



ANALIZA TOPLOTNIH EFEKATA U POSTUPCIMA FRIKCIONOG ZAVARIVANJA MEŠANJEM

ANALYSIS OF THERMAL EFFECTS IN WELDING PROCESSES WITH FRICTION STIR WELDING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹ Mont-R d.o.o., Dubravska 2d, Meljak, Srbija

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

³ Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd, Srbija

email: ^a a.jovanovic@mont-r.rs

Ključne reči: zavarivanje trenjem sa mešanjem, generisanje toplote, prenos toplote, analitičko modeliranje.

Keywords: friction stir welding (FSW), heat generation, heat transfer, analytical modelling.

Rezime

U radu je opisano formiranje analitičkog modela generisanja i prenosa toplote pri zavarivanja trenjem sa mešanjem. Rešavanjem diferencijalnih jednačina prenosa toplote, prilagođenim za zavarivanje trenjem sa mešanjem postavljene su osnove za formiranje analitičkog modela. Da bi se varirali tehnološki parametri zavarivanja koji utiču na generisanje toplote, uprošćeno je naponskog stanja materijala na povišenim temperaturama. Cilj je bila simulacija prenosa toplote za tanke i debele limove, dobijanjem ravanske i prostorne temperaturne raspodele za određene parametre zavarivanja. Analitički model je dobijen programskim jezikom Python.

Abstract

This paper describes the formation of an analytical model of heat generation and transfer during friction stir welding. By solving differential equations of heat transfer, adapted for friction stir welding, the foundations for the formation of an analytical model were laid. In order to vary the technological parameters of welding that affect the generated heat, certain approximations were performed and the stress state of the material was observed at elevated temperatures. The aim was to simulate heat transfer for thin and thick plates, by obtaining a planar and spatial temperature image for certain welding parameters. The formation of the analytical model was performed in the Python programming language.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine



1. Uvod

Prilikom zavarivanja metala topljenjem i očvršćavanjem, bilo konvencionalnim ili nekonvencionalnim postupcima zavarivanja uvek je prisutno generisanje i prenos toplote. Zavisno od parametara zavarivanja i od karakteristika materijala koji se zavaruje, gradijent prostiranja toplote biće različit sa promenom nekog od parametara zavarivanja ili odabirom materijala sa drugačijim fizičko-hemijskim osobinama. Kako bi se izbeglo ili u što manjoj meri smanjilo eksperimentalno nalaženje optimalnih parametara zavarivanja, kao moćan inženjerski alat nametnulo se formiranje analitičkog ili numeričkog modela, u cilju simulacije postupka zavarivanja.

Dominantan problem prilikom zavarivanja legura aluminijuma koje očvršćavaju starenjem predstavlja pad mehaničkih osobina (tvrdoće i čvrstoće) u zoni uticaja toplote. Taj problem u većoj meri je prevaziđen patentiranjem nekonvencionalnog postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem. Dalji razvoj ovog postupka baziran je na dizajniranju alata kojim se zavaruje i pravilnim odabirom parametara zavarivanja (poput brzine zavarivanja, učestanost obrtanja alata i sl.). Cilj ove studije je optimizacija parametara zavarivanja uz pomoć analitičkog modela prenosa toplote pre procesa zavarivanja. Na taj način bi se pravilnim odabirom parametara zavarivanja proces degradacije strukture aluminijumskih legura sveo na minimum, a sa njim postigli postavljeni zahtevi za kvalitetom zavarenih spojeva.

Prilikom zavarivanja postupkom FSW alat, kao pokretni izvor toplote, predstavlja frikcioni element (tzv. „drugo telo“) koji ima zadatak da indukuje proces generisanja toplote na kontaktu sa materijalom koji se zavaruje [1-4]. Površine alata koje učestvuju u procesu oslobađanja toplote jesu tzv. aktivne površine, i to su: čelo trna, bočna površina (bok) trna i čelo valjka alata. Ne postoje egzaktni podaci, ali poznato je da količina energije koja se unese u zavareni spoj direktno zavisi od: geometrijskih karakteristika alata, tehnoloških parametara samog procesa zavarivanja i mehaničkih karakteristika materijala alata i osnovnog metala/legure.

Za potrebe formiranja analitičkog modela procesa zavarivanja trenjem sa mešanjem iskorišćene su Roshental jednačine [5], dok se za izračunavanje generisane količine toplote korišćena modifikovana forma jednačina Sheppard i Wright [6]. Uz određene aproksimacije koje su opisane detaljno u nastavku rada cilj formiranja analitičkog

modela je bio dobijanje ravanske, prostorne i raspodele generisane toplote duž ose zavarivanja.

Generalno, postoji više različitih studija na temu prenosa toplote u toku zavarivanja trenjem sa mešanjem. Ali, za razliku od modela koji se formirani metodom konačnih elemenata (MKE) analitički modeli su se deklarirali kao praktičniji, efektivniji i efikasniji za primenu, jer za njihovo formiranje nisu neophodni specijalni softverski paketi i posebna obučenosť za rad u istim.

2. Eksperiment

Toplotni fluks kod FSW nastaje pre svega na račun trenja i deformacionog procesa materijala. Diferencijalna jednačina prenosa toplote kod postupka FSW opisana je jednačinom (1):

$$\rho \cdot c_p \cdot \dot{T} + Q_{int} = \nabla k \cdot \nabla T \quad (1)$$

gde $Q_{int} \left[\frac{W}{m^3} \right]$ predstavlja zapreminsku količinu toplote oslobođenu na račun plastične deformacije materijala, $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ predstavlja gustinu materijala, $c_p \left[\frac{J}{kg K} \right]$ je specifični toplotni kapacitet, $k \left[\frac{W}{m K} \right]$ je koeficijent toplotne provodljivosti materijala, $T [K]$ je apsolutna temperatura, i $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ predstavlja gradijent porasta veličine u polju [7-9].

Međutim, mehanička opterećenja kojima alat deluje na radni komad skoncentrisana su na malu površinu oko vrha trna i čela alata, dok većina površine radnog komada ostaje rasterećena. Lokalizovano idealizovanje radne oblasti pri inicijalnom kontaktu površine alata sa radnim komadom i posmatranjem radnih predmeta kao krutih tela omogućava da toplota generisana na račun trenja i plastičnog deformisanja materijala može modelirati preko površinskog fluksa kao graničnog uslova između alata i radnog komada. Na taj način, jednačina (1) može biti pojednostavljena i predstavljena jednačinom (2):

$$\rho \cdot c_p \cdot \dot{T} = \nabla k \cdot \nabla T \quad (2)$$

Granični uslovi definisani su jednačinom (3):

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (3)$$

gde q predstavlja toplotni fluks na graničnoj površini.

Razmatrajući konstantne vrednosti za materijal, jednačina (2) može biti predstavljena jednačinom (4):



$$\frac{1}{\alpha} \dot{T} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

gde $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ predstavlja difuzioni koeficijent.

Da bi se postigli stalni i konzistentni stabilni uslovi za brzinsko polje stalnog izvora toplote, odnosno $\mathcal{V} = (\mathcal{V}_x, \mathcal{V}_y, \mathcal{V}_z) = (\mathcal{V}, 0, 0)$, sledi da se koordinate u odnosu na postavljeni sistem menjaju kao: $\xi = x - \mathcal{V} \cdot t$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$.

Uvođenje pokretnog koordinatnog sistema u diferencijalnu jednačinu za prenošenje toplote (4) i uz postavljene stabilne uslove, pojednostavljeni oblik diferencijalne jednačine provođenja toplote može se predstaviti sledećom jednačinom (5):

$$-\frac{\mathcal{V}}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Za toplotno polje predstavljeno jednačinom (6):

$$T = T_0 + e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} \varphi(\xi, y, z) \quad (6)$$

gde T_0 predstavlja početnu ili referentnu temperaturu (ambijentalna temperatura) i φ predstavlja jednoosno preslikanu funkciju pomoću koje se određuje ukupna toplotna provodljivost, i to zamenom u jednačinu (5) pa glavna jednačina postaje (7):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \left[\left(\frac{\mathcal{V}}{2\alpha} \right)^2 \right] \varphi = 0 \quad (7)$$

Na predlog Vilaca [10], toplotni izvor može se posmatrati kao da je postavljen na sredini debljine ploče koja se zavaruje, sa položajem u centru grumena i pomera se konstantnom translatornom brzinom (\mathcal{V}). Prema tome, pretpostavka je da su izvori toplote kod debelih limova tačkasti, odnosno centrirani na sredini debljine ploče. Dok su kod tankih limova toplotni izvori linijski, pozicionirani preko cele debljine lima.

Dakle, uzimajući u obzir pokretni tačkasti izvor duž x-ose (ose zavarivanja) na beskonačnoj ploči bez gubitka usled konvekcije toplote, rešenje jednačine (7) se može predstaviti jednačnom (8) u obliku:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} \frac{e^{-\frac{\mathcal{V}r}{2\alpha}}}{r} \quad (8)$$

gde je, Q ukupna količina toplote generisana usled trenja i plastične deformacije materijala.

Dok za tanke ploče prenos toplote je prema jednačini (9), najbolji rezultati mogu se dobiti korišćenjem linijskog izvora toplote umesto tačkastog izvora toplote:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k H} e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} K_0 \left(\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha} \sqrt{\xi^2 + y^2} \right) \quad (9)$$

gde K_0 predstavlja modifikovanu Bessel-ova funkciju druge vrste i nultog reda.

Na osnovu jednačina za prenos toplote kroz čvrsto telo pri postupku FSW, za beskonačne (debele) (8) i tanke limove (9), potrebno je definisati ulazne vrednosti i na taj način modelirati proces uz određena pojednostavljenja. Cilj formiranja analitičkog modela je da se optimizacijom geometrijskih karakteristika alata, parametara postupka i svojstava materijala koji se zavaruje, dobiju rezultati o količini generisane toplote. U načelu, cilj je dobijanja optimalnih vrednosti parametara procesa zavarivanja koje daju kvalitetan zavareni spoj.

Veličina koja ima krucijalan značaj na to koja će se temperatura razviti u toku procesa je: $Q = \eta \cdot Q_u$ iskorišćena količina toplote, gde su, η - koeficijent iskorišćenja toplote, Q_u - ukupno oslobođena količina toplote.

Ukupno oslobođenu količinu toplote moguće je izračunati pomoću analitičkih obrazaca (10-14) [8]. Veličine koje figurišu u njima su geometrijske karakteristike alata, parametri postupka zavarivanja i mehaničke karakteristike materijala koji se zavaruje. Od geometrijskih karakteristika alata mogu se izdvojiti: poluprečnik čela (R_{sh}) i trna alata (R_p), dužina trna alata (H_p).

Analitički obrasci za izračunavanje oslobođene količine toplote:

- ukupna količina toplote koja se generiše na vrhu pina alata:

$$Q_{pt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_p} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot dQ \cdot dr \quad (10)$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot R_p^3$$

- ukupna količina toplote generisana bočnom površinom trna:

$$Q_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_p} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot dQ \cdot dz \quad (11)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot R_p^2 \cdot H_p$$



- ukupna količina toplote generisana na čelu alata, ukoliko na čelu postoji konusna površina, ugla konusa α :

$$Q_{st} = \int_0^{2\pi} \int_{R_p}^{R_{sh}} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot (1 + \tan \alpha) \cdot dQ \cdot dr \quad (12)$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot (R_{sh}^3 - R_p^3) \cdot (1 + \tan \alpha)$$

Pa je ukupna količina toplote jednaka zbiru gore navedenih, data je izrazom (13):

$$Q_{total} = Q_{pt} + Q_{ps} + Q_{st}$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot [(R_{sh}^3 - R_p^3) \cdot (1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3 \cdot R_p^2 \cdot H_p] \quad (13)$$

Za slučaj korišćenja alata sa ravnim ramenima, izraz (13) postaje:

$$Q_{total} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot (R_{sh}^3 + 3 \cdot R_p^2 \cdot H_p) \quad (14)$$

Parametari procesa značajno utiču na količinu generisane toplote. Njih čine brzine translatorskog i rotacionog kretanja alata. Translatorska brzina zavarivanja predstavlja pomeraj alata u toku procesa zavarivanja duž linije stapanja. Rotaciona brzina definisana je vezom između učestanosti obrtanja alata i vremena ($\omega = \frac{2\pi n}{60}$). Smicajni napon koji figurira u obrascu generisane toplote izračunat je korišćenjem jednačina Sheppard i Wright [6] za određivanje normalnog naposnog stanja u materijalu na povišenim temperaturama, a iskorišćena je veza ($\tau_e = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$) za prevođenje normalnog napona u smicajni.

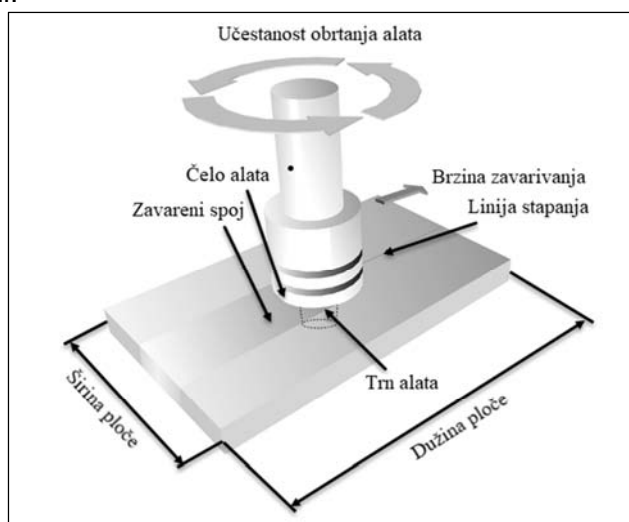
3. Rezultati i diskusija

Na osnovu jednačina (10)-(14) količina generisane toplote zavisi od: geometrijske karakteristike alata, vrsta materijala koji se zavaruje (mehaničke osobine materijala) i parametri procesa zavarivanja.

Od mehaničkih osobina materijala veoma značajnu ulogu ima smicajni napon koji se javlja u omešnom materijalu pri zavarivanju, za potrebe formiranja modela značajne su samo vrednost smicajnog napona od 4 do 10 [MPa]. Da bi se formirao matematički model postavljena je pretpostavka da se materijal pri zavarivanju nalazi na temperaturi 90% od temperature topljenja metala/legure.

Ostale veličine koje su od krucijalnog značaja na količinu generisane toplote su vezane za parametre procesa: učestanost obrtanja alata (rotaciona brzina alata) i translatorska brzina alata, geometrijske karakteristike alata i materijala koji se zavaruje: poluprečnici alata (čela i pina), dužina pina alata, debljina lima koji se zavaruje.

Odlučeno je da se gore pomenute veličine koje utiču na količinu generisane toplote za potrebe formiranja analitičkog modela menjaju na sledeći način: poluprečnik čela alata (R_{sh}) u intervalu od 8-16 mm, učestanost obrtanja alata (n) od 600-1200 o/min, debljina lima (H) koji se zavaruje od 4-10 mm. Za brzinu zavarivanja (translatorsku brzinu alata) je odlučeno da se varira u opsegu od 50-200 mm/min. Usvojeno je da dimenzija ploče na kojoj se modelira prenošenje generisane toplote bude 400x400 mm. Ilustracija parametra koji su varirani u modelu prikazani su na Slici 1 [11].



Slika 1. Parametri koji su od značaja za formirani model.

Figure 1. Parameters those are important for the model formed.



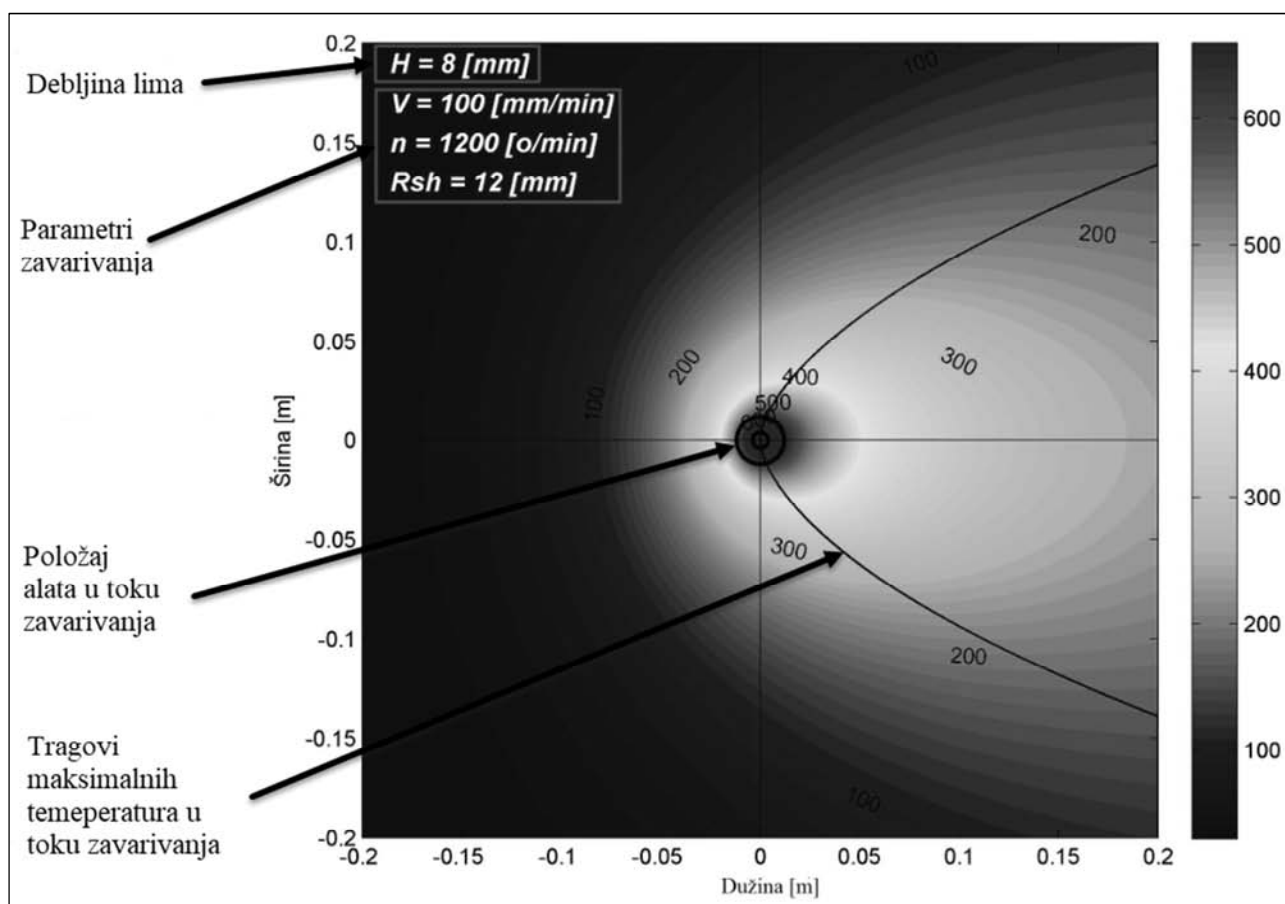
Neki od parametara morali su biti fiksirani kako bi se pojednostavilo modeliranje. Odnosi se na geometriju alata, tačnije poluprečnik pina (trna) alata i njegova dužinu. Za dužinu pina je usvojeno da bude u funkciji od debljine lima tj. da je dužina trna 95% od debljine lima dok je za poluprečnik trna usvojeno da bude takođe u funkciji od debljine lima tj. da je njegova vrednost 50% od debljine lima.

Na osnovu rezultata dobijenih za formirane analitičke modele generisanja i prenosa količine toplote prilikom FSW, neophodno je doneti zaključke o tome koji je optimum unete količine toplote potreban da bi se formirao zavareni spoj. Time je stvorena mogućnost da se već na osnovu geometrijskih karakteristika FSW alata pri zavarivanju određenih metala/legura moguće doneti zaključak pre samog zavarivanja da li će biti ostvaren kvalitetan zavareni spoj ili ne.

Formirani analitički model daje:

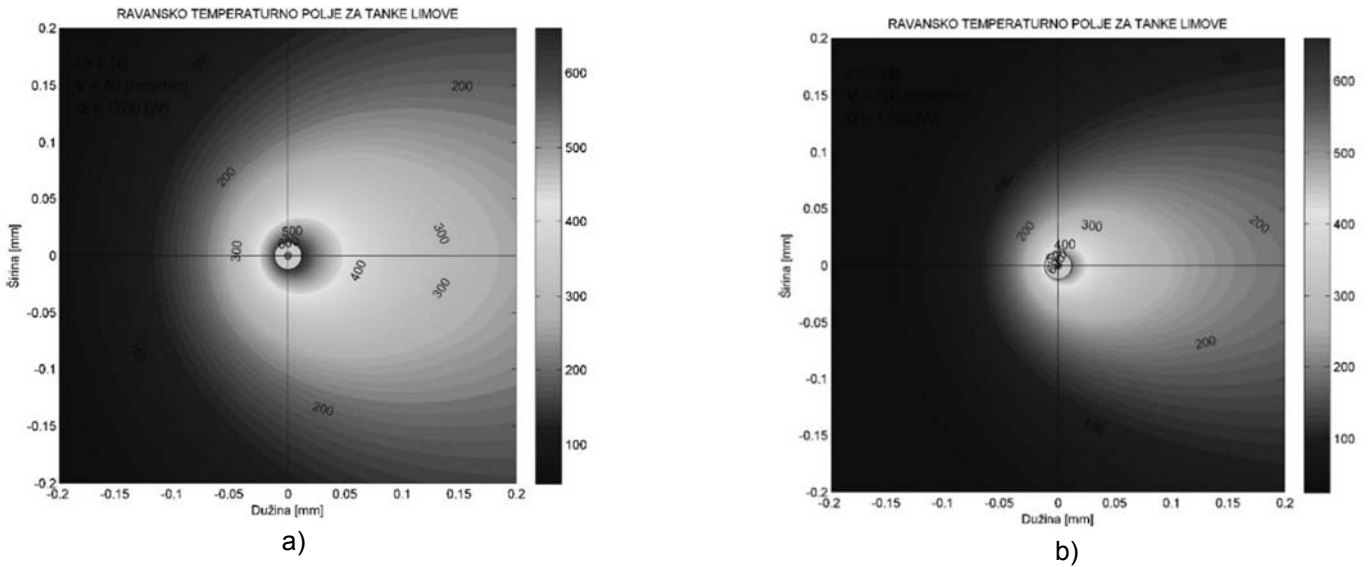
- 1) Ravansku temperaturnu sliku,
- 2) Prostornu temperaturnu sliku i
- 3) Dijagram promene temperature duž ose zavarivanja za pomake duž kordinate upravne na pravac translatorne brzine alata (brzine zavarivanja).

Dati modeli su formirani za samo jedan promenljiv parametar, i to: učestanost obrtanja alata, brzinu zavarivanja, prečnik čela alata i debljinu lima. Na Slici 2 prikazan je ravanski dijagram prenosa toplote za tanke i debele limove, tj. pojašnjeno je koji su parametri procesa od značaja fiksirani za dati model i kako utiču na količinu generisanja toplote i njeno prostiranje. Dok je na Slici 3 prikazano ravansko temperaturno polje za tanke limove u konkretnom slučaju kada je količina generisane toplote na početku procesa zavarivanja ista, a jedini varirani parametar je brzina zavarivanja. U oba slučaja dat je grafički prikaz temperaturnog polja, položaj alata kojim se zavaruje i prikaz izoterma u neposrednoj okolini alata kojim se zavaruje.



Slika 2. Pojašnjenje ravanskog dijagrama prenosa toplote.

Figure 2. Explanation of the planar diagram of the heat transfer.

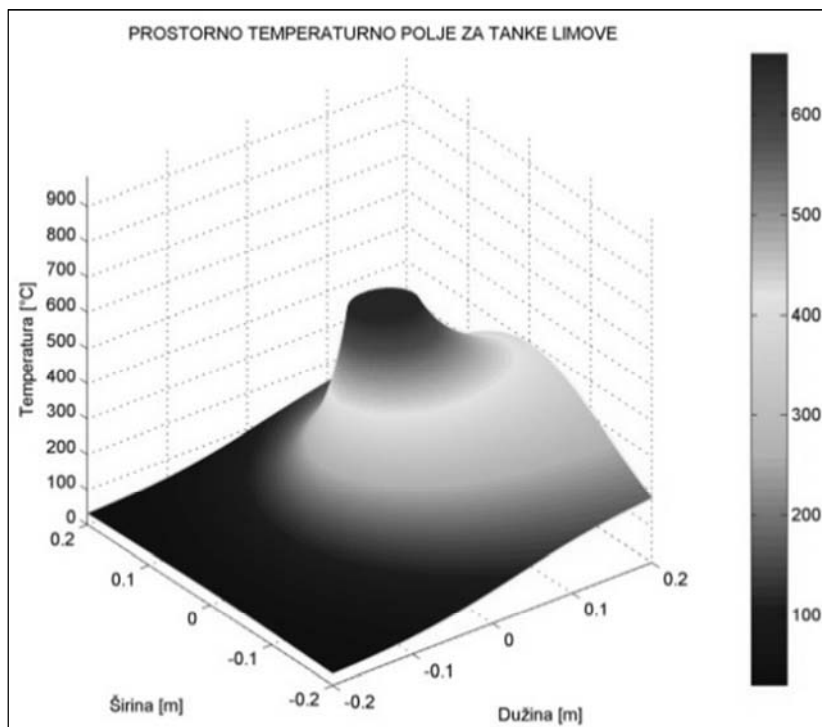


Slika 3. Ravanski dijagrami prenosa toplote za unos toplote od 1700 W pri brzinama zavarivanja a) 50 mm/min i b) 100 mm/min.

Figure 3. Plane heat transfer diagrams for heat input of 1700 W at welding speeds a) 50 mm/min and b) 100 mm/min.

Pored ravanskog temperaturnog polja modelirano je i prostorno temperaturno polje za tanke i debele limove. Ravanskom temperaturnom polju pridodata je treća osa (temperatura) i na taj način formirana prostorna slika generisane količine toplote. Varirani su isti parametri procesa kao i za ravansko temperaturno polje. Na Slici 4 prikazano je

prostorno temperaturno polje za tanke limove, za sledeće parametre: poluprečnik čela alata ($R_{sh}=14$ mm), učestanost obrtanja alata ($n=1000$ o/min), debljina lima ($N=6$ mm) i brzina zavarivanja ($V=100$ mm/min). Prema oblicima prostornih dijagrama može se zaključiti da li je ostvarena količina toplote dovoljna da se izvede proces zavarivanja.



Slika 4. Prostorno temperaturno polje generisane količine toplote.
Figure 4. Spatial temperature field of the generated heat quantity.



Da bi se upotpunila slika o ravanskom prostiranju toplote kroz tanku ploču urađeni su i dijagrami temperatura-x-osa (pravac zavarivanja), koji daju vrednosti temperatura oko izvora toplote duž njegovog pravca kretanja i pravca upravnog na pravac kretanja. Za dijagrame koji daju zavisnost temperatura-x-osa (pravac zavarivanja) a upravni su na pravac kretanja alata urađeni su za određene pomake duž y-ose (0, R_{sh} , $1.5 \cdot R_{sh}$, $2 \cdot R_{sh}$, $2.5 \cdot R_{sh}$, $3.5 \cdot R_{sh}$, $4.5 \cdot R_{sh}$), gde su pomeraji duž y-ose:

-0- položaj koji odgovara osi alata

- R_{sh} -položaj na izvodnici čela alata

- $1.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za poluprečnik i po čela alata od ose alata

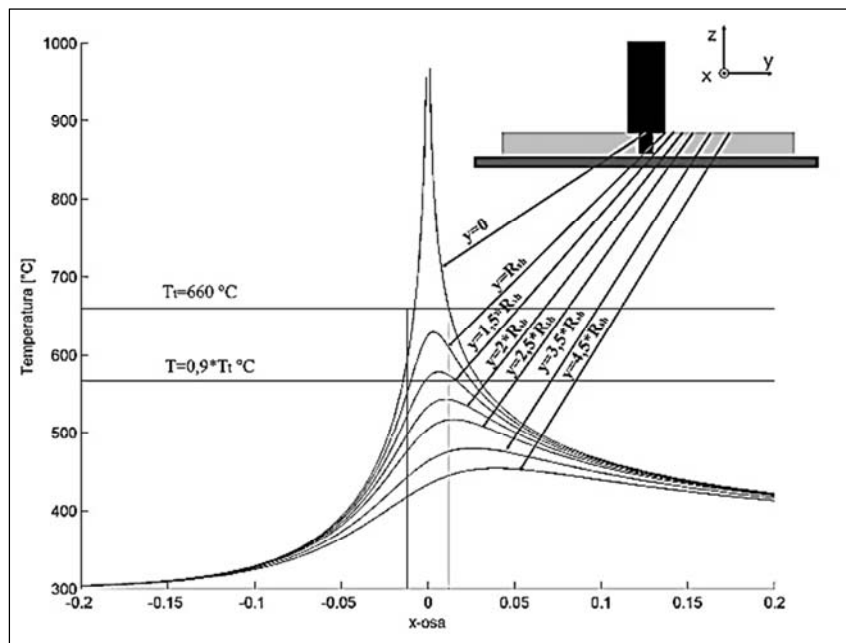
- $2 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za prečnik čela alata od ose alata

- $2.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za dva i po poluprečnika čela alata od ose alata

- $3.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za tri i po poluprečnika čela alata od ose alata

- $4.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za četiri i po poluprečnika čela alata od ose alata.

Na Slici 5 prikazan je dijagram temperatura-x-osa (pravac zavarivanja) uz odgovarajuća pojašnjenja. Dijagram temperaturnog polja ispred i iza izvora toplote, i sve to za odgovarajuće pomake duž ose upravne na pravac kretanja izvora toplote. Parametrima procesa zavarivanja: poluprečnik čela alata ($R_{sh}=9$ mm), učestanost obrtanja alata ($n=1000$ o/min), debljina lima ($N=6$ mm) i brzina zavarivanja ($V=100$ mm/min).



Slika 5. Promena temperature duž ose zavarivanja i ose normalne u odnosu na pravac zavarivanja.

Figure 5. Temperature change longitudinally the welding axis and the normal axis in relation to the welding direction.

4. Zaključak

U ovom radu, za potrebe formiranja analitičkog modela korišćena su rešenja diferencijalnih jednačina za provođenje toplote u čvrstom telu, generisanje toplote za tačkasti i linijski izvor u stacionarnom stanju. Generisana toplota opisana je kao površinski fluks, koji zavisi od varijacije smicajnog napona tečenja sa promenom temperature. Granice analitičkog modela su kao kod bilo kog analitičkog modela zavarivanja: termička svojstva materijala su nepromenljiva sa promenom temperature, toplotni gubitak zračenjem i konvekcijski kao i granični efekti ne uzimaju se u obzir.

4. Conclusion

In this work, for the purposes of forming an analytical model, solutions of differential equations for heat conduction in a solid body, heat generation for a spot and line source in a stationary state were used. The heat generated is described as a surface flux, which depends on the variation of the of yield shear stress with temperature change. The boundaries of the analytical model are as with any analytical welding model: the thermal properties of the material are unchangeable with temperature change, heat loss by radiation and convection as well as boundary effects are not taken into account.



Takođe, uticaj podloge na kojoj se zavaruje se ne može uzeti u obzir u jednostavnoj analitičkoj formulaciji problema, pa shodno tome nije uzet u obzir pri formiranju modela. Modelu su potrebni tačni podaci o naponu smicanja u blizini tačka topljenja materijala kako bi generisao termalnu sliku samo u stacionarnom stanju.

Formirani model može se korisno koristiti za parametarske studije FSW procesa i optimizaciju parametara zavarivanja sa minimalnim informacijama u vezi sa podešavanjem parametara zavarivanja. Tumačenjem generisanih ravanskih i prostornih temperaturnih dijagrama može se proceniti kakve će strukturne promene posedovati zavareni spoj. Pored toga što ravanski model sadrži izoterme, isti poseduje i liniju koja oslikava trag maksimalnih temperatura u polju, što je od velikog značaja za tumačenje pomenutog.

Cilj formiranja ovog i sličnih modela je ušteda vremena koje bi bilo potrebno za eksperimentalno variranja parametara postupka, što doprinosi produktivnosti, ekonomizaciji i podizanju kvaliteta zavarenih spojeva izvedenih postupkom FSW.

Literatura / References

[1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, C. J. Dawes, (1995): Friction Stir Butt Welding, Int. Patent App. PCT/GB92/02203 and GB Patent App. 9125978.8, Dec. 1991. U.S. Patent No. 5,460,317.

[2] K.E. Knipstrb'm (1995): New welding method for aluminium, ESAB Svetsaren, 3, 5-6.

[3] N. N. (1995): Friction welding of aluminium, ESAB Svetsaren 1, 30-31.

[4] C. Dawes, W. Thomson (1995): Friction stir joining of aluminium alloys, TWI Bulltin 6, 124-127.

[5] A. C. Nunes (1983): 'An Extended Rosenthal Weld Model', NASA Marshall Space Flight Center (MSFC), 165-170.

[6] T. Sheppard and D. S. Wright (1979): 'Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminum alloys at elevated temperatures', Met. Technol., 6, 215-223.

Also, the influence of the understructure on which the welding is done cannot be taken into account in a simple analytical formulation of the problem, and accordingly, it was not taken into account during the development of the model. The model needs accurate shear stress data near the melting point of the material in order to generate a steady state thermal image only.

The presented model can be usefully used for parametric studies of the FSW process and optimization of welding parameters with minimal information related to the setting of welding parameters. By interpreting the generated planar and spatial temperature diagrams, it is possible to estimate what kind of structural changes the welded joint will have. In addition to the fact that the plane model contains isotherms, it also has a line which representing the trace of the maximum temperatures in the field, which is of great importance for the interpretation of the aforementioned.

The goal of creating this and similar models is to save the time that would be needed for experimentally varying the parameters of the procedure, which contributes to productivity, economy and raising the quality of welded joints made by the FSW procedure.

[7] T. Jackson (1997): „Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys Sheppard”, A Materials Science and Technology; 13, 3; ProQuest Central 203

[8] P. Ferro: „ The Use of Matlab in Advanced Design of Bonded and Welded Joints”, University of Padova Italy.

[9] H. Schmidt: Hattel J. , Wert J. (2003) „ An analytical model for the heat generation in friction stir welding”, September. Denmark.

[10] Vilaca, P., Quintino, L., dos Santos, J.F., Zettler, R., Sheikhi, S. (2007). Quality assessment of friction stir welding joints via an analytical thermal model, iSTIR'. Materials Science and Engineering A, 445-446, 501-508.

[11] <https://www.essaii.com/friction-stir-welding-fsw-pros-cons/>, (Anonimno, 2022)