

## NUMERIČKO MODELIRANJE PROCESA ZAVARIVANJA

### NUMERICAL MODELING OF WELDING PROCESS

**Zdenko TONKOVIĆ<sup>1)</sup>, Jurica SORIĆ<sup>1)</sup>, Igor KARŠAJ<sup>1)</sup>, Mato PERIĆ<sup>2)</sup>**

**Ključne riječi:** proces zavarivanja, zaostala naprezanja, metoda konačnih elemenata, podmodeliranje, radanje elementa

**Key words:** welding process, residual stresses, finite element method, submodeling, element birth

**Sažetak:** Zaostala naprezanja imaju vrlo važan utjecaj na cijelovitost komponente i procjenu radnog vijeka zavarenih konstrukcija. Procjena zaostalih naprezanja numeričkim modeliranjem zavarivanja je računalno vrlo skup postupak. Većina simulacija zavarivanja provedena su uz odgovarajuća pojednostavljenja, kao što je reduciranje trodimenzijskog problema na dvodimenzijski. Međutim takva pojednostavljenja mogu dovesti do pogrešnih rezultata. Razvojem novih alata u metodi konačnih elemenata i brzih računalnih sustava, analiza ovih problema postaje učinkovitija. U prikazanom radu numeričko modeliranje procesa zavarivanja provedeno je primjenom tehnika podmodeliranja i rada elemenata za povećanje računalne efikasnosti i točnosti. Za verifikaciju tehnike podmodeliranja analizirano je zavarivanje dviju čeličnih ploča. Istražen je utjecaj izbora veličine podmodela na izračunate vrijednosti za temperature i naprezanja. Numerički rezultati su uspoređeni s dostupnim rješenjima iz literature.

**Abstract:** Residual stresses are an important factor in the component integrity and life assessment of welded structures. Prediction of residual stresses by numerical modeling of welding process is computational very expensive. Most of the welding simulations were performed with certain level of simplifications such as reducing a three dimensional problem to a two dimensional. However, such simplifications may lead to erroneous results. With the development of new finite element (FE) tools and fast computer systems, the analysis of such problems is becoming more efficient. In the present paper, numerical modeling of welding process is performed by using the FE submodeling and element birth techniques to improve both the computational efficiency and accuracy. In order to validate the submodeling technique, welding of two steel plates was analyzed. The influence of the choice of the submodel size on the temperature and stress results was investigated. The numerical results were compared with available solutions in the literature.

---

<sup>1)</sup> Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za tehničku mehaniku, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb  
E-mail: {zdenko.tonkovic, jurica.soric, igor.karsaj}@fsb.hr

<sup>2)</sup> B.E.S.T. Projekt d.o.o. Petrovaradinska 7, 10000 Zagreb, E-mail: mato.peric@fsb.hr

---

## 1. UVOD

Poznato je da se prilikom zavarivanja, uslijed lokaliziranog zagrijavanja i kasnijeg naglog hlađenja u zavarenom spoju i osnovnom materijalu, pojavljuju zaostala (rezidualna) naprezanja i deformacije. Ova naprezanja i deformacije mogu prouzrokovati značajne probleme u zavarenoj konstrukciji. Kombinacija velikih zaostalih naprezanja i naprezanja uslijed radnog opterećenja u području zavarenog spoja može pospješiti iniciranje zamorne pukotine, krhki lom ili lom uslijed korozije. Zato je od izuzetne važnosti njihovo uzimanje u obzir kod proračuna nosivosti realne konstrukcije, ali isto tako i kod procjene cjele vrednosti zavarene komponente s pukotinom. Osim toga, pravilnim odabirom postupka i redoslijeda zavarivanja značajno se mogu umanjiti deformacije prilikom zavarivanja složenijih konstrukcijskih komponenata. Za modeliranje unošenja topline prilikom zavarivanja i procjenu zaostalih naprezanja, u zadnjih 30-tak godina uspješno se primjenjuje metoda konačnih elemenata [6] čime se numeričkom simulacijom nastoji zamijeniti skupi eksperiment [1, 2, 5, 7-10]. Pritom značajan utjecaj na točnost numeričkog postupka ima odabir konačnih elemenata, modeliranje unošenja topline i materijala zavara te ponašanja materijala.

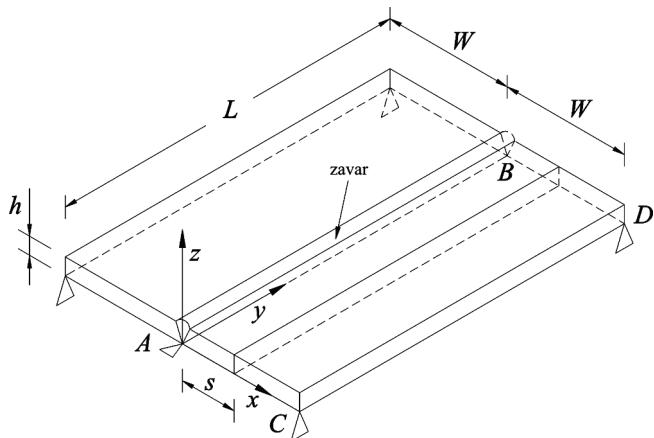
U cilju povećanja učinkovitosti i točnosti numeričke simulacije, u radu su primijenjene tehnike podmodeliranja (*submodeling technique*) i rađanja elemenata (*element birth*) [4, 5] na primjeru modeliranja zavarivanja dviju ploča sučeonim zavarom. Tehnika podmodeliranja, koja se temelji na prijelazu s globalnog ljkastog modela na trodimenijski podmodel diskretiziran gustom mrežom elemenata, za ovu primjenu pokazala se vrlo učinkovita. Posebno će to biti izraženo kod modeliranja složenijih zavarenih spojeva kao što je na primjer kutni spoj. Istražen je utjecaj veličine podmodela na točnost rezultata. Numerički rezultati uspoređeni su s rezultatima iz literature te je na taj način potvrđena točnost numeričkog modela.

## 2. VERIFIKACIJA NUMERIČKOG MODELA

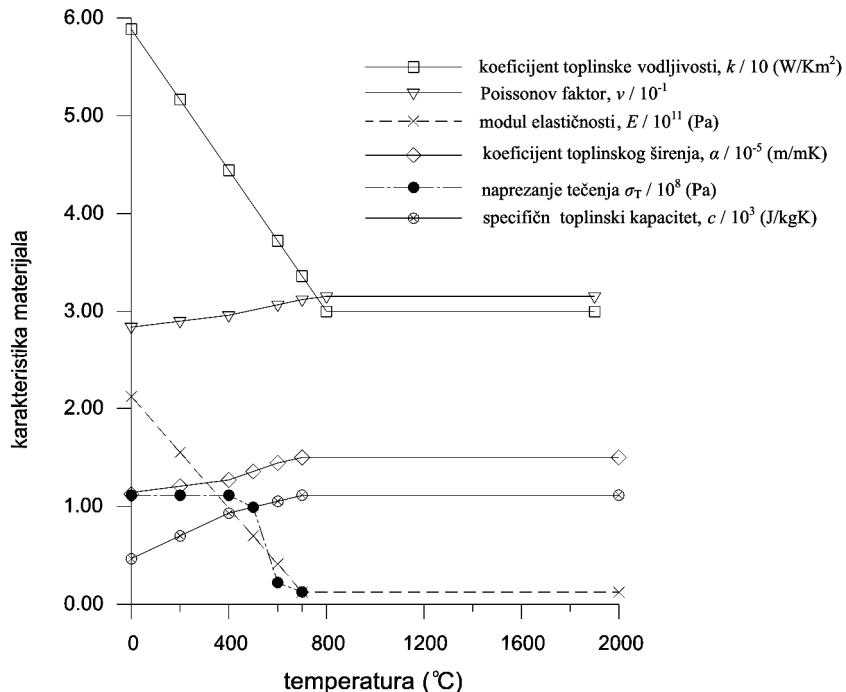
Za verifikaciju numeričkog modela odabran je primjer zavarivanja dviju ploča izrađenih iz čelika SAE 1020 koji je opisan u radu [9]. Geometrija zavarenih ploča prikazana je na slici 1. Ploče su jednakih dimenzija, duljine  $L = 300$  mm, širine  $W=100$  mm i debljine  $h = 5$  mm. Na slici 2 prikazana su mehanička i toplinska svojstva materijala u ovisnosti o temperaturi. Pretpostavljeno je da materijal zavara, zone utjecaja topline i osnovnog materijala imaju ista mehanička i toplinska svojstva. Nelinearno ponašanje materijala modelirano je primjenom inkrementalne teorije plastičnosti s von Misesovim kriterijem tečenja, uz pretpostavku malih deformacija i asocijativnog zakona tečenja. U literaturi [9] modelirano je linearno kinematičko očvršćenje materijala, no za to nisu dani pripadni podaci. Iz tog razloga je ovdje ponašanje materijala analizirano kao elastično-idealno plastično. Odabrani parametri zavarivanja u analizi su kako slijedi: TIG-elektrolučno zavarivanje, jakost struje zavarivanja  $I=110$  A, napon zavarivanja  $U=20$  V, brzina zavarivanja  $v=5$  mm/s i stupanj unosa topline  $E_{ff}=0,83$ . Simulacija zavarivanja ploča provedena je u jednom prolazu elektrode. Više o ulaznim podacima može se naći u literaturi [9]. Numeričke analize prikazanog proračunskog modela provedene su primjenom programskog paketa *ABAQUS/Standard* [4] koji se temelji na metodi konačnih elemenata.

U cilju usporedbe numeričkih rezultata s rezultatima iz literature [9], provedene su toplinske analize primjenom tehnike rađanja elemenata (*element birth*) [4] za slučaj ljkastog i trodimenijskog (3D) modela konačnih elemenata. Prikaz dvodimenijske i trodimenijske mreže konačnih elemenata dan je na slici 3a i b. Pritom je ljkasti model diskretiziran s 540 DS4 elemenata, dok se trodimenijska mreža sastoji od 2520 DC3D8 elemenata. Veličina i broj elemenata odabrana je na temelju analize utjecaja gustoće mreže na konvergenciju rezultata. U

skladu sa simetrijom, modelirana je samo jedna ploča. Za bolju usporedbu rezultata, uzeta je ista gustoća mreže za ljkusasti i 3D model. Toplinski tok dodijeljen je na prvom redu ljkusastih elemenata (dimenzija  $5 \times 2,5$  mm,  $Q = 1,465 \cdot 10^{10}$  J/m<sup>3</sup>s), odnosno kod 3D modela na dva elementa (dimenzija  $5 \times 2,5 \times 2,5$  mm,  $Q = 1,465 \cdot 10^{10}$  J/m<sup>3</sup>s) po presjeku ploče, kako je prikazano na slikama 3a i b. Primjenjeni rubni uvjeti prikazani su shematski na slici 1. Osim dodijeljenih uvjeta simetrije duž linije A-B, u točki A sprječeni su pomaci u smjeru osi y, a u točkama C i D u smjeru osi z.



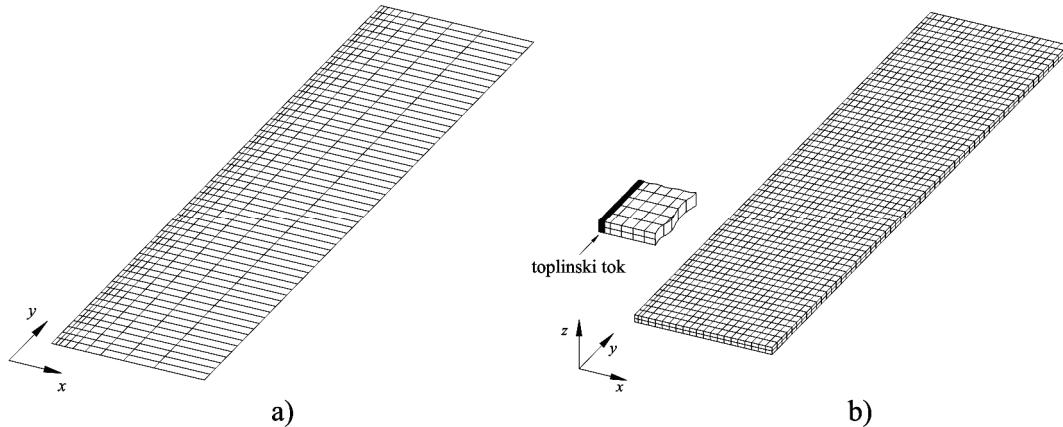
Slika 1. Geometrija zavarenih ploča



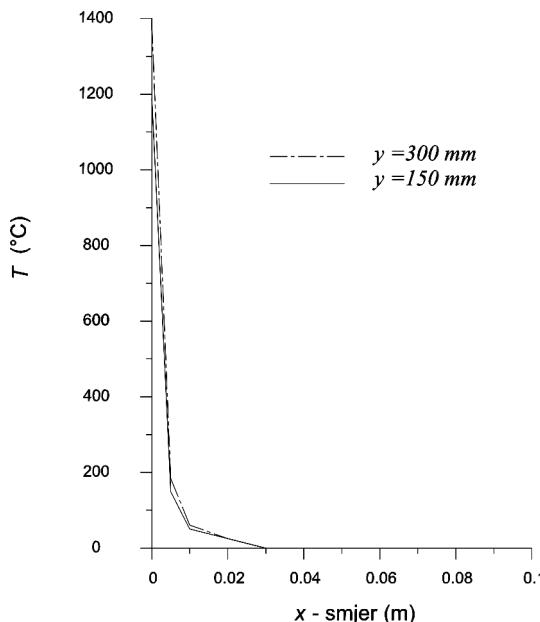
Slika 2. Mehanička i toplinska svojstva materijala [9]

Numerička analiza zaostalih naprezanja uslijed zavarivanja provodi se u dva koraka. Prvi korak je toplinska analiza iz koje se kao izlazni rezultat dobiva raspodjela temperature u čvorovima konačnih elemenata za vrijeme unosa topline zavarivanjem, kao i u tijeku procesa hlađenja materijala do sobne temperature. U drugom koraku, dobivene čvorne temperature

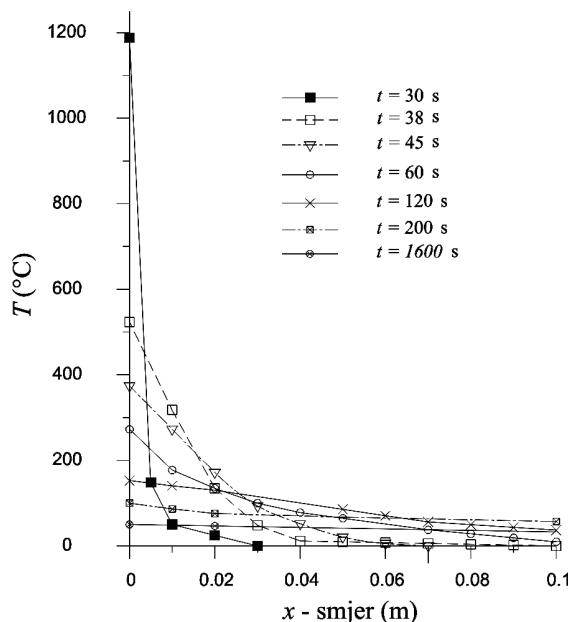
predstavljaju opterećenje kod analize zaostalih naprezanja. Prikaz raspodjele temperature za ljkusti i trodimenijski model dan je na slici 4 za dva slučaja: kada je elektroda na sredini ploče ( $y = 150$  mm,  $t = 30$  s) te na kraju postupka zavarivanja kada je elektroda na kraju ploče ( $y = 300$  mm,  $t = 60$  s).



Slika 3. Mreže konačnih elemenata: a) ljkusti model, b) 3D model



Slika 4. Raspodjela temperature na presjeku:  
 $y = 150$  mm,  $t = 30$  s i  $y = 300$  mm,  $t = 60$  s

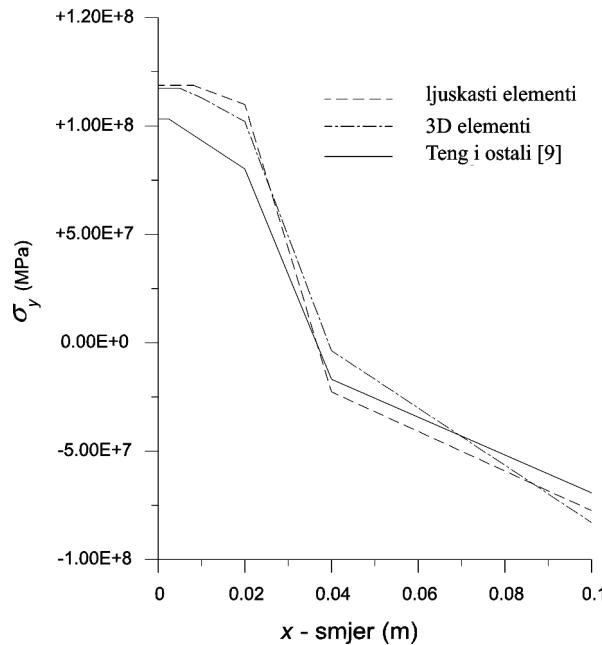


Slika 5. Proces hlađenja ploče na presjeku  
 $y = 150$  mm

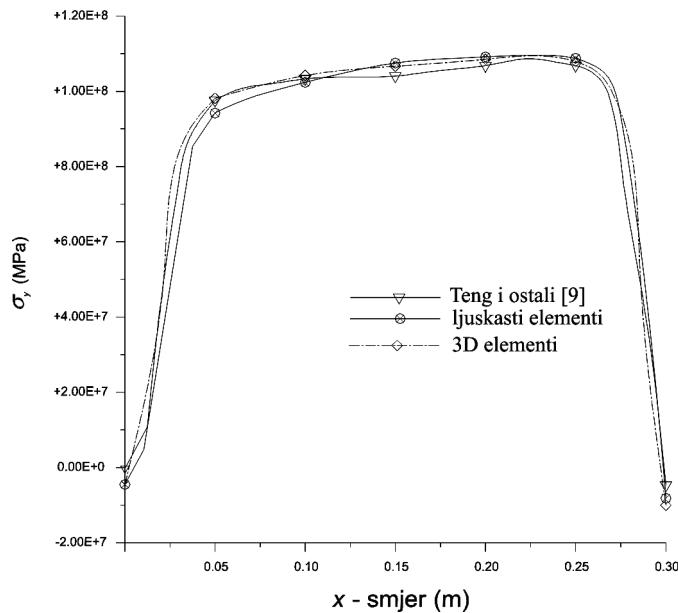
Proces hlađenja materijala od početka zavarivanja ( $t = 0$  s) do sobne temperature ( $t = 3600$  s) na poprečnom presjeku ploče  $y = 150$  mm prikazan je na slici 5.

Toplinska naprezanja i pripadne deformacije računate su za svaki vremenski inkrement. Na slici 6 prikazana je raspodjela zaostalih naprezanja  $\sigma_y$  duž  $x$ -smjera za  $y = 150$  mm i  $t = 30$  s dobivena primjenom ljkastog i 3D modela. Raspodjela zaostalih naprezanja  $\sigma_y$  duž  $y$  smjera za  $t = 30$  s dana je na slici 7. Pritom naprezanja  $\sigma_y$  djeluju paralelno sa smjerom zavarivanja. Kao što je vidljivo sa slika 6 i 7, dobiveno je dobro poklapanje rezultata ljkastog i 3D modela. Osim toga, rezultati su uspoređeni s rješenjima prikazanim u radu [9]. Mala odstupanja u rezultatima u blizini zone zavarivanja mogu se pripisati nedostatku podataka o kinematičkom

očvršćenju materijala u radu [9].



Slika 6. Usporedba rezultata za raspodjelu naprezanja  $\sigma_y$  duž  $x$  smjera (za  $y = 150$  mm i  $t = 30$  s) s rješenjima od Tenga i ostalih [9]



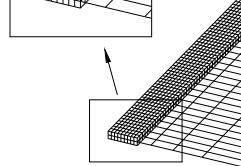
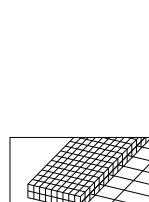
Slika 7. Usporedba rezultata za raspodjelu naprezanja  $\sigma_y$  duž  $y$  smjera za  $t = 30$  s rješenjima od Tenga i ostalih [9]

### 3. ANALIZA PRIMJENOM TEHNIKE PODMODELIRANJA

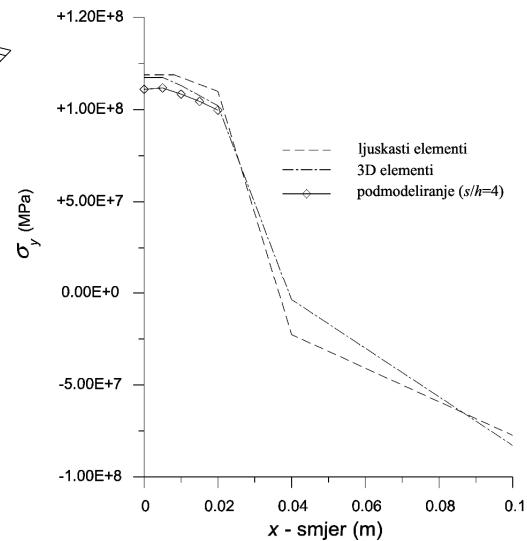
Nakon provedene verifikacije numeričkog modela, za analizu unosa topline i zaostalih naprezanja primjenjena je tehnika podmodeliranja [4]. Ova tehnika temelji se na prijelazu s globalnog modela na lokalni podmodel koji je diskretiziran gušćom mrežom 3D elemenata, a

obuhvaća područje od posebnog interesa. Rezultati za pomake globalnog modela dovoljno daleko od područja interesa predstavljaju rubne uvjete za podmodel. Takav pristup vrlo je učinkovit kada je područje interesa mjesto koncentracije naprezanja kao što je to slučaj pukotina, zaobljenja, zavara itd. [3]. Pritom rezultati analize ne smiju ovisiti o veličini podmodela. Drugim riječima, globalni model mora definirati ponašanje rubova podmodela s dovoljnom točnošću. Za što efikasniju analizu zavarivanja, pogotovo za slučaj složenijih geometrija (npr. T-spoj ploča), rubove podmodela treba odabrati što bliže zavaru, ali ipak dovoljno daleko od zavara da bi se dobro opisao unos topline i elastoplastično ponašanje materijala.

Za analizirani primjer, cilj je bio odrediti veličinu podmodela kod kojeg će se čvorne temperature i pomaci za čvorove podmodela dovoljno točno interpolirati iz rezultata globalnog modela. Na slici 1 širina podmodela označena je sa  $s$ , a duljina odgovara duljini ploče  $L$ . Korištena je *shell-to-solid* tehnika podmodeliranja [4]. Razmatrane su četiri različite veličine podmodela u odnosu na debljinu ploče:  $s/h = 1, 2, 3, 4$  i  $5$ . Na slici 8 dan je prikaz globalnog ljkastog modela i 3D podmodela. Prikazani globalni ljkasti model sadrži  $540$  DS4 elemenata, dok je podmodel diskretiziran s  $2178$  DC3D8 elemenata. Najprije je provedena analiza unosa topline na globalnom ljkastom modelu. Dobiveni rezultati za temperature globalnog modela predstavljali su rubne uvjete za podmodel s gustom mrežom 3D elemenata. Analognim postupkom, provedena je i analiza zaostalih naprezanja.



Slika 8. Globalni ljkasti model i 3D podmodel  
 $(s/h = 4)$

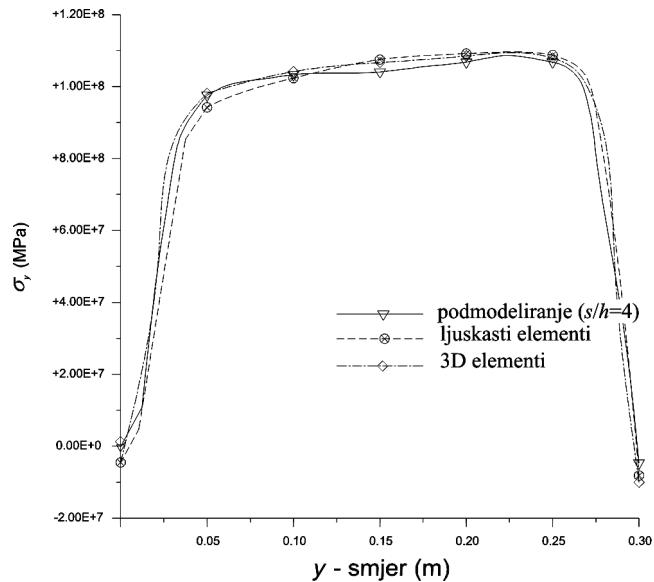


Slika 9. Usporedba rezultata analize podmodeliranja  
 za raspodjelu naprezanja  $\sigma_y$  duž  $x$  smjera  
 za  $y = 150$  mm i  $t = 30$  s s rješenjima ljkastog i 3D  
 modela

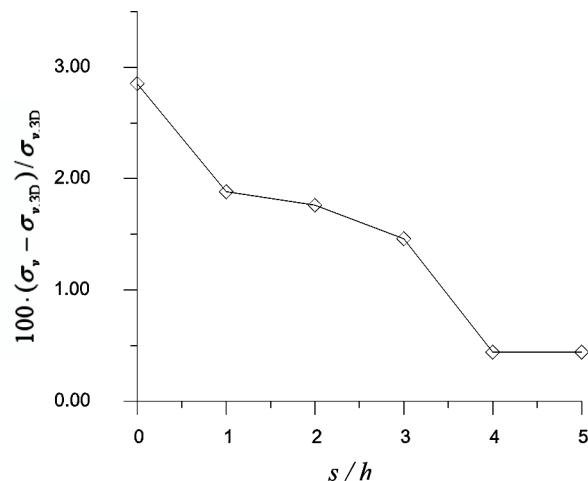
Rezultati analize podmodeliranja uspoređeni su s rješenjima iz prethodnog poglavlja dobivena primjenom ljkastog i 3D modela (slike 9 i 10). Pritom je mreža 3D konačnih elemenata podmodela vrlo slična mreži primijenjenoj za analizu potpunog 3D modela. Kao što je vidljivo sa slikama 9 i 10, rezultati dobiveni metodom podmodeliranja vrlo dobro se podudaraju s prethodno opisanim rješenjima.

Na slici 11 prikazana je veličina greške zaostalih naprezanja  $\sigma_y$ , koja djeluju paralelno sa smjerom zavarivanja, za različite veličine podmodela  $s$ . Kao referentno rješenje poslužio je potpuni 3D model konačnih elemenata. Iznos greške definiran je kao  $100 \cdot (\sigma_y - \sigma_{y,3D}) / \sigma_{y,3D}$ . Iz rezultata prikazanih na slikama 9, 10 i 11 može se zaključiti da podmodel mora imati minimalno

veličinu  $s/h = 4$  da bi greška u zaostalim naprezanjima bila manja od 0,5 %.



Slika 10. Usporedba rezultata analize podmodeliranja za raspodjelu naprezanja  $\sigma_y$  duž  $y$  smjera za  $t = 30$  s s rješenjima ljuskastog i 3D modela



Slika 11. Veličina greške pri izračunavanju naprezanja  $\sigma_y$  duž  $x$  smjera za  $y = 150$  mm i  $t = 30$  s u odnosu na veličinu podmodela

#### 4. ZAKLJUČAK

U prikazanom istraživanju mogućnosti tehnike podmodeliranja iskorištene su za analizu zaostalih naprezanja u procesu zavarivanja dviju ploča. Osim toga, za što realnije modeliranje unosa topline kod zavarivanja primijenjena je i tehnika rađanja elemenata. Najprije je provedena verifikacija numeričkog modela usporedbom s rezultatima iz literature. Kao što je to uobičajeno u literaturi, ploča je diskretizirana s ljuskastim elementima, odnosno za detaljniju analizu s 3D elementima. Nakon toga, provedene su analize primjenom tehnike podmodeliranja uz određivanje optimalne veličine podmodela. Razmatrano je pet različitih veličina podmodela u odnosu na debljinu ploče:  $s/h = 1, 2, 3, 4$  i  $5$ . Zaključeno je da podmodel mora imati minimalno veličinu  $s/h = 4$  da bi greška u zaostalim naprezanjima bila manja od 0,5 %. Pritom se

za približno istu točnost rezultata, primjenom tehnike podmodeliranja dobiva puno manji numerički model, u odnosu na potpuni 3D model konačnih elemenata, što predstavlja znatnu uštedu u vremenu računanja. Prednosti tehnike podmodeliranja doći će mnogo više do izražaja pri modeliranju procesa zavarivanja složenijih konstrukcija.

## 5. LITERATURA

- [1] Akbari Mousavi, S.A.A., Miresmaeli, R., "Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel", J. Materials Processing Technology, u tisku.
- [2] Chang, P.H., Teng, T.L., "Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints", Comp. Mater. Sci., Vol. 29, 2004, pp. 511–522.
- [3] Diamantoudis, A., Labeas, G., "Stress intensity factors of semi-elliptical surface cracks in pressure vessels by global-local finite element methodology", Eng. Fracture Mech., Vol. 72, 2005, pp. 1299–1312.
- [4] Hibbitt, Karlsson & Serensen, Inc., ABAQUS/Standard, User's guide and theoretical manual, Version 6.8, 2008.
- [5] Perić, M., Tonković, Z., Karšaj, I., "Numerical analysis of residual stresses in welding process using submodelling technique", 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, Singapur, 2009.
- [6] Sorić, J., "Metoda konačnih elemenata", Golden marketing, Zagreb, 2004.
- [7] Taljat, B., Radhakrishnan, B., Zacharia, T., "Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 246, 1998, pp. 45–54.
- [8] Teng, T.L., Lin, C.C., "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds", Int. J. Press. Vess. Piping, Vol. 75, 1998, pp. 857–864.
- [9] Teng, T.L., Chang, P.H., Tseng, W.C., "Effect of welding sequences on residual stresses", Comp. Struct., Vol. 81, 2003, 273-286.
- [10] Zeng, Z., Wang, L., Wang, Y., Zhang, H., "Numerical and experimental investigation on temperature distribution of the discontinuous welding", Computational Materials Science, u tisku.