

## METODOLOGIJA NUMERIČKE SIMULACIJE ZAVARIVANJA KAO TEHNIČKE PODRŠKE INDUSTRIJI

### Ključne riječi:

- numerička simulacija
- zavarivanje
- metodologija
- validacija
- primjena

### Keywords:

- numerical simulation
- welding
- methodology
- validation
- application

### Schlüsselwörter:

- numerische Simulation
- Schweißen
- Methoden
- Validation
- Anwendung

### Adrese autora (Author's address):

*Ing. Marek Slovaček, Ph.D.*  
MECAS ESI S.r.o.  
Brojova 2113/16, 32600 Pízen,  
Češka Republika

*prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.*  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Ul. Ivana Lučića 1, 10000 Zagreb

*Jadranka Eržišnik, dipl. ing.*  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Katedra za zavarene konstrukcije  
Ul. Ivana Lučića 1, 10000 Zagreb

**Primljeno (Received):**  
2017-04-14

**Prihvaćeno (Accepted):**  
2017-04-30

Strukovni članak

U ovom članku opisana je i prikazana metodologija rješavanja numeričkih simulacija zavarivanja, kao i provedba validacijskih pokusa koji se koriste za provjeru rezultata simulacija te uklanjanje pogrešaka u odabranim ulaznim parametrima. Pokazani su primjeri eksperimenata koji ilustriraju podatke, kao na primjer temperaturni ciklusi, deformacije u izabranim točkama, procjene veličine zone taljenja i ZUT- a, tvrdoća itd. Rezultati dobiveni u realnim pokusima u različitim granama primjene, uporabljeni su za kalibraciju numeričke simulacije te su postignuti rezultati simulacija koje se dobro podudaraju sa stvarnim proizvodima. Uz takav pristup i definirane parametre, provjerena i potvrđena numerička simulacija u cijelosti je vjerodostojna te se postižu vrijedni podaci koji mogu unaprijediti proizvodnju, čak i za složene sklopove.

Professional paper

### METHODOLOGY OF NUMERICAL WELDING SIMULATION AS TECHNICAL SUPPORT TO INDUSTRY

This article describes and outlines the methodology of solving numerical welding simulations and the implementation of validation experiments used to check the results of simulations and removal of errors in selected input parameters. Examples of experiments are shown to illustrate data as for example temperature cycles, deformations in selected spots, estimation of the size of the melting zone and HAZ, hardness etc. The obtained results in real experiments in different application sectors have been applied for calibration of numerical simulation and the achieved simulation results match well with real products. With such an approach and defined parameters, the verified and confirmed numerical simulation is fully credible and enables to obtain valuable data that can improve manufacturing even of complex assemblies.

Fachlicher Beitrag

### METHODE DER NUMERISCHEN SIMULATION VON SWEISSARBEITEN ALS EINE UNTERSTÜTZUNG IN DER INDUSTRIE

In dieser Arbeit ist die Methode der numerischen Simulationen von Schweißarbeiten beschrieben zusammen mit den Validation-Prozess, der sich für die Resultatnachprüfung und für die Behebung von Fehlern in gewählten Parametern verwendet. Es sind Exemplare der Beispiele gezeigt die Daten wie z.B. den thermischen Zyklus, die Deformationen in gewählten Punkten, die Größenschätzung der Schmelz- und Wärmeeinflusszone, den Härtewert usw. anzeigen. Für die Kalibration der numerischen Simulation waren die Daten von realen Prozessen übernommen worden. Die Simulation stimmt mit den realen Prozessen überein. Mit so einen Zugang und definierten Parametern, die durchprüfte und bestätigte numerische Simulation ist zuverlässig und die Daten können sich in einer Produktion als Verbesserung, sogar für sehr komplexe Teile, benutzen.

## 1. NUMERIČKA SIMULACIJA ZAVARIVANJA – METODOLOGIJA

Numerička simulacija procesa zavarivanja može se provesti pomoću programskih rješenja pod skupnim nazivom „Welding simulation solution“ koji uključuje programe SYSWELD, PAMASSEMBLY i WELD PLANNER, ovisno o tipu problema i proizvoda. Shematski prikaz softvera „Welding Simulation Solution“ prikazan je *slikom 1.1.*

### 1.1. Metodologija rješavanja numeričkih simulacija zavarivanja

Metode rješavanja numeričkih simulacija procesa zavarivanja mogu se podijeliti u tri skupine:

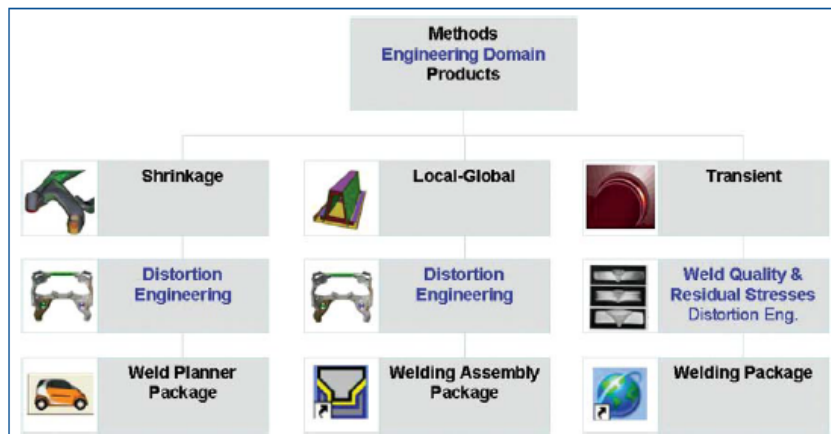
1. Metoda „korak po korak“ (TW), (program SYSWELD): model izvora topline giba se prema putanji zavarivanja. Numerički izračun obavlja se za svaki vremenski odsječak tijekom procesa zavarivanja. Stvarni parametri zavarivanja (struja, napon, brzina i učinkovitost) uključuju se kao parametri modela izvora topline, pri čemu je najduži vremenski interval ograničen volumenom taline. Ova metoda nije prikladna za velike i složene zavarene konstrukcije s velikim brojem zavarenih spojeva. S druge strane, rezultati su vrlo cjeloviti i mogu se prezentirati temperaturna polja, tvrdoća, mikrostruktura, zaostala naprezanja i deformacije. Metoda je prikladna za određivanje lokalnih utjecaja zavarenog spoja i optimizaciju tehnologije s obzirom na mikrostrukturu, tvrdoću i zaostala naprezanja u zavarenom spoju i zoni uza zavareni spoj.

2. Metoda makrodeponiranja (MBD), (program SYSWELD): izvor topline djeluje na jedan ili nekoliko elemenata u isto vrijeme. Stvarna putanja je podijeljena u nekoliko makrosekcija. Unos energije po jedinici dužine

zavarenog spoja prenosi se u strukturu kao i kod realnog procesa zavarivanja. Broj makrosekcija i vremenskih koraka zasnovan je na parametrima tehnologije zavarivanja. Metoda skraćuje vrijeme proračunavanja te povećava mogućnost izračuna za velike konstrukcije uz zadržavanje dobre pouzdanosti rezultata.

3. Lokalno-globalna metoda (LG), (programi SYSWELD i PAMASSEMBLY): standardne metode nisu prikladne jer zahtijevaju puno vremena i veliku memoriju računala. Ideja koja se nalazi iza lokalno-globalne metode je pretpostavka da je proces zavarivanja lokalna promjena naprezanja i istezanja, koji u konačnici izaziva globalno stanje deformacija. Lokalni utjecaj zavarivanja temelji se na proširenom proračunu lokalnog modela primjenom metoda „korak po korak“ i „makrodeponiranja“. Krutost lokalnog modela mora biti jednaka ili vrlo blizu stvarnosti. Rezultati se prenose s lokalnog modela na globalni i provodi se simulacija ravnotežne linearne elastičnosti radi potvrde globalne deformacije. Globalni model često predstavlja cijelu strukturu. Lokalno-globalna metoda omogućuje simulaciju vrlo velikih konstrukcija s velikim brojem zavarenih spojeva. Međutim, rezultati su ograničeni na deformacije te unutarnje sile i momente u uvjetima stezanja. Razine zaostalih naprezanja ili mikrostrukture određuju se lokalnim modeliranjem, tj. primjenom TW ili MBD metode, *slika 1.2.*

4. Metoda skupljanja (SM), (program WELD PLANNER): Weld Planner je novi program i može se upotrijebiti za vrlo brzu procjenu deformacija na konstrukcijama s velikim brojem zavarenih spojeva. Weld Planner izračunava deformacije na temelju proračuna stezanja, pri čemu su rješenja za temperaturu i strukturu materijala prikazana. Weld Planner je priručni analitički alat koji u nekoliko minuta procjenjuje deformacije izazvane zavarivanjem te omogućuje brz i učinkovit razvoj plana zava-



Slika 1.1. Program „Welding Simulation Solution“ grupe ESI  
Fig. 1.1. Welding Simulation Solution from ESI Group Company

rivanja, određivanje uvjeta stezanja i optimizaciju redoslijeda zavarivanja kojim se zadovoljavaju tolerancije. Uporaba Weld Plannera je jednostavna i intuitivna te omogućuje predviđanje deformacija izazvanih zavarivanjem u vrlo kratkom vremenu.

## 1.2. Analiza TW i MBD metoda

TW i MBD metode mogu se također podijeliti u tri koraka:

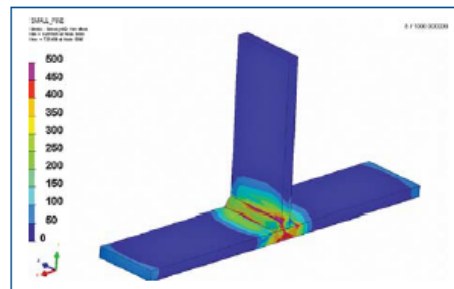
1. Tijekom prvog koraka unosi se cjeloviti dijagram anizotermičkih pretvorbi (CCT dijagram) pomoću posebnog pretprocesnog modula. Rezultati ove faze su koeficijenti koji opisuju kinetiku procesa pretvorbi ovisno o brzini hlađenja u pojedinim područjima zone utjecaja topline. Koeficijenti ovise o temperaturi i mikrostrukтури određenog materijala i koriste se kao neposredni ulazni podatak za drugi korak.

2. Druga faza je toplinsko-metalurško rješenje. Ovaj korak zahtijeva potpuno poznavanje toplinsko-mehaničkih svojstava materijala. Ovdje se primjenjuje klasična jednadžba provođenja topline proširena s latentnom toplinom tijekom pretvorbi faza i taljenja materijala. Rezultati prvoga koraka su nestacionarna toplinska polja, postotni udio pojedinih faza, veličina primarnih zrna austenita i tvrdoća. Temperaturna analiza je trenutni izračun u svakom vremenskom odsječku te se moraju simulirati svi prolazi zavora.

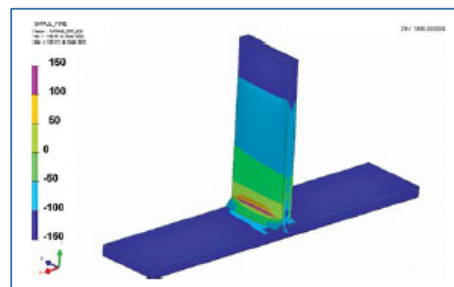
3. Rezultati drugoga koraka (uglavnom nestacionarna toplinska polja) primjenjuju se kao početna stanja u trećem koraku, analizi strukture. Potrebni su potpuni podaci o mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva (toplinsko istezanje, granica popuštanja, tvrdoća, Youngov modul, itd.) ovise o temperaturi i pojedinoj fazi. Rezultirajuća mehanička svojstva u zavarenom spoju i zoni utjecaja topline izračunavaju se na temelju raspodjele pojedine strukture materijala i njihovih mehaničkih svojstava. Rezultati drugog koraka su ukupna deformacija (koja se sastoji od elastičnog dijela, toplinskog dijela, konvencionalnog plastičnog dijela, viskoplastičnog dijela i plastičnosti pretvorbe), zaostala naprezanja i deformacija.

4. Sada je moguće nakon zavarivačkog rješenja primijeniti vanjska opterećenja, kao na primjer sile, momente, tlakove te temperaturna polja, razmatrajući sve rezultate kao nehomogena mehanička svojstva materijala, zaostala naprezanja i plastične deformacije. Također, postoji mogućnost primjene Dang Van kriterija, slika 1.3.

Model toplinskog izvora jedan je od najvažnijih ulaznih parametara [1]. Računalni model obuhvaća samo nestacionarna temperaturna polja. Toplinsko opterećenje predstavlja tok toplinske energije u materijalu tijekom procesa zavarivanja. Rezultati (deformacije, zaostala naprezanja) značajno ovise o pronalazanju odgovarajućeg modela toplinskog izvora i prave raspodjele temperature. SYSWELD program sadrži specijalan alat («prilagodba izvora topline») koji omogućuje pronalaznje prikladnih ulaznih računalnih podataka izvora topline kojim se simulira realno stanje. Postoje preddefinirani dvostruki elipsoidni i konični izvori topline kao i preddefinirana translacija, rotacija ili općenito gibanje izvora topline.



Slika 1.2. Zaostala naprezanja dobivena LG metodom  
Fig. 1.2. Residual stresses



Slika 1.3. Primjena Dang Vanova kriterija  
Fig. 1.3. Van Dang criteria

Vrlo važan čimbenik koji utječe na dobivanje ispravnih rezultata je kvaliteta ulaznih podataka o svojstvima materijala. Općenito, tijekom grijanja i hlađenja materijal mijenja strukturu faze, što znači da se i svojstva materijala značajno mijenjaju. Tijekom simulacije zavarivanja i toplinske obrade moraju se koristiti podaci o svojstvima materijala kako slijedi:

1. CCT dijagram
2. toplinska vodljivost, specifična toplota, gustoća
3. toplinsko istezanje, granica popuštanja, očvršćenje materijala (viskoplastični koeficijenti).

Vrlo je složeno pronaći sva prijeko potrebna svojstva materijala za numeričku simulaciju zavarivanja ili toplinske obrade u literaturi te je, za u ovom članku opisana programska rješenja, osigurana interna baza podataka za oko 50 različitih materijala, uključujući brojne vrste čelika, Al i Ti legura.

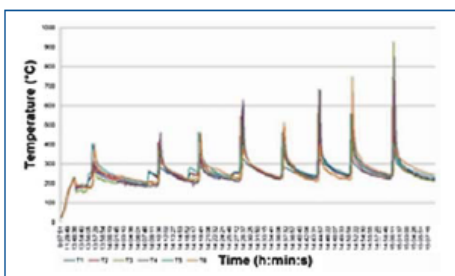
## 2. VALIDACIJA RJEŠENJA NUMERIČKIH SIMULACIJA

### 2.1. Eksperimentalni dio

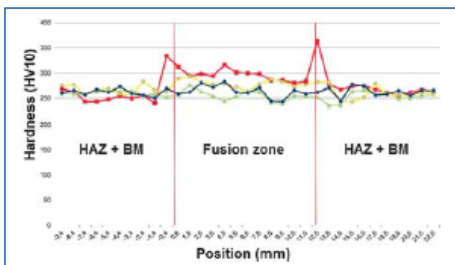
Kako bi se dobili realni izlazni parametri iz numeričke analize zavarivanja, potrebno je provesti validaciju



Slika 2.1.1. Pokus na čeliku S355  
Fig. 2.1.1. Experiment with steel S355



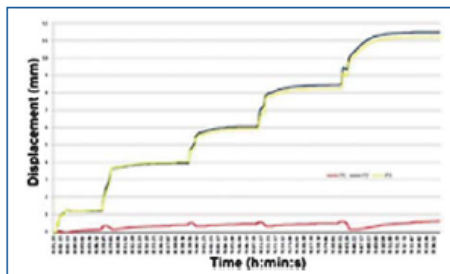
Slika 2.1.2. Izmjereni temperaturni ciklusi  
Fig. 2.1.2. Measured temperature cycles



Slika 2.1.3. Mjerenje tvrdoće  
Fig. 2.1.3. Hardness measurements

numeričkih postupaka i ulaznih parametara materijala. Validacijski proces proveden je u okviru nekoliko projekata /3-9/. Kao dio dovršenih projekata, provedene su sljedeće validacije:

- određivanje svojstava materijala
- opis izvora topline za svaku tehnologiju zavarivanja
- metodologija procjene faznih pretvorbi i tvrdoće



Slika 2.1.4. Mjerenje pomaka  
Fig. 2.1.4. Displacement measurements

- metodologija procjene deformacija zavarene konstrukcije
  - metodologija procjene zaostalih naprezanja.
- Validacija je provedena usporedbom izmjerenih i izračunanih parametara na eksperimentalnim uzorcima kao i na stvarnim zavarenim proizvodima. Za ove parametre provedena je usporedba:
- temperaturnih ciklusa
  - veličina taline i zone utjecaja topline
  - tvrdoća
  - lokalnog skupljanja
  - zaostalih naprezanja.

Zavarivački pokusi provedeni su na materijalima: 10GN2MFA, 15ChNMFA, X22CrMoV12-1, P92, S235, S355, 306L i 316L. Tijekom pokusa mjereni su temperaturni ciklusi i lokalne deformacije. Nadalje, nakon svakog završenog prolaza određivala se linija stajivanja i zona utjecaja topline te tvrdoća zavarjenog spoja.

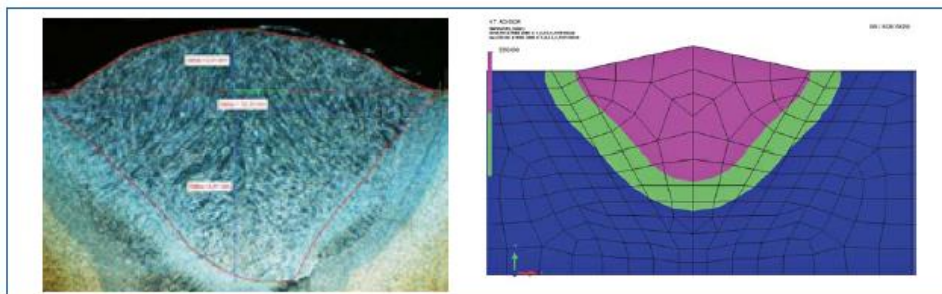
Za određivanje svojstava materijala korištena je GLEEBLE oprema. Na osnovi detaljne numeričke simulacije procesa zavarivanja, prema probranoj zavarivačkoj tehnologiji, odabrane su kritične pozicije i određeni su temperaturni ciklusi. To je fizički simulirano na opremi GLEEBLE radi određivanja svojstva materijala u zoni utjecaja topline.

Na slici 2.1.1. prikazana je ilustracija odabranog pokusa. Za svaki pokusni zavar načinjene su fotografije makrostrukture koje su upotrijebljene za umjeravanje izvora topline za simulaciju zavarivanja. Slikama 2.1.2. – 2.1.4. prikazane su izmjerene vrijednosti temperaturnih ciklusa, tvrdoće i globalnih deformacija.

## 2.2. Numerička simulacija – validacija

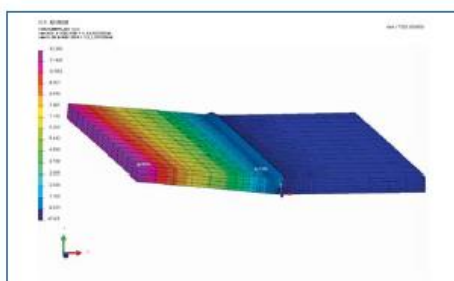
Kako je već spomenuto, podaci skupljeni iz pokusa mogu se koristiti za usporedbu s rezultatima simulacije i za umjeravanje parametara računalnih modela. Za sve opisane eksperimentalne pokuse načinjena je odgovarajuća numerička simulacija radi postizanja dobre korelacije između simulacije i pokusa.

Za ilustraciju, prikazani su neki primjeri simulacije zavarivanja limova od materijala S355. Slika 2.2.1. prikazuje definiciju modela unosa topline procesom, odnosno prikazuje usporedbu stvarne makrostrukture zava-

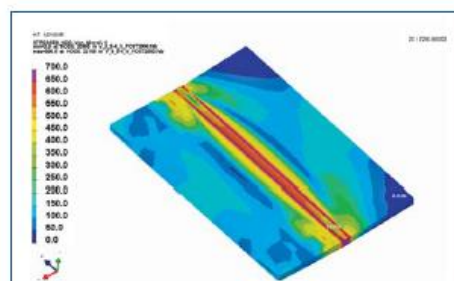


Slika 2.2.1. Makrostruktura zavara (pokrovni prolaz-lisce) na limu od materiala S355 i odgovarajući oblik rastaljene zone i ZUT-a dobivenog simulacijom

Fig. 2.2.1. Macrostructure of the weld (cover weld bead) plates made of S355 and the corresponding shape of the molten region and HAZ in the simulation



Slika 2.2.2. Deformacije  
Fig. 2.2.2. Deformation



Slika 2.2.3. Raspodjela zaostalih naprezanja  
Fig. 2.2.3. Distribution of residual stress

Tablica 2.2.1. Usporedba pomaka  
Table 2.2.1. Displacement comparison

Prolaz	Izračun [mm]		Mjerenja [mm]			
			Eksperiment br. 1		Eksperiment br. 2	
	Pozicija 1	Pozicija 2	Pozicija 1	Pozicija 2	Pozicija 1	Pozicija 2
1	0,49	0,40	1,01	1,07	1,19	1,23
2	2,97	2,91	3,62	3,63	3,86	3,90
3	4,21	3,86	5,70	5,45	6,02	5,85
4	6,38	5,92	7,45	6,81	8,38	8,23
5	9,16	8,71	9,12	8,02	11,35	11,10

ra i odgovarajućega temperaturnog polja dobivenog simulacijom. Nadalje, slika 2.2.2. prikazuje nastale deformacije ploče nakon zavarivanja. Slika 2.2.3. pokazuje zaostala naprezanja (ekvivalentno Van Mises naprezanje) u ploči nakon zavarivanja. Usporedba između izračunanih i izmjerenih vrijednosti pomaka prikazana je u tablici 2.2.1.

Pripremljeno je nekoliko ploča koje su naglo ohlađene u različitim medijima, a zatim je načinjena naknadna toplinska obrada. Zaostala naprezanja mjerena su u sredini ploča primjenjujući magnetsko-elastičnu metodu

temeljenu na «Berkhausenovu šumu» [10]. Procesi su također i numerički simulirani. Tablica 2.2.2. sadrži usporedbu između izračunane i izmjerene veličine zaostalih naprezanja.

### 3. NUMERIČKE SIMULACIJE ZAVARIVANJA

#### 3.1. Transportna sredstva

Glavni problem u proizvodnji transportnih sredstava su deformacije izazvane zavarivanjem i sklapanjem

Tablica 2.2.2. Usporedba naprezanja  
Table 2.2.2. Residual stress comparison

Materijal 10GN2MNFA	Mjerenje		Izračun	
	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]
Varijanta				
Zakaljen (voda)	-865	-773	-630	-736
Zakaljen (ulje)	-150	-140	-98	-114
Zakaljen (zrak)	25	94	42	53
Zakaljen (voda)+ PWHT 500°C/1 sat	-241	-198	-196	-183
Zakaljen (voda) + PWHT 500°C/2 sat	-180	13	-131	-21
Zakaljen (voda) + PWHT 500°C/4 sat	25	18	43	-3
Zakaljen (voda) + PWHT 500°C/8 sat	96	87	77	65
Zakaljen (voda) + PWHT 640°C/4 sat	8	15	18	-5
Zakaljen (voda) + PWHT 680°C/4 sat	15	-5	12	15
Materijal SA-338F22V	Mjerenje		Kalkulacija	
Varijanta	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]
Zakaljen (ulje)	-259	-250	-273	-232
Zakaljen (ulje)+ PWHT 610°C/2 sata	-92	-59	-71	-43
Zakaljen (ulje)+ PWHT 410°C/3 sata	-101	-97	-160	-134

nakon zavarivanja. Glavni zahtjevi naručitelja su procjena deformacija tijekom zavarivanja i najčešće optimizacija redoslijeda zavarivanja te stezanja. Novo područje numeričke simulacije zavarivanja u grani transporta je povezivanje simulacije zavarivanja i vršnih mjesta dinamičkog zamora u jednome modelu.

Kombinacija programa WELD PLANNER i SYSWELD (VISUAL WELD) koristi se za procjenu deformacija. Procjena vršnih vrijednosti zamora pomoću Dang Vanova kriterija provodi se pomoću programa SYSWELD.

### 3.2. Energetika i teške konstrukcije

Glavni ciljevi numeričkih simulacija zavarivanja su dobivanje potrebnih svojstava materijala i konstrukcija bez pukotina. Zahvaljujući činjenici da su sklopovi energetske opreme i teških konstrukcija vrlo kruti, ne postoji problem s deformacijama. To znači da su glavni izračunani rezultati struktura materijala, tvrdoća, veličina zrna, zaostala naprezanja i ukupna plastična deformacija, procjena granice popuštanja i vlačne čvrstoće te procjena pojave pukotina, a ponekad i deformacije. U mnogo slučajeva postoje i zahtjevi za kombinirane analize, obuhvaćajući zavarivanje, naknadnu toplinsku obradu i procjenu pogonskog stanja (umor, mehanika puzanja i loma) na jednome modelu.

U mnogo slučajeva obavljaju se zavarivanja na maketi ili pojednostavljenom i smanjenom modelu koji ne odgovara stvarnoj konstrukciji. Glavna korist od numeričke simulacije zavarivanja sklopova u energetske opremi i teškim konstrukcijama je dobivanje informacija o procesu zavarivanja na stvarnoj konstrukciji. Numerička simulacija zavarivanja za energetske opreme i teške konstrukcije obavlja se pomoću programa SYSWELD (VISUAL WELD). Procjena stanja komponente može se učiniti neposredno pomoću programa SYSWELD ili SYSTUS (puzanje, mehanika loma), a mogu se koristiti i posebni programi za zamor.

### 3.3. Numerička simulacija zavarivanja – transportna sredstva

Tipičan projekt u numeričkoj simulaciji zavarivanja je zavareni sklop okvira.

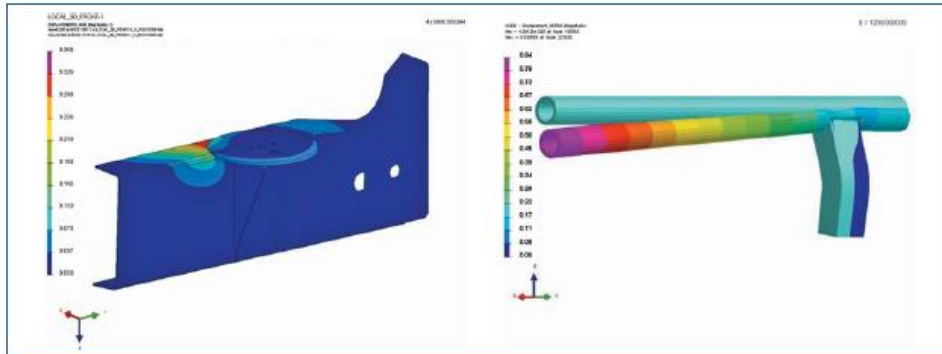
Zavarene konstrukcije sa stotinama zavarenih spojeva mogu se proračunati uz pomoć posebnog programa za procjenu deformacija WELD PLANNER. To je jedinstveni program i radi na temelju posebnih metoda lokalnog skupljanja. To znači da svaka tehnologija zavarivanja treba biti kalibrirana, a što je moguće učiniti na dva načina:

1. Numeričkom simulacijom: zadani zavareni spoj kao lokalni model izračunava se pomoću programa SYSWELD (VISUAL WELD) s potpunim fizičkim podacima. Isti lokalni model pripremljen je i u WELD PLANNER programu te izračunan. Izračunane deformacije prema rješenjima oba ova programa se uspoređuju. Glavni cilj je pronaći prijeko potrebne ulazne parametre procesa u WELD PLANNERU kako bi programom izračunane deformacije bile u suglasnosti s rješenjima SYSWELD (VISUAL WELD) programa. *Slika 3.3.1.* prikazuje izračunane deformacije na SYSWELD (VISUAL WELD) lokalnom modelu, a *slika 3.3.2.* pokazuje izračunane deformacije za WELD PLANNER lokalni model nakon kalibracije.

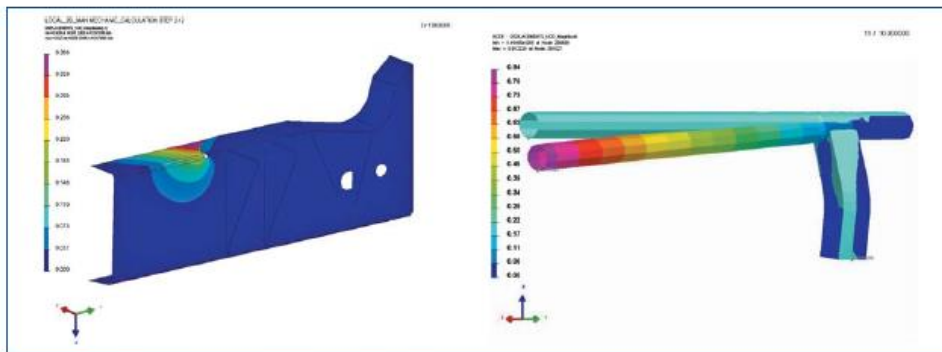
2. Eksperimentalno: načinjen je lokalni model i u stvarnom pokusu izmjerene su deformacije. Numerička simulacija lokalnog modela načinjena je u programu WELD PLANNERU, a prijeko potrebni ulazni parametri se kalibriraju.

### 3.4. Zavarivanje konstrukcije broda

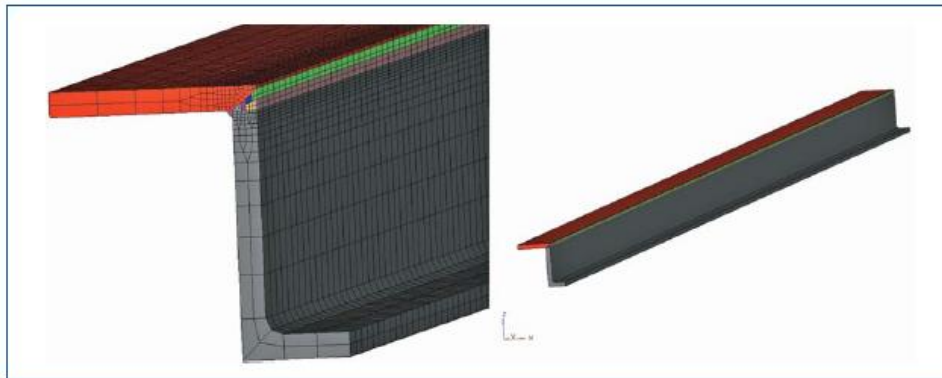
Tijekom zavarivanja konstrukcije broda za spašavanje dogodile su se neočekivane deformacije izazvane zavarivanjem. Glavni cilj numeričke simulacije bio je analizirati razloge tih nenadanih deformacija i pronaći novu tehnologiju. Greda je bila zavarena kao spoj raz-



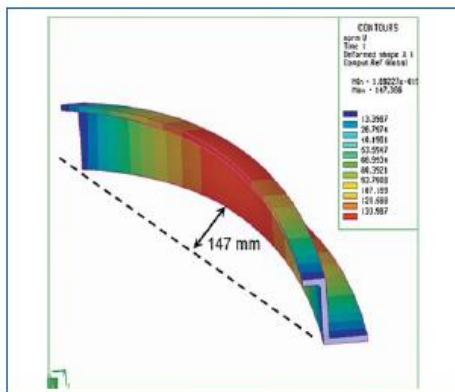
Slika 3.3.1. Predviđanje deformacija - SYSWELD (VISUAL WELD) lokalni modeli  
 Fig. 3.3.1. Prediction of deformation - SYSWELD (VISUAL WELD) local models



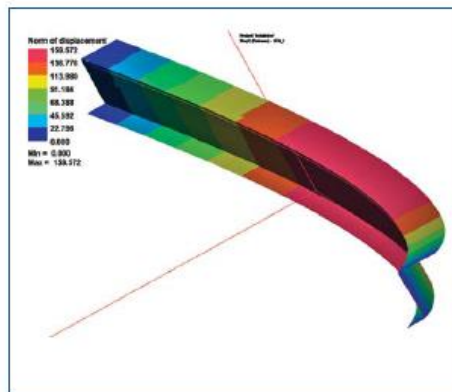
Slika 3.3.2. Predviđanje deformacija- WELD PLANNER lokalni modeli  
 Fig. 3.3.2. Prediction of deformation - WELD PLANNER local models



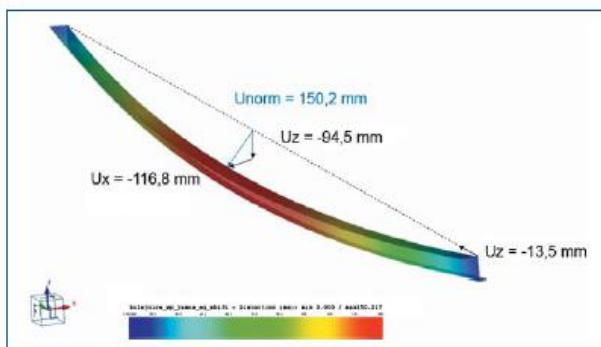
Slika 3.4.1. Računalni model - SYSWELD (VISUAL WELD) / Fig. 3.4.1. Computer models - SYSWELD (VISUAL WELD)



Slika 3.4.2. Deformacije - SYSWELD  
Fig. 3.4.2. Deformation - SYSWELD



Slika 3.4.3. Deformacije – PAM ASSEMBLY  
Fig. 3.4.3. Deformation – PAM ASSEMBLY



Slika 3.4.4. Deformacije – WELD PLANNER  
Fig. 3.4.4. Deformation – WELD PLANNER



Slika 3.4.5. Stvarne deformacije  
Fig. 3.4.5. Real deformation

Tablica 3.4.1. Usporedba deformacija za razne metode rješavanja

Table 3.4.1. Comparison of deformation for different methods

	PAM ASSEMBLY	WELD PLANNER	SYSWELD
Deformacija U [mm]	162	150,2	147
U x [mm]	128	116,8	118
U y [mm]	11,7	13,5	12
U z [mm]	98	94,5	89

norodnih materijala, S355J2G3 i dupleks čelika 1.4462, dužine 7210 mm i visine L-profila 165 mm. Spoj je zavarren u 7 prolaza.

Izvorna i optimizirana tehnološka varijanta su numerički simulirane. Računalni model za SYSWELD (VI-

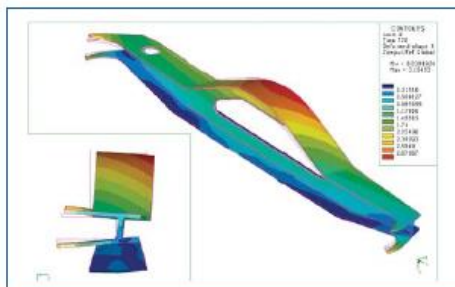
Tablica 3.4.2. Usporedba deformacija za izvornu i optimiranu tehnologiju zavarivanja

Table 3.4.2. Comparison of deformation for the original and optimized welding technology

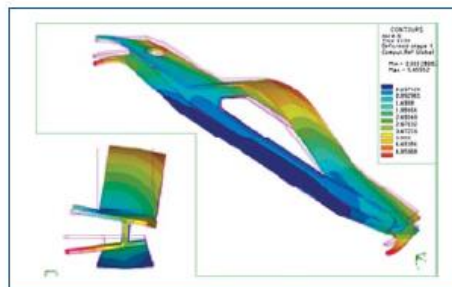
	Optimizirana tehnologija	Izvorna tehnologija
Deformacija u [mm]	106,1	150,2
U x [mm]	83,2	116,8
U y [mm]	9,3	13,5
U z [mm]	65,9	94,5

SUAL WELD) rješenje prikazan je slikom 3.4.1. Izračunani rezultati kao konačna deformacija prikazani su slikama 3.4.2. – 3.4.4. za različite metode rješavanja. Stvarna deformacija prikazana je slikom 3.4.5. Tablica 3.4.1. sadrži usporedbu deformacija za različite metode

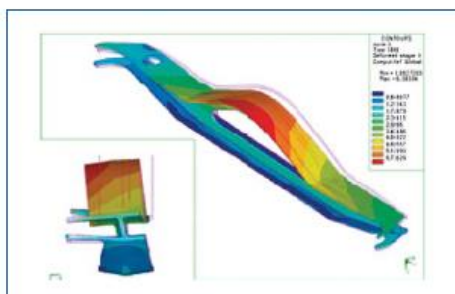




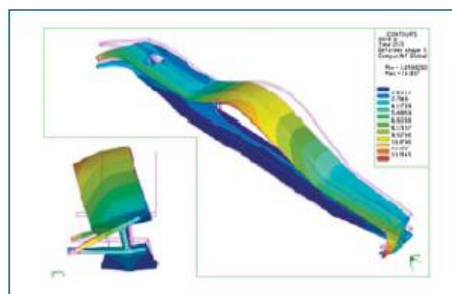
Slika 3.5.1. Deformacije nakon 1 prolaza  
Fig. 3.5.1. Deformation after 1 pass



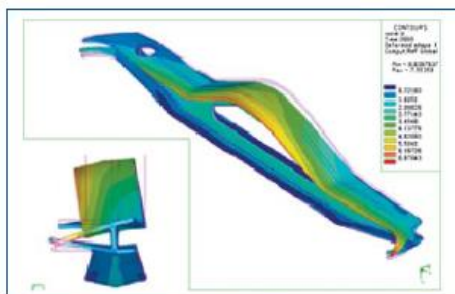
Slika 3.5.2. Deformacije nakon 2 prolaza  
Fig. 3.5.2. Deformation after 2 pass



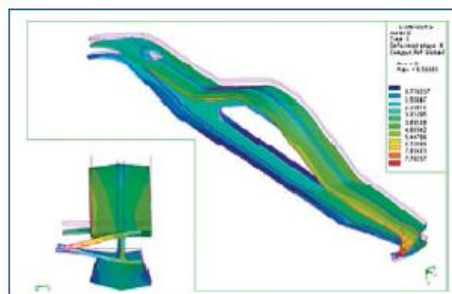
Slika 3.5.3. Deformacije nakon 3 prolaza  
Fig. 3.5.3. Deformation after 3 pass



Slika 3.5.4. Deformacije nakon 4 prolaza  
Fig. 3.5.4. Deformation after 4 pass



Slika 3.5.5. Deformacije nakon 5 prolaza  
Fig. 3.5.5. Deformation after 5 pass



Slika 3.5.6. Deformacije nakon 6 prolaza  
Fig. 3.5.6. Deformation after 6 pass

rješavanja, a *tablica 3.4.2.* izračunane deformacije za izvornu i optimiziranu tehnologiju zavarivanja.

### 3.5. Zavarivanje postolja vagona

Tijekom zavarivanja postolja vagona pojavile su se deformacije veće od dopuštenih tolerancija, a nije zadovoljena ni ravnost površine. Nakon zavarivanja bilo je

potrebno primijeniti operaciju ravnanja. Nosač je bio izrađen od materijala S355J2G3 zavarivanjem 4 spoja s po 6 prolaza. Do rješenja se došlo primjenom SYSWELD (VISUAL WELD) metodom „korak po korak“ (TW).

Deformacije nakon svakog prolaza prikazane su *slikama 3.5.1 – 3.5.6.*, dok su u *tablici 3.5.1.* prikazane vrijednosti deformacija.

Raspodjela bainitne i martenzitne strukture prikazana je slikama 3.5.7. – 3.5.8. Uglavnom postoji bainitna struktura uz mali udio martenzita na područjima počet-

ka i završetka zavarivanja te u zoni utjecaja topline prvoga i drugog prolaza.

Izračunana ekvivalentna zaostala naprezanja prikazana su slikom 3.5.9. Najveća veličina zaostalih naprezanja nalazi se u martenzitnom području.

Tablica 3.5.1. Deformacija  $U_{norm\ max}$  nakon svakog prolaza

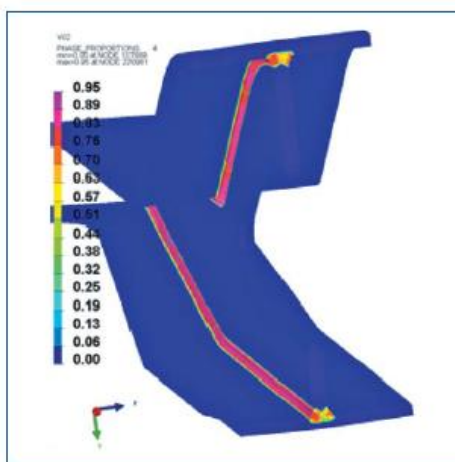
Table 3.5.1. Deformation  $U_{norm\ max}$  after each pass

	$U_{norm\ max}$ [mm]
Poslije 1 prolaza	3,16
Poslije 2 prolaza	5,46
Poslije 3 prolaza	6,3
Poslije 4 prolaza	14,94
Poslije 5 prolaza	7,55
Poslije 6 prolaza	8,56

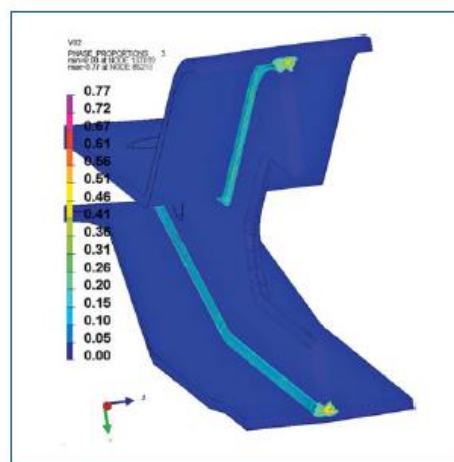
### 3.6. Zavarivanje stražnjega poprečnog elementa ovjesa

Najprije je načinjena numerička simulacija procesa zavarivanja. Numerički su simulirana 84 zavarena spoja (ukupne dužine 5 m), izvedena MAG postupkom. Računalni model prikazan je slikom 3.6.1.

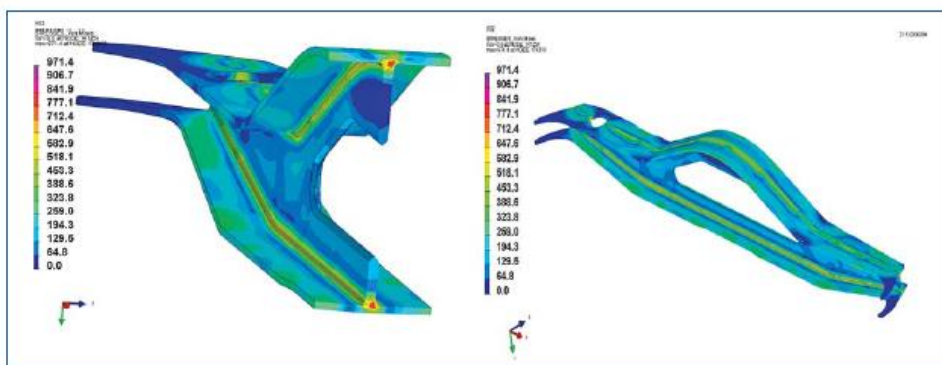
Nakon numeričke simulacije zavarivanja učinjena je numerička simulacija dinamičkog umora primjenom Dang Vanova kriterija. Izračunana zaostala naprezanja,



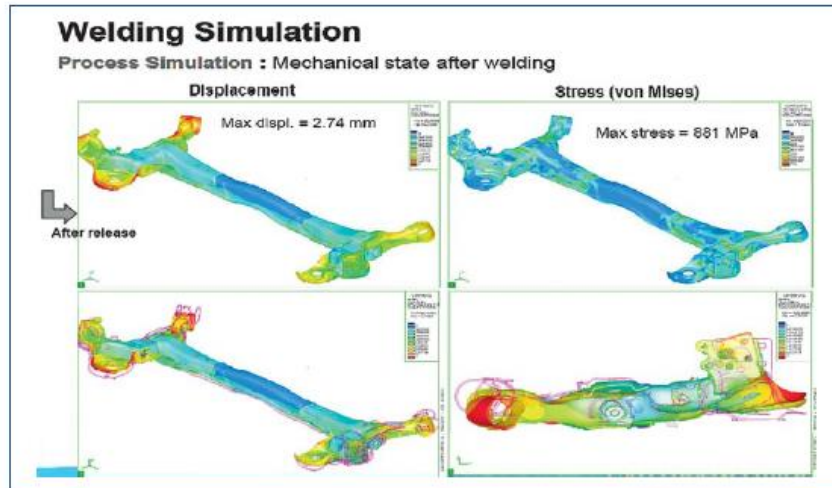
Slika 3.5.7. Raspodjela bainita  
Fig. 3.5.7. Distribution of bainite



Slika 3.5.8. Raspodjela martenzita  
Fig. 3.5.8. Distribution of martensite



Slika 3.5.9. Ekvivalentna zaostala naprezanja / Fig. 3.5.9. Equivalent residual stress



Slika 3.6.1. Izračunani rezultati – deformacije i zaostala naprezanja  
Fig. 3.6.1. Calculated results – deformation and residual stress

plastična deformacija, različite strukture materijala i svojstva materijala nakon zavarivanja razmatrani su u analizi dinamičkog umora.

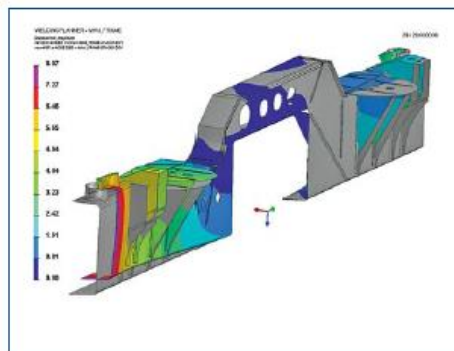
### 3.7. Zavarivanje sklopa autobusa

Tijekom zavarivanja sklopa za autobus pojavile su se deformacije veće od dopuštenih tolerancija. Nakon zavarivanja bilo je potrebno provesti postupak ravnjanja. Zavareni sklop bio je načinjen od materijala S355MC i sadržavao je oko 70 spojeva. Rješenje je pronađeno primjenom kombinirane metode skupljanja

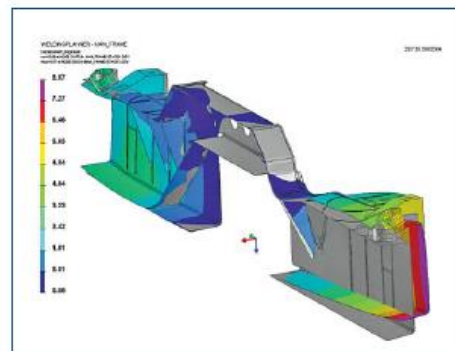
WELD PLANNER – globalnim pristupom i klasičnom trenutačnom metodom analize SYSWELD (VISUAL WELD) za lokalnu validaciju modela. Numeričko rješenje bilo je vrlo složeno zbog veličine zavarene konstrukcije i broja zavarenih spojeva te zbog nekoliko koraka validacije.

Deformacije nakon zavarivanja prikazane su slikama 3.7.1. – 3.7.2.

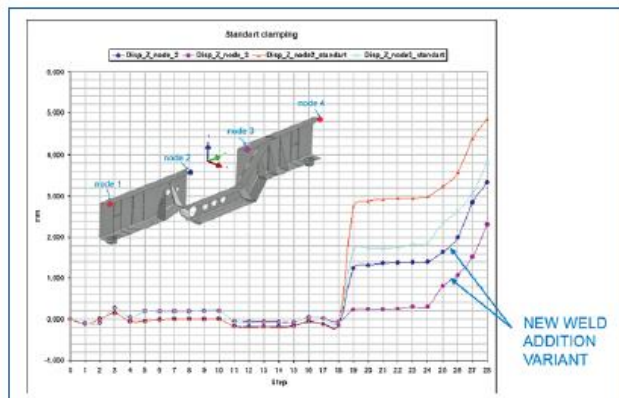
Također, načinjena su nova tehnologija i varijante oblikovanja u cilju općenitog smanjenja deformacija. Usporedba između deformacija za dvije razrađene varijante prikazane su slikama 3.7.3. –3.7.4. Očigledno je



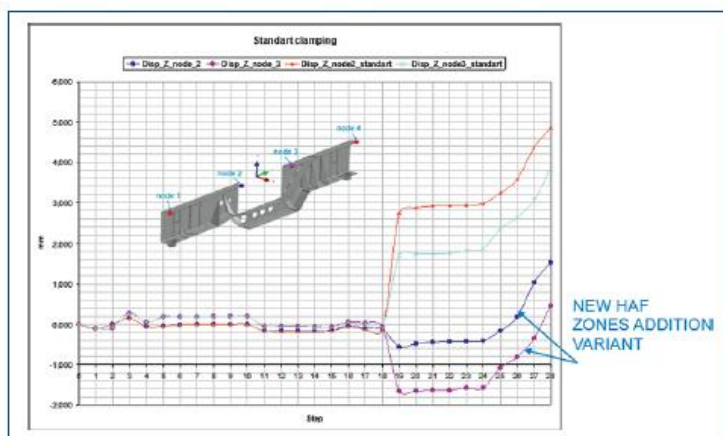
Slika 3.7.1. Izračunani rezultati – deformacije  
Fig 3.7.1. Calculated results – deformation



Slika 3.7.2. Izračunani rezultati – deformacije  
Fig 3.7.2. Calculated results - deformation



Slika 3.7.3. Usporedba deformacija između standardne izvorne varijante i modifikacije  
Fig. 3.7.3. Deformation comparison between standard variant and modification



Slika 3.7.4. Usporedba deformacija između standardne izvorne varijante i modifikacije  
Fig 3.7.4. Deformation comparison between standard variant and modification

da se novom tehnološkom inačicom značajno smanjuju konačne deformacije.

### 3.8. Zavarivanje automobilskega kotača

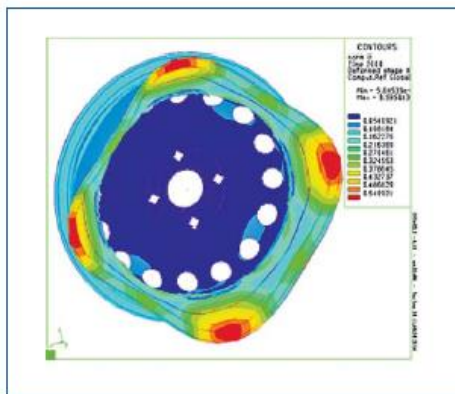
Najvažniji cilj numeričke simulacije je optimirati tehnologiju zavarivanja kako bi se postiglo minimalno odstupanje od kružnosti. Automobilski kotači se izrađuju zavarivanjem od materijala S355J2G3. Rješenje je provedeno SYSWELD (VISUAL WELD) metodom „korak po korak“. Učinjeno je najmanje 5 različitih inačica s različitim dužinom zavarenih spojeva i broja zavara. Temeljem numeričke simulacije odabrana je najbolja tehnologija koja se zatim provjerila u stvarnim uvjetima.

Izračunane deformacije za dvije različite varijante prikazane su slikama 3.8.1. – 3.8.3.

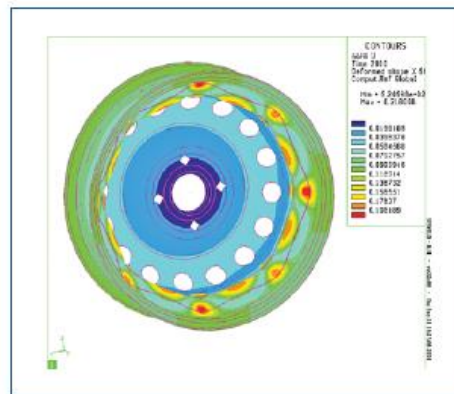
Osim toga izračunati su struktura materijala (raspodjela bainita prikazana je slikom 3.8.3.) te raspodjela zaostalih naprezanja, slika 3.8.4.

## 4. ZAKLJUČAK

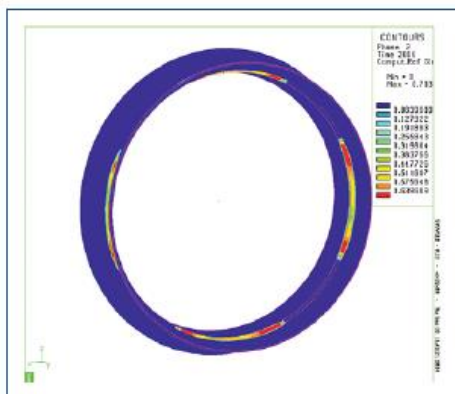
Numerička simulacija procesa zavarivanja predstavlja suvremeno i učinkovito sredstvo za upravljanje i optimizaciju proizvodnih procesa u industrijskoj praksi. To je moćan alat i tijekom oblikovanja proizvoda. On jednostavno reagira na promjene u tehnološkom procesu, smanjujući broj pokusa te se smanjuju troškovi, a naravno povećava kvaliteta, pouzdanost i konkurentnost proizvedenoga zavarenog sklopa. Treba zamijetiti da je za kvalitetnu numeričku analizu prijeko potrebno skupiti



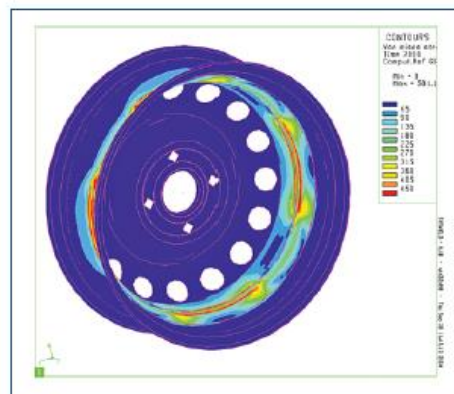
Slika 3.8.1. Procjena deformacija, varijanta 1  
Fig. 3.8.1. Distribution of deformation, variant 1



Slika 3.8.2. Procjena deformacija, varijanta 5  
Fig. 3.8.2. Distribution of deformation, variant 5



Slika 3.8.3. Raspodjela bainita, varijanta 1  
Fig. 3.8.3. Distribution of bainite, variant 1



Slika 3.8.4. Raspodjela zaostalih napreznja, varijanta 1  
Fig. 3.8.4. Distribution of residual stress, variant 1

razmjerno velik broj ulaznih parametara (svojstva materijala, opis graničnih uvjeta itd.) koje nije jednostavno naći i provjeriti.

Očigledno, lakše je, brže a također i jeftinije numerički simulirati predloženu tehnologiju zavarivanja, uključujući i varijante nego provesti stvarni pokus ili načiniti konačni proizvod bez ispitivanja. To naročito vrijedi za velike zavarene konstrukcije.

S obzirom na metodologiju za usvajanje validacijskih pokusa, pokazani su primjeri eksperimenata koji ilustriraju podatke, kao na primjer temperaturne cikluse ili deformacije u izabranim točkama, procjenu veličine zone taljenja i ZUT-a temeljene na makrostrukтури zavarivanja, tvrdoću itd. Nakon toga, podaci dobiveni pokusima koriste se za kalibraciju numeričke simulacije radi uklanjanja pogrešaka u izabranim ulaznim parametrima. Cilj

je postići takve rezultate simulacije koje se dobro podudaraju sa stvarnim pokusima. Tako je moguće dobiti vrlo kvalitetne podatke za ulazne parametre simulacije (model ponašanja materijala, opis prijenosa topline, opis unosa topline za određeni postupak zavarivanja itd.). Uz takve parametre, provjerena i potvrđena numerička simulacija u cijelosti je predvidiva te se mogu dobiti vrlo vrijedni podaci, čak i za složene sklopove.

#### LITERATURA

- [1] Slováček, M.: Numerical simulation of welding, calculation and evaluation of distortions and residual stresses, Ph.D. thesis, Brno Military Academy, Military Academy in Brno, September 2005
- [2] Slováček, M. Diviš, V., Ochodek, V.: Numerical simulation of the welding process, distortion and residual stresses prediction, heat source model determination, 58th Annual Assembly Meeting, Prague, July 2005, Document X - 1586-2005

- [3] Moravec, J.: Experimental welding mock-up, material S355, technical report, TU Liberec, 2013
- [4] Moravec, J.: Experimental welding mock-up, material 10GN2MFA, technical report, TU Liberec, TUL\_Z\_13\_VS\_10GN2MFA, 2013
- [5] Moravec, J.: Experimental welding mock-up, material P92, technical report, TU Liberec, TUL\_Z\_13\_VS\_P92, 2013
- [6] Moravec, J.: Experimental welding mock-up, material X22CrMo V12-1, technical report, TU Liberec, TUL\_Z\_13\_VS\_X22CrMo V12-1, 2013
- [7] Tejc, J., Kovařík, J., Vaněk, M.: Welding numerical simulation of welded plate, material S355, technical report, MECAS ESI M\_Z\_13\_019\_r01, December 2013

- [8] Slovaček, M., Kik, T.: Welding numerical simulation of welded plate, material P92, technical report, MECAS ESI M\_Z\_13\_020\_r01, December 2013
- [9] Slovaček, M., Kik, T.: Welding numerical simulation of welded plate, material 10GN2MFA, technical report, MECAS ESI M\_Z\_13\_021\_r01, December 2013
- [10] Ochođek, V.: Residual stress measurements by magnetoelastic method, material 10GN2MFA a SA-336F22V, OH120-345-306, December 2013
- [11] Slovaček, M., Garašić, I., Eržišnik, J.: Uporaba virtualne numeričke simulacije zavarivanja kao tehničke podrške u industriji, Zavarivanje, 1/2, 2016.

#### 9. MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE - SBZ 2017.

### STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2017.

Slavonski Brod, 25. - 27. 10. 2017.

**TEME:** Nove tehnologije i materijali; Postupci zavarivanja; Robotizacija i automatizacija; Posude pod tlakom; Zavarivanje srodne tehnike; Izrada zavarenih konstrukcija; Kontrola kvalitete zavarenih proizvoda; Pouzdanost i sigurnost; zavarenih proizvoda i konstrukcija; Zavarljivost materijala; Dodatni materijali za zavarivanje; Oprema za zavarivanje i srodne postupke; Kadrovi i obrazovanje u zavarivanju; Metalurgija; Ekologija i zaštita na radu; Ekonomski aspekti u zavarivanju. Savjetovanje će se, kao i dosadašnjih godina, održati u kazališno-koncertnoj dvorani Ivane Brić Mažuranić i Đuri Đakoviću u Slavonskom Brodu, 25. – 27. listopada 2017.

1. srpnja: krajnji rok za slanje radova. 15. listopada: krajnji rok za prijavu sudionika.

Najnovije informacije o skupu možete pronaći na: <http://www.sfsb.hr/dtzb/>

Smještaj: Turistička zajednica Slavonski Brod: <http://www.tzgsb.hr>

**KONTAKT:** DTZ Slavonski Brod; StrojarSKI fakultet u Slavonskom Brodu;  
Trg I. B. Mažuranić 2, 35 000 SLAVONSKI BROD; E-mail: [dtzsb@sfsb.hr](mailto:dtzsb@sfsb.hr)  
Miroslav Duspara; Tel.: 035 493 412, Fax. 035 446 446; E-mail: [miroslav.duspara@sfsb.hr](mailto:miroslav.duspara@sfsb.hr)  
Božo Despotović; Tel./Fax: 035 218 330; E-mail: [despotovic.bozo@gmail.com](mailto:despotovic.bozo@gmail.com)

Production, design, maintenance and servicing of equipment and devices in the process, food, pharmaceutical and chemical industries.

**TOMO VARGA**

TOMO VARGA d.o.o., Croatia, Zagreb, Cmojezerska 20, separated section Ravnice 4, 49 210 Zabok  
Mob. +385 91 3451-303, Fax. +38549249-100, E-mail: [mano.bozic@tomovarga.hr](mailto:mano.bozic@tomovarga.hr), [tomovarga@tomovarga.hr](mailto:tomovarga@tomovarga.hr)