rezultata usporedbe za svih 9 eksperimentalnih uzoraka, nije se mogla uočiti zakonitost prema kojoj bi numerički rezultati predviđali niže ili više vrijednosti od eksperimentalnih. Na promatranom primjeru prosječna razlika između numeričkih i eksperimentalnih rezultata iznosi približno oko 10 %. Uzrok ove razlike ne mora biti samo greška metode konačnih elemenata, već treba uzeti u obzir i moguću grešku mjerenja maksimalne temperature i greške kod registriranja parametara zavarivanja.



Slika 9. Komparacija maksimalne temperature dobivene numerički i eksperimentalno

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisano određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju termografskom metodom, korištenjem termoparova te numeričko određivanje temperaturnih polja, kao i komparacija numeričkih i eksperimentalnih rezultata. IC termografska metoda omogućava relativno jednostavno mjerenje temperature u više točaka na promatranom objektu, kao i analizu temperaturnih promjena u toku zagrijavanja i hlađenja pri zavarivanju. Točnost metode je velika, ali je za pouzdana i precizna mjerenja potrebno poznavati koeficijent termičke emisije materijala kojeg tretiramo. Ovo može biti problem, s obzirom da se u literaturi mogu naći samo okvirne vrijednosti koeficijenta za određene grupe materijala i to na sobnoj temperaturi. Pored toga, za ovu metodu nam je potrebna oprema koja ima dosta visoku cijenu. Alternativa ovoj metodi je numeričko određivanje temperaturnih polja, koji rade na principu metoda konačnih elemenata ili konačnih volumena. No i za ovu metodu je potrebno poznavati koeficijente provođenja i koeficijent termičke emisije.

Točnost jedne i druge metode zavisi od vrijednosti koeficijenta provođenja i koeficijenta termičke emisije. Razlika u rezultatima između numeričke i termografske metode je do 10 %,



što čini numeričku metodu primjenjivom za određivanje temperaturnih polja. Koeficijent termičke emisije moguće je preciznije odrediti eksperimentalnim putem, paralelnim snimanjem temperaturnih promjena pri zavarivanju pomoću IC termokamere i termopara, te naknadnim uspoređivanjem, odnosno preklapanjem krivulja termičkog ciklusa za istu točku na promatranom objektu. Na ovaj način postoji mogućnost da za određeni materijal za koji je eksperimentalnim putem određen koeficijent termičke emisije, i sa tabelarnim vrijednostima koeficijenta provođenja, s dovoljnom točnošću proračunamo temperaturne promjene numeričkim putem.

6. LITERATURA

- [1] Cook R., Malkus D. S., Plesha M.: "Concepts and Application of Finite Element Analyses", John Willey & Sons, New York, 1988.
- [2] Farson D., Richardson R., Li X.: "Infrared Measurement of Base Metal Temperature in Gas Tungsten Arc Welding", *Welding Journal*, sept. 1998, str. 396
- [3] Hrvatska udruga za infracrvenu termografiju <http://www.huict.hr/>
- [4] InfraTec GmbH, Proizvođač software-a IRBIS plus za termografsku analizu <http://www.infratec.de/>
- [5] S. Pašić, E. Džiho, S. Kovačić: "Eksperimentalno određivanje koeficijenta termičke emisije površine pri zavarivanju", 21. Međunarodni kongres o procesnoj industriji "Procesing 2008", Subotica, maj 2008.
- [6] S. Pasić, S. Isić, E. Džiho: "Testing of Numerical Methods Accuracy in Temperature Fields During Welding", International Conference "Inovative Technologies for Joining Advanced Materials", Timisoara, Romania, June 2007.