

## PRIMJENA NUMERIČKIH SIMULACIJA U TEHNOLOGIJI ZAVARIVANJA

### Application of Numerical Simulations in Welding Technology

Ivica Garašić<sup>1</sup>, Zoran Kožuh<sup>1</sup>, Jadranka Eržišnik<sup>1</sup>, Ivan Jurić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska

**Ključne riječi:** *numeričke simulacije, zavarivanje, deformacije.*

#### Sažetak

U radu je opisana numerička simulacija procesa zavarivanja. Objašnjena su osnovna načela te su navedeni ulazni podaci kao i rezultati simulacije. Također su navedena područja primjene numeričke simulacije zavarivanja, osnove prednosti i ograničenja. U eksperimentalnom dijelu provedena je simulacija zavarivanja T-spoja. Izmjerene vrijednosti dobivene eksperimentom uspoređene su s rezultatima simulacije i zapažena je značajna podudarnost. Ipak, zbog prisutnog odstupanja, naglašena je važnost preciznog definiranja ulaznih podataka.

#### Abstract

In this research, a numerical simulation of welding process is described. Basic principles are explained and input data are listed as well as simulation results. Fields of application of numerical simulation of welding, basic advantages and limitations are also stated. In the experimental part the simulation of welding of T-joint is conducted. Values measured in the experiment are compared with simulation results and significant congruence is observed. However, due to existing deviations, importance of accurate defining of input data is emphasized.

#### 1. Uvod

Zavarivanje je najčešće korištena tehnologija nerastavljivog spajanja metalnih materijala koja se koristi u gotovo cijeloj metaloprerađivačkoj industriji. Obično se provodi taljenjem materijala pri čemu primijenjeni unos topline tijekom zavarivanja uzrokuje pojavu neujednačenih temperaturnih polja u području spoja te, posljedično, neujednačenu ekspanziju odnosno kontrakciju materijala. Konačan rezultat je pojava zaostalih naprezanja i trajnih deformacija. Zaostala naprezanja najčešće imaju negativan utjecaj na svojstva spoja jer smanjuju nosivost, povećavaju sklonost krhkom lomu, zamoru materijala i vodikovim pukotinama te su jedan od uzročnika napetostne korozije. Deformacije koje nastaju kao posljedica zavarivanja uzrokuju promjene oblika i dimenzija zavarenih sekcija te tako otežavaju ili čak onemogućuju montažu. Također, zavarivanje utječe i na mikrostrukturu materijala u području spoja. Previsok unos topline može uzrokovati pogrubljenje kristalnog zrna, smanjenje čvrstoće toplinski obrađenih materijala i značajan pad vrijednosti udarnog rada loma. Prenizak unos topline može uzrokovati zakaljivanje u zoni utjecaja topline i metalu zavara što pogoduje nastanku krhkog loma i vodikovim pukotinama.

Naknadne korekcije navedenih problema poslije zavarivanja kao što su toplinska obrada i razne metode ravnjanja, uvelike produljuju vrijeme i povećavaju troškove proizvodnje. Stoga je navedene negativne učinke najpovoljnije ublažiti pravilnim odabirom tehnologije zavarivanja što podrazumijeva odabir odgovarajućeg postupka zavarivanja i čitavog niza pripadajućih parametara, određivanje međuprolazne temperature i temperature predgrijavanja, izbor načina i sila stezanja te optimiranje redosljeda zavarivanja. Međutim, jasno je da je tako velik broj čimbenika nemoguće dovoljno precizno odrediti samo na temelju znanja i iskustva tehnologa, naročito ako se radi o velikim i kompleksnim konstrukcijama ili zavarivanju specifičnih materijala. Naime, vrlo mala odstupanja ulaznih varijabli često rezultiraju značajnim promjenama izlaznih varijabli, odnosno značajnim

odstupanjem od željenih svojstava konstrukcije. Stoga je za preciziranje navedenih čimbenika potrebno provesti niz radnih proba i izraditi nekoliko modela i prototipova što opet u velikoj mjeri može utjecati na troškove i vrijeme proizvodnje. Osim toga, problem predstavlja i činjenica da zavarivanje modela može biti potpuno drukčije od zavarivanja originalne konstrukcije.

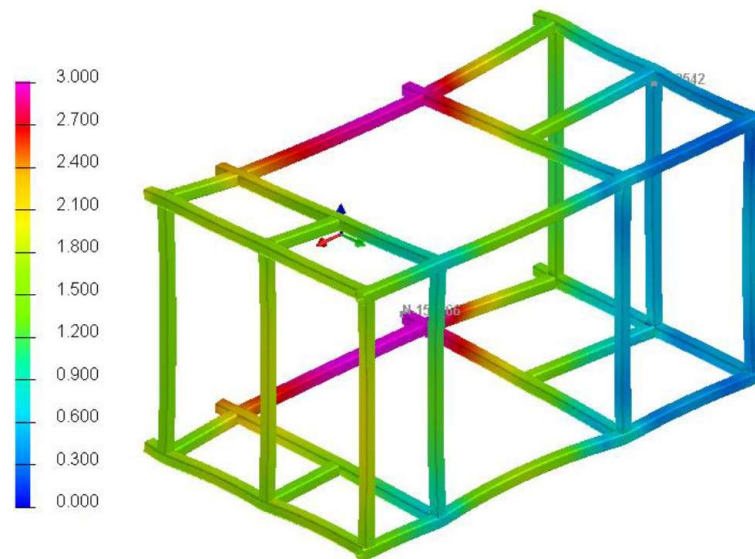
Suvremeno rješenje pomoću kojeg se sve navedene probleme može predvidjeti, a potom i ublažiti ili čak izbjeći su numeričke simulacije procesa zavarivanja [1]. Radi se o računalnim programima kojima je moguće simulirati proces zavarivanja te predvidjeti pojave poput zaostalih naprezanja i deformacija konstrukcije, ali i mikrostrukturne promjene u svakoj točki radnog komada. Numerička simulacija zavarivanja može se provoditi tijekom pripreme tehnologije zavarivanja za novi proizvod, pri unaprjeđenju postojećih proizvoda, za optimizaciju tehnologije zavarivanja ili za procjenu vijeka trajanja radnog komada uzimajući u obzir razinu zaostalih naprezanja nakon zavarivanja ili popravaka koji su nastali tijekom primjene određene tehnologije [2]. Uporabom numeričke simulacije zavarivanja moguće je smanjiti broj pokusa i prototipova tijekom razvoja tehnologije, ali, također, skratiti vrijeme potrebno za pripremu, odnosno smanjiti vezane troškove. Različite varijante oblikovanja i tehnologija zavarivanja mogu se numerički simulirati, a potom se mogu razmotriti dobivena saznanja o ponašanju konstrukcije tijekom i nakon zavarivanja. Temeljem tako dobivenih rezultata moguće je odabrati najpovoljnije oblikovanje i tehnologiju zavarivanja. Optimizacija ulaznih parametara zavarivanja, redoslijeda zavarivanja, načina stezanja i krutosti steznih naprava provodi se u cilju postizanja tražene kvalitete izrade.

Osnovna prednost uporabe numeričkih simulacije zavarivanja te, eventualno, predgrijavanja i naknadne toplinske obrade, proizlazi iz mogućnosti boljeg razumijevanje procesa. Tijekom zavarivanja poznati su samo ulazni parametri, dok su izlazne varijable, odnosno konačni rezultati vidljivi tek kad cjelokupan proces zavarivanja završi. Pri kvantifikaciji kvalitete izvedenih zavara koriste se brojne nerazorne i razorne ispitne metode, a tek je na temelju dobivenih rezultata moguće odrediti konačnu ocjenu provedene tehnologije zavarivanja. Međutim, u slučaju kada se pojavi problem, uzrok se može detektirati samo na temelju ulaznih varijabli i konačnog stanja, bez pouzdanih informacija o cjelovitosti procesa. Numerička simulacija zavarivanja omogućuje kontinuirano praćenje cjelokupnog tijeka procesa. Na taj način se dobiva cjelovita povijest odabranih čimbenika kao što su deformacije, raspodjela mikrostrukturnih faza, zaostalih naprezanja, kumulativna plastična deformacija itd. Na temelju analize povijesti zbijanja u konstrukciji, otvara se mogućnost lakšeg pronalaska uzroka problema te odabira alternativne tehnologije.

Industrijska primjena numeričkih simulacija zavarivanja započela je devedesetih godina 20-tog stoljeća, uglavnom u SAD-u, Japanu, Francuskoj i Njemačkoj. Zahvaljujući skorašnjem intenzivnom razvoju računala i metoda koje su omogućile izračun za velike konstrukcije, ostvaren je velik napredak u primjeni numeričke simulacije zavarivanja kao podršci industriji. Trenutno je na tržištu prisutno više poduzeća koja se bave izradom softvera i njihovom primjenom za numeričku simulaciju zavarivanja.

## 2. Načela numeričke simulacije zavarivanja

U slučaju kada analizirana konstrukcija ima složenu geometriju, složeno je opterećena ili je izrađena od više različitih materijala, rješenje problema nije moguće naći u analitičkom obliku. Naime, analitičko rješenje podrazumijeva dobivanje analitičkih izraza za računanje traženih karakteristika (deformacije, temperatura, naprezanje i sl.) na različitim mjestima konstrukcije. Za dobivanje takvih podataka potrebno je rješavati diferencijalne jednačbe, a to je pak moguće samo za vrlo jednostavne probleme odnosno jednostavne konstrukcije. Stoga se pri analizi složenih konstrukcija redovito koriste numeričke metode, najčešće, metoda konačnih elemenata [3]. Numerička simulacija zavarivanja temelji se na metodi konačnih elemenata. Primjer numeričke simulacije deformacija složene konstrukcije nastalih uslijed zavarivanja prikazan je na slici 1.



Slika 1 Deformacija konstrukcije nakon zavarivanja (povećanje 30x) [4]

Rješavanje problema metodom konačnih elemenata svodi se na rješavanje sustava niza algebarskih jednačbi što implicira primjenu računala. Pošto se proces modeliranja sastoji u diskretizaciji kontinuuma odnosno dijeljenju konstrukcije na više međusobno povezanih konačnih elemenata, valja napomenuti da su dobivena rješenja približna i odnose se na određene točke konstrukcije. Za svaki konačni element postavljaju se jednačbe, a njihovom kombinacijom dobivaju se jednačbe cijele konstrukcije. Ukupan broj, tip i veličina konačnih elemenata u razmatranom modelu ovise o intuiciji, inženjerskoj praksi i poznavanju suštine razmatranog problema. Tako određujući veličinu elemenata, tvorac modela sam odabire točnost rezultata proračuna [5]. Elementi trebaju biti dovoljno mali da mogu dati upotrebljive rezultate, ali i dovoljno veliki da se izbjegnu dugotrajni proračuni. Mali elementi su, u općem slučaju, poželjni tamo gdje se rezultati brzo mijenjaju, a veliki se elementi pretežito koriste tamo gdje su geometrijske i druge promjene male ili gdje ih uopće nema.

Unatoč značajnom razvoju računala, izrazita kompleksnost procesa zavarivanja često čini simulacije vrlo dugotrajnim. Zbog toga se koriste određene tehnike čija je svrha pojednostavljenje simulacije zavarivanja. Često korištena tehnika je tretiranje zone zavarenog spoja i područja u blizini kao 3D model, a udaljenija područja kao ljuskasti dvodimenzionalni model [6]. Potpuna analiza uključuje područja prikazana 3D modelom, a za ljuskasta područja provodi se jednostavnija analiza. Pri tome je mreža konačnih elemenata znatno gušća oko zavarenog spoja. Tako se vrijeme simulacije može značajno skratiti bez gubitka točnosti rezultata.

## 2.1. Ulazni podaci za numeričke simulacije zavarivanja

Točnost ulaznih podataka za numeričku analizu zavarivanja osobito je važna za postizanje rezultata simulacije koji odgovaraju stvarnosti. Na zonu taljenja utječe veliki broj čimbenika. Kako bi simulacija bila ispravna i točna, bilo bi potrebno izmjeriti i kvantificirati sve te čimbenike te ih unijeti u simulaciju. To je, s ekonomskog gledišta, vrlo zahtjevno, pa stoga komercijalni programi uvode određena pojednostavljenja kod izrade modela izvora topline. Tako se na primjer ne uzima u obzir tečenje rastaljenog metala, vrsta zaštitnog plina, promjer dodatnog materijala i promjere u načinu prijenosa metala [7].

Osim spomenutog izvora topline, ulazni podaci za numeričku simulaciju zavarivanja su [1, 8]:

- informacije o konstrukciji (3D CAD model)
- vrsta i kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala
- informacije o tehnologiji zavarivanja
- redoslijed zavarivanja

- broj prolaza u slučaju višeslojnog zavarivanja
- temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura
- eventualna naknadna toplinska obrada
- način i sile stezanja.

## 2.2. Rezultati numeričke simulacije zavarivanja

Primjenom numeričke simulacije zavarivanja moguće je dobiti slijedeće rezultate [1]:

- temperaturna polja
- struktura materijala (za čelik, Al i Ti legure)
- tvrdoća
- deformacije
- zaostala naprezanja
- ukupna plastična deformacija
- indirektnu procjenu svojstava materijala kao što su granica razvlačenja i vlačna čvrstoća.

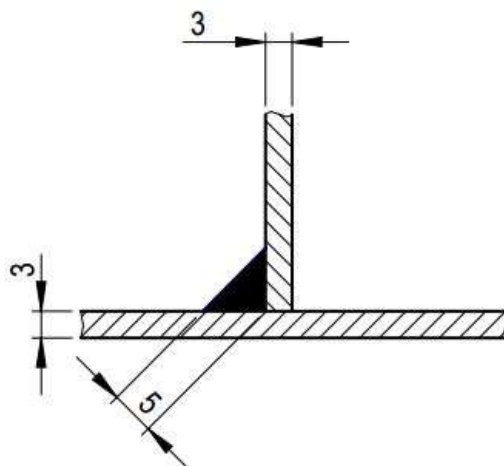
Velik beneficij predstavlja činjenica da se navedeni izlazni podaci ne odnose samo na konačno stanje po završetku zavarivanja, nego su dostupni za tijek cijeloga procesa. To značajno pridonosi lakšem razumijevanju procesa i bržem pronalasku uzroka eventualnih problema.

## 2.3. Primjena numeričke simulacije zavarivanja

Numeričke simulacije zavarivanja u prvom se redu koriste kod izrade teških, kompleksnih i odgovornih konstrukcija u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji. Reparatura velikih radnih komada također zauzima značajan udio u primjeni. Numerička analiza zavarivanja koristi se u strojogradnji, automobilskoj industriji te zrakoplovnoj i brodograđevnoj industriji. Pomoću odgovarajućeg softverskog rješenja moguće je simulirati praktički sve postupke elektrolučnog zavarivanja. Također, razvijena su rješenja za elektrootporno zavarivanje i zavarivanje trenjem. Broj dostupnih materijala u bazi svakodnevno se povećava što znači velik izbor osnovnih i dodatnih materijala.

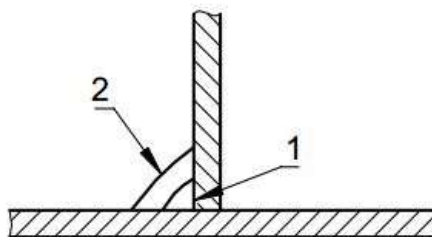
## 3. Eksperimentalni rad

U eksperimentalnom dijelu simuliran je provedeni postupak zavarivanja T-spoja limova od nehrđajućeg austenitnog čelika kako je prikazano na slici 2. Uzorak je zavaren MAG postupkom zavarivanja uz upotrebu impulsnog načina prijenosa metala. Za zavarivanje je korišten uređaj DAIHENVARSTROJ Welbee P500L. Kako bi se osigurala ujednačena brzina, zavarivanje se provodilo mehanizirano pomoću automata za zavarivanje BUG-0 System MDS 1002. Zavarivanje je provedeno u dva prolaza kako prikazuje slika 3.



Slika 2 Dimenzije zavarenog spoja [3]

Osnovni materijal limova je austenitni nehrđajući čeliki AISI 321. Kao dodatni materijal korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. oznake EZ – MIG 316 LSi. Kao zaštitni plin korišten je Messer Inoxline C2 zaštitni plin, odnosno mješavina 97,5 % Ar i 2,5 % CO<sub>2</sub>. Dodatak male količine CO<sub>2</sub> poboljšava stabilnost električnog luka i omogućuje veće brzine zavarivanja. Protok zaštitnog plina u eksperimentu iznosio je 16 l/min.



Slika 3 Redosljed zavarivanja uzorka [3]

Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 1.

Tablica 1 Parametri zavarivanja uzorka [3]

Redni broj prolaza	Brzina žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Napon, V	Struja, A	Protok plina, l/min	Unos topline, kJ/cm
1.	7	62	22	206	16	4,37
2.	7	58	24,5	234	16	5,9

Na slici 4 vidljivo je da kut nagiba pištolja za zavarivanje iznosi 45°, tehnika rada je neutralna, a položaj zavarivanja je horizontalni.

Treba imati na umu da prilikom izrade simulacije, neki ulazni podaci nisu uvršteni. Stoga je jasno da rezultati simulacije neće u potpunosti moći odgovarati eksperimentalnim vrijednostima. Tako je, na primjer, u simulaciji model sa svih strana okružen zrakom okolišne temperature 20 °C, dok su u eksperimentu limovi naslonjeni na podložnu aluminijsku ploču. Potencijalni uzroci grešaka su:

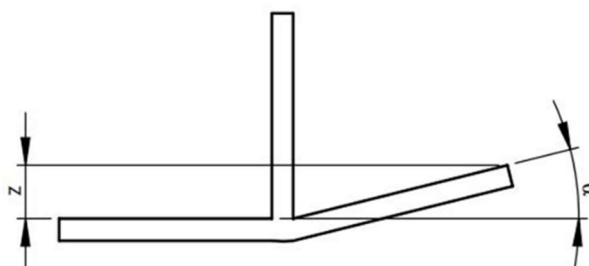
- prethodno izvršeno pripajanje limova
- odvođenje topline
  - kondukcija uzrokovana podložnom aluminijskom pločom
  - konvekcija uslijed puhanja zaštitnog plina
  - promjene u temperaturi okoline
- nedovoljno precizno određena duljina zavara

- prethodna deformacija ploča
- nestacionarnost parametara
- točnost izračuna unosa topline.



Slika 4 Postav eksperimenta [3]

Nakon zavarivanja i hlađenja, provedeno je mjerenje kutne deformacije uzoraka. Ukupno je izvršeno deset mjerenja na razmacima od 23 mm, s početkom na mjestu gdje je i započeto zavarivanje. Mjerenje je vršeno pomoću pomičnog mjericila tako da se mjerio otklon ruba ploče  $z$  u vertikalnom smjeru, kako je prikazano na slici 5. Izmjerene vrijednosti prikazane su tablici 2.

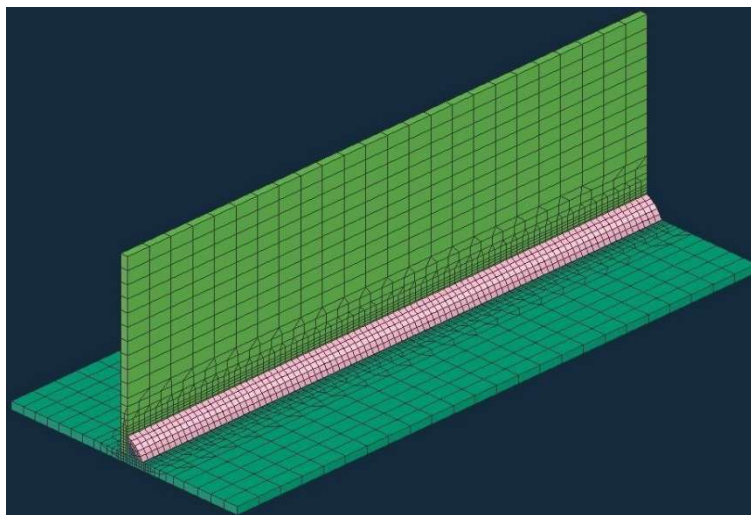


Slika 5 Shematski prikaz mjerenja deformacija [3]

Tablica 2 Rezultati mjerenja deformacija uzorka [3]

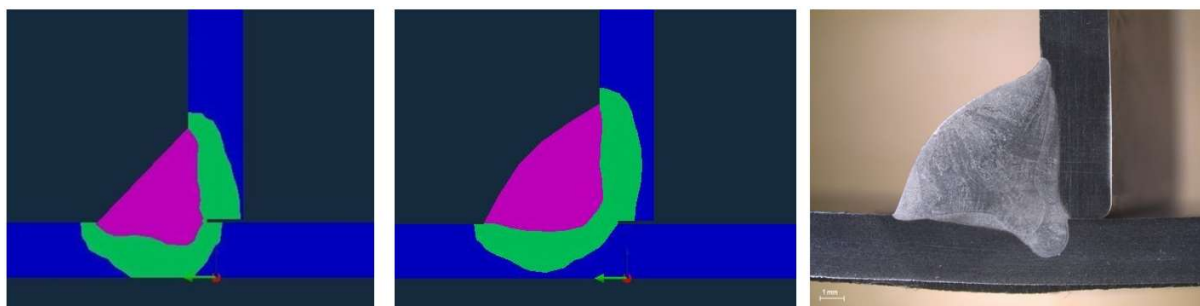
Mjerna točka	$z$ , mm
1	2,6
2	2,5
3	2,9
4	3,2
5	3,1
6	3,3
7	3,8
8	3,6
9	3,9
10	3,7

Za numeričku simulaciju korišten je programski paket Welding Solution razvijen od strane ESI grupe. Načinjen je trodimenzionalni model s mrežom elemenata prikazan na slici 6. koji dimenzijama u potpunosti odgovara eksperimentalnom uzorku. Gustoća konačnih elemenata je najveća u zoni zavarenog spoja jer je to područje od najvećeg interesa. Udaljavanjem od zavarenog spoja, gustoća elemenata opada jer se u tom području očekuju značajno manje temperaturne i druge promjene.



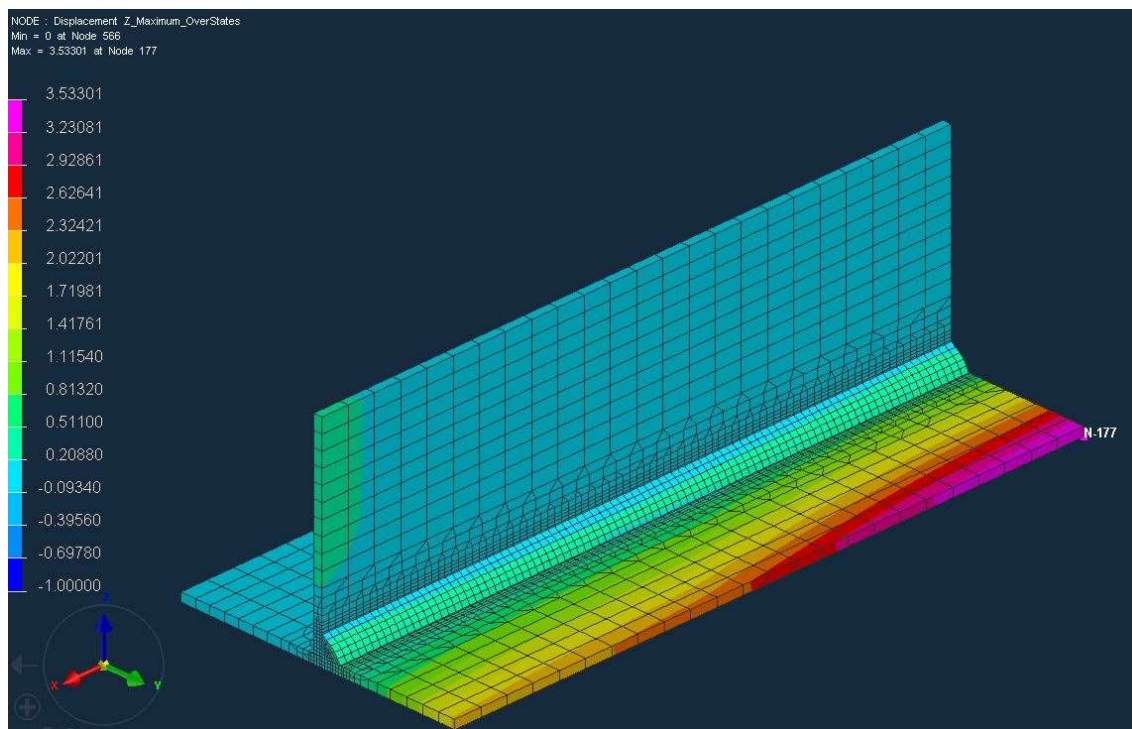
Slika 6 Mreža 3D elemenata [3]

Nakon uvrštenih svih ulaznih varijabli i provedene kalibracije izvora topline koja je prikazana na slici 7, provedene su završne termo-metalurške i mehaničke simulacije. Na slici 7 također je vidljivo da su i pri kalibraciji izvora topline unesena određena odstupanja jer zone metala zavara u simulaciji nisu u potpunosti istovjetne onima na makroizbrusku eksperimentalnog uzorka.



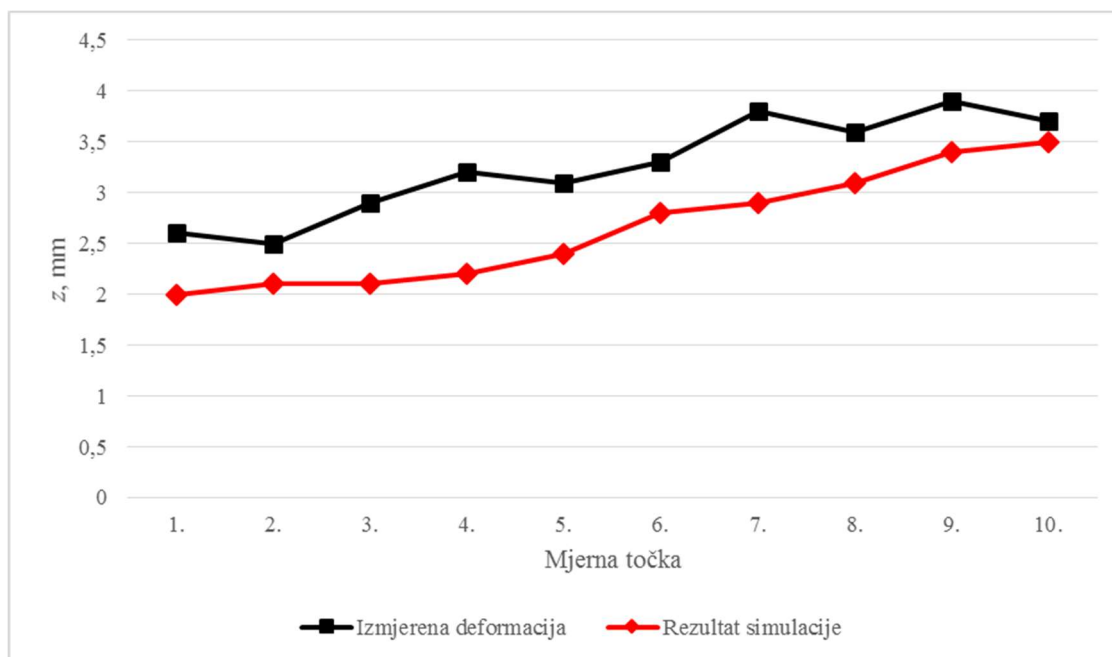
Slika 7 Usporedba oblika zona zavara dobivenih simulacijom i eksperimentom [3]

Slika 8 prikazuje vrijednosti deformacija modela u smjeru osi Z. Vidljivo je da deformacije rastu u smjeru zavarivanja, a glavnina deformacija javlja se na dijelu horizontalne ploče sa strane zavara, dok na suprotnoj strani nije došlo do značajnije deformacije.



Slika 8 Raspodjela deformacija modela u smjeru osi Z [3]

Konačno, na dijagramu na slici 9 dan je usporedni prikaz vrijednosti deformacija dobivenih eksperimentalno i rezultata numeričke simulacije zavarivanja. Srednja vrijednost izmjerenih deformacija i rezultata simulacije razlikuje se za 0,61 mm, pa relativna pogreška rezultata simulacije iznosi 18,7 %.



Slika 9 Grafički prikaz usporedbe rezultata

#### 4. Zaključak

Trajne deformacije i zaostala naprezanja koja nastaju tijekom zavarivanja posljedica su koncentriranog unosa topline i neujednačene ekspanzije i kontrakcije dijelova zavarenog spoja. Kao

takve uzokuju niz poteškoća i ograničenja u samoj proizvodnji, ali i eksploataciji. Primjena numeričkih simulacija zavarivanja predstavlja jednu od mogućnosti optimiranja utjecajnih čimbenika kako bi se negativni učinci deformacija i zaostalih naprezanja sveli na minimum.

Eksperimentalni rad je pokazao da rezultati numeričkih simulacija mogu biti vrlo blizu eksperimentalnim vrijenostima. Oblik deformacije radnog komada u simulaciji u potpunosti odgovara stvarnoj eksperimentalnoj deformaciji što numeričke simulacije kvalificira kao primjenjive za realne slučajeve. Odstupanje rezultata simulacije od realnih rezultata posljedica je pojednostavljena koja su se koristila pri izradi modela. Tako se, na primjer, nisu uzele u obzir plinska zaštita, promjene u načinu prijenosa metala, tečenje rastaljenog metala i slično. Također, u eksperimentalnom zavarivanju parametri zavarivanja nisu konstantni nego variraju ovisno o zbivanjima u električnom luku.

Daljnja istraživanja usmjerit će se ka detaljnijem proučavanju uzroka nastanka razlika između simulacije i eksperimenta. Time će se otvoriti prostor za unaprjeđenje numeričkih simulacija te, posljedično, proširiti područje primjene.

## 5. Literatura

- [1] Slovaček, M.; Tejc, J.; Vaněk, M.: Using of Welding Virtual Numerical Simulation as the Technical Support for Industry, *Advanced Materials Research*, Vol. 1138, 49–55, 2016.
- [2] Slovaček, M.; Garašić, I.; Eržišnik, J: Uporaba virtualne numeričke simulacije zavarivanja kao tehničke podrške industriji, *Zavarivanje* 59 1/2, 23–26, 2016.
- [3] Zgurić M.: Analiza deformacija pri zavarivanju austenitnih Cr-Ni čelika primjenom programa Visual Weld [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2016.
- [4] ....., *Structural Frame. Realistic Industrial Engineering Examples*. ESI Group; 2012.
- [5] Peng, J.: Study on Distortion Control in Nozzle Welding of Stainless Steel Pressure Vessels [diplomski rad]. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2011.
- [6] Perić M. et all.: Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld. *Materials & Design*, Vol. 53, 1052-1063, 2014.
- [7] Bradáč, M.: Calibration of heat source model in numerical simulation of fusion welding, *Machines, Technologies, Materials*, Vol. 11, 9–12, 2013.
- [8] Schenk,T.; Richardson, I. M.; Kraska, M.; Ohnimus, S.: A study on the influence of clamping on welding distortion, *Computational Materials Science*, 45 (2009) 999–1005, 2009.