

**UNIVERZITET CRNE GORE
MAŠINSKI FAKULTET**

Mr Nikola Šibalić, dipl. inž. maš.

**MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA
SPAJANJA DEFORMISANJEM - FSW**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Podgorica, 2010.



152291102
Мак 11/1864

33468

*Roditeljima Vojislavu i Danici, sestri Nevenki,
supruzi Mirjani, sinu Vojislavu i kćerkì Nikolina
s ljubavlju*

Nikola V. Šibalić

DOKTORSKA DISERTACIJA

UNIVERZITET CRNE GORE
MAŠINSKI FAKULTET U PODGORICI

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANTU

Ime i prezime:	Nikola Šibalić
IP	
Datum i mjesto rođenja:	28.12.1975. godine u Žabljaku
DMR	
Adresa autora:	ul. Vuka Karadžića br. 20, 84220 Žabljak
AA	
Naziv završenih poslijediplomskih studija i godina završetka:	Magistarske studije, smjer Proizvodno mašinstvo, usmjerenje Proizvodne tehnologije, 2007.
PS	

INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naslov teze:	Modeliranje i simulacija procesa spajanja deformisanjem - FSW
NT	
Fakultet na kojem je disertacija odbranjena:	Mašinski fakultet u Podgorici
FO	
Tip zapisa:	Tekstualni štampani materijal
TZ	
Zemlja publikovanja:	Crna Gora
ZP	
Godina izdavanja:	2010.
GI	
Fizički opis rada:	(Broj poglavija/strana/literatura/slika/tabela/priloga) (9/279/204/236/23/7)
FO	
Naučna oblast:	Mašinstvo
NO	
Ključne riječi:	Spajanje deformisanjem, FSW, modeliranje, numerička simulacija, optimizacija, čelo alata, trn alata, brzina zavarivanja, sila zavarivanja, temperatura, zatezna čvrstoća, udarna žilavost, mikrostruktura zavarenog spoja
KR	
Mjesto čuvanja:	Biblioteka Univerziteta Crne Gore Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica
MČ	
Napomena:	Nema
NP	

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

UDK. OCJENA I ODBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

Datum prijave doktorske teze:
DP

23.05.2007.

Datum sastanice Senata Univerziteta
na kojoj je obravljena teza:
DSS

05.07.2007.

Komisija za ocjenu dodjeljivosti teze i
kandidata
KP

Prof. dr Vuko Domazetović, predsjednik.
Prof. dr Miroslav Plančak, član.
Prof. dr Milan Vukčević, mentor.

Mentor:
MK

Prof. dr Milan Vukčević, dipl.inž.maš.

Komisija za ocjenu doktorske disertacije:
KOD

Prof. dr Vuko Domazetović, predsjednik
Prof. dr Miroslav Plančak, član
Prof. dr Vanja Asanović, član
Doc. dr Darko Bajić, član
Prof. dr Milan Vukčević, mentor.

Komisija za odbranu doktorske disertacije:
KO

Prof. dr Vuko Domazetović, predsjednik
Prof. dr Miroslav Plančak, član
Prof. dr Vanja Asanović, član
Doc. dr Darko Bajić, član
Prof. dr Milan Vukčević, mentor.

Lektor:
LE

Datum odbrane:
DO

Datum promocije:
DP

Izvod:
IZ

U radu su izvršena obimna eksperimentalna istraživanja, modeliranja i numeričke simulacije, u cilju određivanja termo-mehaničkih i mikrostrukturalnih parametara procesa spajanja materijala deformisanjem - FSW. Date su teorijske postavke o procesu spajanja materijala deformisanjem, odnosno zavarivanja postupkom FSW i osnove korišćenih metoda. Izvršeno je spajanje lima legure aluminijuma 6082-T6 (AlSi1MgMn), debljine 7.8 mm. U radu su prikazana eksperimentalna istraživanja izvršena na osnovu usvojenog višefaktornog ortogonalnog plana, sa variranjem faktora na dva nivoa i ponavljanjem u centralnoj tački plana. Veličine koje su varirane u eksperimentu su: brzina zavarivanja, ugaona brzina okretanja alata, ugao nagiba trna alata, prečnik trna alata i prečnik bila alata. Na osnovu usvojenih geometrijskih parametara urađena je familija alata. Eksperiment je realizovan u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Podgorici, na slobodnoj temperaturi u uslovima koji su slični proizvodnim. Eksperimentalna istraživanja su podijeljena u četiri faze. U prvoj fazi sprovedeno je spajanje (zavarivanje) radnih komada i izvršeno mjerjenje komponenti sile koje se javljaju tokom odvijanja procesa FSW (vertikalne sile - P_z , uzdužne sile - P_x i bočne sile F_y). Druga faza se odnosi na mjerjenje temperature zavarenog materijala u šest usvojenih pozicija korišćenjem termo-parova. U trećoj fazi se izvrše mehanička ispitivanja zavarenog materijala. Određuje se zatezna čvrstoća u dva normata zraka R_m i R_{m0} , kao i udarna žilavost ρ . Četvrta faza se odnosi na metalografsku ispitivanja, odnosno određivanje mikrostrukture zavarenog spoja. Za sprovođenje

ovih faza u radu je korišćena precizna analogno-digitalna mjerna oprema povezana u informacione mjerne sisteme.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti vertikalne sile F_z za sve tačke eksperimentalnog plana, izvršena je optimizacija procesa. Za sve istraživane parametre sprovedena je regresiona analiza i dobijeni modeli procesa FSW. Za numeričku simulaciju koristi se softverski paket DEFORM-3D, koji je namijenjen za analizu složenih trodimenzionalnih nelinearnih problema. Numerička simulacija je urađena za sve tačke eksperimentalnog plana i izvodi se u dvije etape: kada se alat ukopava u materijal i kada se vrši zavarivanje materijala.

Analizom i poređenjem istraživanih parametara, dobijenih eksperimentalnim putem, modeliranjem i numeričkom simulacijom, izведен je veliki broj relevantnih zaključaka. Detaljnim poznavanjem parametara koji karakterišu proces FSW, moguće je odgovoriti na sve strože kriterijume u pogledu kvaliteta zavarenog spoja, postojanosti alata, smanjenja utroška energije i smanjenja zagađenja životne sredine.

**UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN PODGORICA**

KEY-WORDS DOCUMENTATION

INFORMATION ABOUT AUTHOR

First name and last name:
FN, LN **Nikola Šibalić**

Date and place of birth:
DoB, PoB **28.12.1975. in Žabljak**

Author's address:
A'sA **Vuka Karadžića 20, 84220 Žabljak**

Name of postgraduate studies and year
of graduation:
NoPS, YoG **Postgraduate studies, Department of Mechanical
Production and Technology, 2007.**

INFORMATION ABOUT THESIS

Title:
T **Modeling and Simulation of the Process of
Joining by Deformation - FSW**

Faculty where thesis
will be defended:
FA **Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica**

Type of record:
TR **Textual printed article**

Country of publication:
CP **Montenegro**

Year of publication:
YoP **2010.**

Physical description:
PD **(Chapters/pages/references/pictures/tables/addit.list)
(9/279/204/236/23/7)**

Scientific field:
SF **Mechanical Engineering**

Key words:
KW **Joining by deformation, FSW, modeling,
numerical simulation, optimization, shoulder,
pin, welding speed, welding force,
temperature, tensile strength, fracture toughness,
microstructure of welded joints**

Holding data:
HD **Library of the University of Montenegro
Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica**

Note:
N **None**

KEY-WORDS DOCUMENTATION

UC, EVALUATION AND PRESENTATION OF THESIS

Date of registration:	23.05.2007.
DoR	
Thesis accepted on:	05.07.2007.
TA	
Thesis Acceptation Board: TAB	Professor Vuko Domazetović, Ph.D., Chairman Professor Miroslav Plančak, Ph.D., Member Professor Milan Vukčević, Ph.D., Mentor
Mentor: M	Professor Milan Vukčević, Ph.D.
Thesis Evaluation Board: TEB	Professor Vuko Domazetović, Ph.D., Chairman Professor Miroslav Plančak, Ph.D., Member Professor Vanja Asanović, Ph.D., Member Assistant professor Darko Bajić, Ph.D., Member Professor Milan Vukčević, Ph.D., Mentor
Thesis Defense Board: TDB	Professor Vuko Domazetović, Ph.D., Chairman Professor Miroslav Plančak, Ph.D., Member Professor Vanja Asanović, Ph.D., Member Assistant professor Darko Bajić, Ph.D., Member Professor Milan Vukčević, Ph.D., Mentor
Lector: LE	
Defended on:	
DO	
Promoted on:	
PO	
Abstract: AB	In the thesis the extensive experimental researches are conducted, modeling and numerical simulation, in order to determine the thermo-mechanical and microstructural parameters of the process of joining by deformation - FSW. The theoretical assumptions about the process of joining materials by deformation, or friction stir welding - FSW and basis of the methods used are provided in the thesis. The joining of the sheet aluminum alloy 6082-T6 (AlSi1MgMn), thickness 7.8 mm, is performed. The thesis presents experimental research conducted on the basis of the adopted multifactorial orthogonal plan, with varying factors on two levels and repetition in the central point of the plan. Values varied in the experiment are: welding speed, rotation speed of the pin, slope angle of the pin, pin diameter and shoulder diameter. On the basis of the adopted geometrical parameters, the family of tools was made. The experiment was carried out in the laboratory of Mechanical Engineering Faculty in Podgorica, at the room temperature under conditions similar to production. Experimental studies are divided into four phases. The first phase includes joining (welding) of workpieces and measurement of the forces that appear during the process of FSW (down force - F_z , traversing force - F_x and side force - F_y). The second phase relates to the measurement of temperature of welded material in the six position adopted by using thermo-couples. In the third stage the mechanical testing of welded materials is performed. The tensile strength is determined in two normal directions R_m , and R_m , and fracture toughness of ρ . The fourth phase is related to the metallographic microstructure examination and determination of welded joints. In order to

perform these phases, the precise analog-digital measuring equipment connected with information measurement systems is used.

Based on the measured values of down force F_z for all points of the experimental plan, the optimization of the process is performed. For all researched parameters, the regression analysis is conducted and resulting models of FSW process. For numerical simulation software package DEFORM-3D was used, which is used for the analysis of complex three-dimensional nonlinear problems. Numerical simulation was performed for all points of the experimental plan and carried out in two stages: when the tool plunges into the material, and when welding of materials is performed.

By analyzing and comparing the research parameters, obtained by experimental, modeling and numerical simulation, a large number of relevant conclusions was obtained. With the detailed knowledge of the parameters that characterize the FSW process, it is possible to respond to any more stringent criteria in terms of quality of welded joint, persistence of the tools, reducing of the energy consumption and reducing of the environmental pollution.



SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCESA FSW	3
3. OBRAZLOŽENJE TEME.....	9
3.1. Naučni cilj.....	10
3.2. Naučni doprinos	11
3.3. Globalni plan istraživanja	11
3.4. Detaljni plan istraživanja.....	11
4. TEORIJSKE POSTAVKE	13
4.1. Osnovi postupka FSW.....	13
4.1.1. Princip rada	13
4.1.2. Faze procesa FSW.....	16
4.1.3. Metal šava	17
4.1.4. Mikrostrukturne karakteristike	18
4.1.5. Prednosti i nedostaci postupka FSW	19
4.1.6. Materijali koji se mogu zavarivati postupkom FSW	22
4.1.7. Vrste zavarenih spojeva	22
4.1.8. Tehnološki parametri procesa FSW	23
4.1.8.1. Broj obrtaja i translatorna brzina alata	23
4.1.8.2. Sile zavarivanja	24
4.1.8.3. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW.....	25
4.1.8.4. Ugao nagiba i dubina prodiranja čela alata	25
4.1.9. Tečenje materijala	26
4.1.10. Generisanje topote	28
4.1.11. Metalurške transformacije	29
4.1.12. Mehaničke osobine zavarenog spoja	30
4.1.12.1. Osobine zatezanja.....	30
4.1.12.2. Žilavost loma	31
4.1.12.3. Zamor materijala	31
4.1.12.4. Zaostali naponi.....	32
4.1.13. Primjena postupka FSW.....	33
4.1.14. Mašine za zavarivanje	34
4.2. Osnove metoda korišćenih kod procesa FSW	36
4.2.1. Metoda optimizacije.....	36
4.2.1.1. Boks-Vilsonov gradijentni metod	37
4.2.2. Metoda konačnih elemenata - MKE	39
4.2.2.1. Teorijske osnove MKE u obradi deformisanjem	40

SADRŽAJ

4.3. Numerička simulacija.....	44
4.3.1. DEFORM-3D softverski paket	45
4.4. Pro/ENGINEER	48
 5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA.....	51
5.1. Eksperimentalna oprema.....	51
5.2. Izrada pomoćnog pribora.....	53
5.3. Mjerna oprema	57
5.3.1. Oprema za mjerjenje sile.....	57
5.3.1.1. Otpornički davači za mjerjenje komponente vertikalne sile	57
5.3.1.2. Otpornički davači za mjerjenje komponente uzdužne sile	59
5.3.1.3. Otpornički davači za mjerjenje komponente bočne sile.....	60
5.3.2. Oprema za mjerjenje temperature.....	62
5.3.2.1. Termo-parovi tipa k.....	63
5.3.2.2. Uređaj za tačkasto zavarivanje termo-parova	64
 6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	67
6.1. Postavke istraživanja.....	67
6.2. Definicija eksperimenta	67
6.3. Plan eksperimenta.....	68
6.3.1. Matrica plana eksperimenta	69
6.3.2. Ulazni faktori.....	69
6.4. Alati za zavarivanje postupkom FSW	71
6.5. Eksperimentalni materijal i njegova priprema	73
6.5.1. Priprema radnih komada za mjerjenje temperature.....	75
6.6. Izvođenje eksperimenta.....	75
6.6.1. Mjerjenje sile kod procesa FSW	77
6.6.1. Mjerjenje temperature kod procesa FSW	79
6.7. Mehanička ispitivanja zavarenog spoja	83
6.7.1. Određivanje zatezne čvrstoće	85
6.7.2. Određivanje udarne žilavosti	90
6.8. Metalografska ispitivanja poprečnog presjeka zavarenog spoja.....	93
6.8.1. Mehanička priprema uzorka	93
6.8.1.1. Uzimanje uzorka iz zavarenog spoja dobijenog postupkom FSW	93
6.8.1.2. Brušenje uzorka.....	93
6.8.1.3. Metalografsko poliranje	94
6.8.2. Hemijska obrada uzorka.....	95
6.8.3. Snimanje strukture zavarenog spoja	95
 7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW	101
7.1. Određivanje kinematskih i geometrijskih faktora metodom optimizacije	101
7.1.1. Model optimizacije	101
7.1.2. Ciklusi optimizacije	102
7.2. Modeliranje izlaznih parametara procesa FSW, regresiona analiza	105
7.3. Numerička simulacija.....	112

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW	127
8.1. Vizuelna analiza	127
8.2. Analiza sila zavarivanja	129
8.2.1. Analiza sila dobijenih eksperimentalnim putem	129
8.2.2. Analiza sila dobijenih numeričkom simulacijom	133
8.2.3. Poređenje sila	135
8.3. Analiza temperature	140
8.3.1. Analiza temperature dobijene eksperimentalnim putem	140
8.3.2. Analiza temperature dobijene numeričkom simulacijom	145
8.3.3. Poređenje temperature	148
8.4. Analiza rezultata dobijenih mehaničkih ispitivanja	151
8.4.1. Analiza zatezne čvrstoće	151
8.4.2. Analiza udarne žilavosti	156
8.5. Metalografska analiza	157
8.6. Analiza oblika trna i čela alata	169
9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	171
LITERATURA	177
SPISAK SLIKA	189
SPISAK TABELA	197
SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA	199
PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI	203
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI	213
P.2.1. Dijagrami sila zavarivanja	213
P.2.2. Dijagrami temperature	219
PRILOG 3. MEHANIČKA ISPITIVANJA	225
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA	231
PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI	263
P.5.1. Optimizacija procesa FSW	263
P.5.2. Regresiona analiza	267
P.5.3. Modeliranje istraživanih parametara procesa FSW	268
P.5.3.1. Eksperimentalni plan - pet faktora	270
PRILOG 6. PRESJEČNI DIJAGRAMI TEMPERATURE	271
PRILOG 7. KARAKTERISTIČNE FOTOGRAFIJE	277



1. UVOD

Poslednjih godina u industrijskoj proizvodnji velika pažnja se posvećuje pronalaženju novih „čistih“ tehnologija (postupaka) spajanja istorodnih i raznorodnih materijala i usavršavanju postojećih. Jedan od relativno novih postupaka spajanja materijala deformisanjem je proces FSW - *Friction Stir Welding*, koji se sve više primjenjuje u zavarivanju aluminijuma i njegovih legura kao i aluminijuma sa raznim čellicima. Postupak FSW može da obezbijedi bolje mehaničke osobine spoja u odnosu na konvencionalne postupke. Za ostvarivanje kvalitetnog spoja potrebna je manja količina energije u odnosu na postupke sa topljenjem materijala, tehnologija je relativno čista i ne zagađuje životnu sredinu.

Kako je proces FSW složen i još nedovoljno istražen, neophodno je korišćenje međusobno povezanih pristupa: teorijskog, eksperimentalnog i numeričkog.

Eksperimentalna istraživanja procesa FSW izvršena su u laboratorijskim uslovima, što je iziskivalo projektovanje složenog mjerno - informacionog sistema. Preliminarnim istraživanjima su utvrđeni relevantni ulazni parametri: geometrijski parametri alata i režim zavarivanja (kinematski parametri). Izlazne veličine istraživane u radu su: sila, temperatura, mehaničke karakteristike zavarenog spoja (zatezna čvrstoća i udarna žilavost) i mikrostrukturalna analiza zavarenog spoja. Dobijeni eksperimentalni rezultati su modelirani u domenu varijacije ulaznih parametara.

Razvoj savremenih računarskih sistema, otvorio je široke mogućnosti za ispitivanja i simulaciju procesa FSW. Od svih numeričkih metoda najširu primjenu ima metod konačnih elemenata - MKE, kao osnova komercijalnih softvera namijenjenih krajnjim korisnicima za numeričku simulaciju.

Dakle, u radu je izvršeno istraživanje parametara procesa spajanja materijala deformisanjem, odnosno zavarivanje postupkom FSW, eksperimentalnim metodama, modeliranjem rezultata i numeričkim simulacijama. Urađena je optimizacija procesa, a zatim analiza i poređenje rezultata.

Rad je koncipiran tako da su u drugom poglavlju data dosadašnja istraživanja i pregled literature, gdje su dati kratki pregledi ključnih radova iz oblasti *Friction Stir Welding* - FSW.

U trećem poglavlju je izloženo obrazloženje teme, dat je naučni cilj i naučni doprinos, kao i postavke hipoteza. Dat je globalni i detaljni plan istraživanja sa vrlo preciznim i egzaktnim smjernicama, kako u pogledu samih eksperimentalnih istraživanja, tako i u pogledu pripreme materijala, alata, mjerne i pomoćne opreme i numeričkih simulacija.

U četvrtom poglavlju date su teorijske postavke procesa FSW, osnove postupka, kao i postupci i metode koje se koriste u istraživanjima. Kod osnova postupka FSW, dat je princip rada, mikrostrukturne karakteristike, prednosti i nedostaci, materijali koji se mogu zavarivati ovim postupkom, vrste zavarenih spojeva, tehnološki parametri

1. UVOD

procesa, tečenje materijala, način generisanja toplote, mehaničke osobine kao i primjena postupka FSW.

Peto poglavlje se odnosi na prikaz korišćene eksperimentalne, pomoćne i mjerne opreme. Pomoćni pribori su urađeni tako da su prilagođeni karakteristikama maštine koja se koristi u eksperimentu i dimenzijama radnog stola. Napravljena je platforma (pomoćni pribor), na kojoj se vrši postavljanje i stezanje radnih komada, kao i specijalni nosači, pomoću kojih se može izvršiti mjerjenje sila u tri normalna pravca (uzdužni - x , bočni - y i vertikalni - z). U ovom poglavlju opisana je postojeća mjerna oprema, kao i mjerna oprema koja je posebno izrađena za potrebe eksperimenta. Za mjerjenje sila koriste se senzori (mjerne trake), koje su preko šestokanalnog pojačivača (mjernog mosta), prenosne jedinice, AD/DA kartice i računara, povezane u informacioni mjerni sistem. Kod mjerjenja temperature informacioni mjerni sistem se sastoji od senzora (termo-parova), mjernog modula i računara. Za tačkasto zavarivanje termo-parova korišćen je specijalno izrađeni uređaj.

U šestom poglavlju su izvršena eksperimentalna istraživanja. Definisan je plan eksperimenta, kao i usvojeni ulazni faktori. Istraživanja se izvode u četiri faze. U prvoj fazi sprovedeno je spajanje (zavarivanje) radnih komada i izvršeno mjerjenje komponenti sila (F_x , F_y , i F_z). Druga faza se odnosi na mjerjenje temperature zavarivanog materijala u šest usvojenih pozicija. U trećoj fazi se izvode mehanička ispitivanja zavarenog materijala. Određuje se zatezna čvrstoća i udarna žilavost. Četvrta faza se odnosi na metalografska ispitivanja, odnosno određivanje mikrostrukture zavarenog spoja.

Sedmo poglavlje se odnosi na određivanje kinematskih faktora (brzine zavarivanja i ugaone brzine okretanja alata), kao i geometrijskih faktora alata (ugla nagiba trna alata, prečnika trna alata i prečnika čela alata), metodom optimizacije u odnosu na vertikalnu силу zavarivanja F_z . Na osnovu standardne procedure matematičkog modeliranja izvršena je regresiona analiza svih istraživanih parametara koji karakterišu proces FSW, gdje su dobijene funkcije odziva odnosno modeli. Na osnovu ulaznih parametara eksperimentalnih istraživanja, generisana je baza podataka i izvršena numerička simulacija, korišćenjem licenciranog softverskog paketa DEFORM-3D.

U osmom poglavlju urađena je analiza i poređenje eksperimentalno, modelski i numerički dobijenih vrijednosti komponenti sila i temperature. Izvršena je vizuelna analiza zavarenog spoja kao i analiza zatezne čvrstoće i udarne žilavosti. Takođe, u ovom poglavlju je izvršena i makro i mikro strukturalna analiza. Na kraju ovog poglavlja naznačeni su i budući pravci daljih istraživanja u pogledu konstrukcije alata.

U devetom poglavlju su istaknuti bitni zaključci, koji su izvedeni iz obrade i analize rezultata i smjernice za buduća istraživanja procesa FSW.

Na kraju rada je dat pregled korišćenih literaturnih izvora, kao i prilozi sa detaljima izvršenih istraživanja.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCESA FSW

Istraživanja procesa FSW, bazirana su prvenstveno na rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Simulacija procesa pomoću računara je neizbjegjan pratičac razvoja svake tehnologije pa i zavarivanja trenjem. Rezultati simulacije ovih procesa se do sada odnose na generisanje i distribuciju toplote, termo-mehaničko modeliranje, analizu sile i tečenje materijala. Bilo je i pokušaja modeliranja primjenom trodimenzionalnih visko-plastičnih modela. Numerička simulacija kod procesa FSW je temeljena na metodi konačnih elemenata.

U poslednje vrijeme istraživanjima iz oblasti zavarivanja postupkom FSW, bavi se sve veći broj istraživača u svijetu. Kod procesa FSW od velikog je značaja poznavanje temperature koja je glavni parametar koji određuje uspješnost postupka. Drugi bitni parametar je poznavanje sile zavarivanja tokom procesa FSW. Kada se proces završi vrše se ispitivanja mikrostrukture, mehanike loma, mehanička ispitivanja itd. Zato je ova problematika izazov za veliki broj istraživača različitih profila.

Veći broj radova istražuje mikrostrukturu promjenu i tok materijala prilikom procesa zavarivanja [49, 56, 69, 81, 88, 95, 97, 99, 108, 111, 118, 128, 129, 134, 140, 156, 157, 199]. Problematikom generisanja i distribucije toplote se bave radovi [5, 11, 13, 16, 53, 91, 106, 141, 144, 204], dok jedan broj radova istražuje uticaj na parametre zavarivanja, tok materijala odnosno stvaranje međuveze između zone uticaja toplote - HAZ i zone termo-mehaničkog uticaja - TMAZ [64, 95].

Neka istraživanja daju rezultate sa aspekta transfera toplote za vrijeme procesa zavarivanja trenjem [17, 142, 172]. Trodimenzionalni model transfera toplote je prezentovan u radu [142] koji kombinuje Ojlerove karakteristike i metod konačnih razlika kod modeliranja kretanja alata. Termo-mehanički model uključuje i mehaničko miješanje materijala od čela alata koje je takođe prezentovano u radu [17].

U radu [118] je izvršeno zavarivanje postupkom FSW različitih legura: legure aluminijuma 6061 i legure aluminijuma 2024 debljine lima 12.7 mm. Dati su rezultati plastične deformacije, tečenja i mehaničkog miješanja materijala, a prikazane su i različite asimetrične karakteristike sa obje strane istih i različitih legura. Mikrostruktura kod zavarivanja različitih legura Al 6061 i Al 2024 je izrazito drugačija u odnosu na zavarivanja samo legure Al 6061. Takođe se razlika javlja i u „grumen“ zoni.

Rad [141] se bavi teoretskim i eksperimentalnim prenošenjem toplote kod procesa FSW. Toplota se unosi od čela alata i od trna alata. Kod čela alata toplota se generiše trenjem površine čela alata i materijala. Kod trna alata toplota se generiše iz tri dijela: toplota koja nastaje smicanjem materijala koji se deformiše, toplota koja se stvara trenjem od površine zavojnice trna i toplota koja se stvara trenjem na vertikalnoj površini trna. Predstavljen je trodimenzionalni model transfera toplote. Metod konačnih elemenata je korišćen za modeliranje. Uzima se da je izvor toplote, nastao od čela alata konstantan. U radu su dati detalji modela transfera toplote kod FSW, a zatim je prezentiran i analiziran transfer toplote u toku procesa FSW kod legure aluminijuma.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCESA FSW

Eksplisitna diferencijalna šema je korišćena u numeričkim varijacijama, a FORTRAN program je korišćen za rješavanje jednačina.

Rad [16] se bavi termo-mehaničkim modeliranjem i analizom sile kod procesa FSW korišćenjem metode konačnih elemenata. Kod zavarivanja lima koji je fiksiran u procesu rotacionog longitudinalnog pomjeranja alata upotrebom nelinearne sile koja je razložena u tri pravca i kombinovana sa temperaturnim udarom, prouzrokuje se deformacija i stvara čvrsti zavareni spoj. Prirodna je pretpostavka da je kontrola sile kod tehnologije FSW važna sa ekonomskog stanovišta, produktivnosti i kvaliteta zavarivanja. Da bi projektovali metodologiju FSW, potrebno je poznavati nelinearnu statičku silu, brzinu rotiranja alata, longitudinalnu brzinu, dubinu prodora alata u materijal i termo-mehaničke osobine materijala. U ovom radu je prezentiran trodimenzionalni model koji je temeljen na metodi konačnih elemenata za distribuciju temperature i napona, uvezši u obzir mehaničke efekte alata. Prema tome ovdje je predstavljena studija longitudinalne (uzdužne), bočne i vertikalne sile u procesu zavarivanja legure aluminijuma 6061. Proces zavarivanja je simuliran korišćenjem komercijalnog paketa konačnih elemenata ANSYS.

U radu [26] korišćenjem metoda optičke mikroskopije, SEM i EDS analize izvršena su ispitivanja strukture, kao i analiza faznog i hemijskog sastava, kod rotacionog zavarivanja trenjem, zavarenih spojeva brzoreznog čelika Č.1730.

Određivanje žilavosti loma zavarivanja postupkom FSW legure aluminijuma EN A W-2014 (AlCuSiMg) vrši se u radu [92] i upoređuje sa konvencionalnim zavarivanjem - MIG postupkom. Za ocjenu žilavosti loma zavarenih spojeva korišćeno je ispitivanje tvrdoće i udarne energije. Nizak unos topline i dodatnog materijala rezultirao je u boljoj žilavosti loma materijala zavarenog postupkom FSW.

U radu [169] je prikazana usvojena terminologija procesa FSW. Naziv zavarivanje trenjem je usvojeno od „*The Welding Institute*“ i pronalazača ovog postupka. Istaknut je originalni pristup, koji precizira i opisuje suštinu procesa. Ovo ime je rasprostranjeno i gotovo ga je nemoguće zamijeniti. Ponekad se koristi specijani termin hibridno zavarivanje trenjem (HFSW).

U radu [15] je izvršena talasna (*wavelet*) analiza, mjerjenje akustične emisije i kontrola postupka FSW, legure Al 6061. Praćenje se vrši korišćenjem signala akustičke emisije - AE. Talasnom transformacijom AE signala, određuju se dijagrami frekventnog spektra u funkciji vremena. Ovako dobijeni dijagrami su vrlo korisni u raspoznavanju sa AE kroz dvodimenzionalnu konturu i profil sinergije usmјeren u tri pravca. Različiti tipovi defekata daju različit izgled AE u specifičnom frekventnom opsegu i različitu varijaciju sinergije za vrijeme zavarivanja.

U radu [17] je predstavljen trodimenzionalni model temeljen na analizi konačnim elementima topotnih i termo-mehaničkih procesa zavarivanja legure aluminijuma 6061-T6. Za modeliranje procesa korišćen je ANSYS softverski paket baziran na metodi konačnih elemenata, gdje je pored ostalog analizirana distribucija napona kod procesa zavarivanja. Trodimenzionalni termo-mehanički model uključuje i mehaničko dejstvo čela alata i termo-mehanički efekat zavarenog materijala razvijen za FSW od Al legura, da bi izgradili kvalitetan sistem za razumijevanje termo-mehaničkih procesa kod FSW. U radu se pokazuje da je najveći gradijent temperature u longitudinalnom (uzdužnom) i

bočnom pravcu od strane čela alata i pokazuje nam da je zaostali longitudinalni napon veći od bočnog zaostalog napona na površini ravni zavarivanja.

U radu [18] je opisano spajanje legure aluminijuma 6061 i AISI 1018 čelika kombinovanjem efekta fuzije i zavarivanja u čvrstom stanju 6 mm debelog lima. Ovdje je korišćen optički i elektronski mikroskop kao i X - zraci. Pronađeno je da se ova dva metala $Al_{13}Fe_4$ i Al_5Fe_2 nalaze u zoni zavarivanja. Alat se značajno potrošio za vrijeme zavarivanja i polomio posle 100 mm kretanja i rotacione brzine 917 o/min. Habanje alata i prelom su detektovani pomoću senzora AE. Dobijena je heterogena mikrostruktura varu. Pokazano je da se FSW može koristiti za spajanje legure aluminijuma 6061 i mekog čelika kombinovanjem efekta fuzije i zavarivanja u čvrstom stanju.

U radu [142] je prezentiran trodimenzionalni model transfera toplote kod FSW, u pokretnom koordinatnom sistemu. Ovim modelom je razmatran unos toplote od čela i trna alata.

Rad [82] prezentuje mogućnosti spajanja legure aluminijuma 6061 i AISI 1018 čelika. Dobijeni var je dobrog kvaliteta.

Rad [172] prezentira pokušaj modeliranja procesa FSW, koristeći trodimenzionalan visko-plastični model. Polje ovog rada je fokusirano na spajanje debelog aluminijumskog lima. Numerički model predstavlja uspješno dizajniranje alata zavarivanja što će proizvesti željeni termalni gradijent i sprječiti lomljenje alata. Simulacija zavarivanja procesa FSW metodom konačnih elemenata je urađena korišćenjem komercionalnog softvera FIDAP.

Postupak FSW nerđajućeg čelika je modeliran korišćenjem Ojerove formulacije. Uzet je u obzir spregnut visko-plastični tok i toplotni transver trna alata. Modelske jednačine su riješene korišćenjem metode konačnih elemenata u određivanju brzine polja i temperaturne distribucije [12].

Istraživan je proces FSW kod spajanja limova magnezijuma. Naglašeni interesi u razvoju automobilske industrije za povećanjem sjaja automobila, rezultirali su uvođenjem novih alternativnih konstrukcionih materijala kao što je legura magnezijuma. Istraživanje se odnosi na spajanje dvije vrste legura magnezijuma AZ91 i AZ60, različitim debljinama (od 1.5 mm do 5 mm), korišćenjem različitih metoda. Zavarivanje električnim otporom (*Resistant Spot Welding - RSE*), zavarivanje otporom toplotne provodljivosti (*Conductive Heat Resistance Seam Welding - CHRSEW*) i zavarivanje trenjem (*Friction Stir Welding - FSW*). Generalno, spajanje se može izvršiti korišćenjem jedne od ovih metoda, ali FSW pokazuje najbolje rezultate, tj. spajanje sa uspješnošću 100 % [60].

Rad [34] govori o primjeni tehnologije zavarivanja postupka FSW u NASA centru.

U radu [31] je izvršena dvodimenzionalna simulacija procesa FSW, korišćenjem konačnih elemenata i različitih opcija programa ABAQUS. Simulacija procesa FSW je fokusirana na obalast brzine i karakteristika toka tečenja materijala.

Rad [3] prezentira deceniju razvoja FSW i njegove primjene u industriji.

Najveći broj radova iz FSW se odnosi na spajanje limova legura aluminijuma različitih debljin [10, 15, 17, 20, 23, 102, 118, 126, 172, 201], dok se mali broj radova odnosi na proces zavarivanja raznorodnih materijala kao što je aluminijum i čelik [18, 82] ili legura magnezijuma [60].

Kada je u pitanju modeliranje procesa FSW ulažu se veliki napor sa ciljem razumijevanja fizičkih osnova procesa kroz proučavanje eksperimentalnih istraživanja.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCESA FSW

Najčešće korišćeni programi (softveri) u pokušaju modeliranja i numeričke simulacije u procesima zavarivanja trenjem FSW su: ANSYS, ABAQUS [198, 100] i FIDAP [172]. Njihova primjena je analizirana u radovima [16, 17, 31, 172]. MATLAB 5.1 [53], MATLAB 5.2 [51], STIR3D [6], NISA i FASTFLO [20].

DEFORM softverski paket se koristi za simulaciju procesa FSW u radovima [58, 173].

Postavljen je značajan broj analitičkih i numeričkih modela za postupak FSW i urađen je veliki broj eksperimentalnih radova. Prvi modeli su uglavnom bili analitički, zasnovani na Rozentalovim jednačinama prenosa toplote. Specifičnosti procesa FSW postepeno su uvedene u ove modele. Neke od ovih analitičkih formulacija bile su osnova za razvoj metalurškog modela. Kasnije, kada su razvijeni numerički alati za modeliranje FSW, omogućeni su značajni pomaci u razumijevanju plastičnog tečenja materijala oko alata i uticaja na neke od najznačajnijih parametara FSW. Mnogi od ovih ciljeva, potvrđeni su eksperimentom [175].

Analitički modeli FSW odnose se na termičku istoriju [48, 106, 155], formiranje mikrostrukture [134] i raspodjelu pritiska [196]. Rješenja koja je predložio Rozental, korišćena su kod modeliranja FSW. Analitičko-termički modeli koriste Rozentalove jednačine [106, 134, 155]. Rad [106] razmatra tačkasti izvor toplote u alatu, dok rad [155] razmatra linijski izvor toplote u alatu, a radovi [59, 134] u držaču alata. Ovi modeli su korišćeni za određivanje vršne temperature [155] u odnosu na eutektičku tačku materijala [133, 134] ili parametre procesa [59] prema temperaturnim poljima oko vrha alata [106], odnosno mehaničke osobine materijala ili materijala držača [107]. Podaci iz eksperimentalnih istraživanja [96] korišćeni su za potvrđivanje [133] ili podešavanje modela kod pristupa preko inverznog problema [48]. Pri tome je korišćena ograničena grupa materijala, kao što su AA6061-T6 [59, 96], AA2014-T6 [133, 134], AA7108.50-T79 [107] i AA6056-T4 [175].

Numeričko modeliranje FSW uzima u obzir termičku istoriju [14, 20, 38, 39, 53, 58, 91, 172, 200], mikrostrukturu [51] i tečenje materijala [4, 38, 39, 91, 115, 172]. Korišćeni su različiti pristupi numeričkog modeliranja, kao što su konačni elementi [14, 20, 38, 39, 172, 198, 200] ili konačne razlike [4, 9, 51, 53]. Ovi modeli su primjenjeni kod određivanja značaja efekata prenosa [53], predviđanja lokalnih deformacija [51], simuliranja pojave rastvaranja taloga po granicama zrna [9], određivanja zavisnosti viskoziteta materijala od temperature i parametara procesa [115], izračunavanja pritiska i brzine [20] i povezanosti parametara procesa sa temperaturom i silama na alatu [172]. Podaci iz eksperimentalnih postupaka [8, 21, 54] korišćeni su za potvrdu modela. Određena grupa materijala je uzeta u razmatranje, kao što su AA6082.05-T6 i AA7108.50-T79 [51], AA6061-T6 [115] i AA2195-T8 [198], Ti-6Al-4V i AA1100 [58], AA5454-O [91] i AA7050-T7451 [172, 175].

Kada je u pitanju modeliranje tečenja materijala, postoji veliki broj radova posebno u oblasti temperaturne istorije, raspodjele naprezanja i karakterizacije mikrostrukture. Međutim, još uvjek ne postoji zadovoljavajući nivo znanja o tečenju materijala. Samo će kompletna karakterizacija tečenja materijala pri procesu FSW omogućiti realno i pouzdano modeliranje procesa. Stoga je izazov kreirati eksperimentalnu proceduru kojom bi se u potpunosti vizuelno predstavilo kompleksno tečenje materijala tokom FSW procesa. Nekoliko istraživačkih grupa već je usmjerilo svoja istraživanja na tečenje

materijala pri FSW, posebno u blizini vrha alata [175]. Korišćene su različite tehnike, primjenom spojeva raznorodnih materijala [89, 108], gdje je za karakterizaciju ponašanja pri tečenju materijala korišćena analiza mikrostrukture aluminijumskih legura [108], radi vizuelnog prikaza površine spoja i praćenja uticaja brzine na tečenje. Metalografske studije aluminijumskih legura i bakra [111] dovele su do zaključka da tečenje materijala čini haotično-dinamička mješavina. Obje tehnike sa aluminijumskim legurama [89, 111] demonstrirale su postojanje kompleksnih spiralnih i vrtložnih struktura [63, 89, 111] i veliko vertikalno pomjeranje u blizini vrha [128].

Neke tehnike [23, 63, 102, 111], koriste indikatore sa istim ciljem kao što je ubacivanje čeličnih kuglica [22, 23], pomjeranjem sa različitim visinama duž centralne linije, vizuelizovano X -zracima, ukazuje da postoji ekstruzija. Korišćeni su tanki limovi od AA5454-H32 [129, 130], pričvršćeni na površinu na različitim visinama i rastojanjima od ose spoja, u cilju identifikacije linija tečenja materijala, zatim bakarna ploča [111], postavljena na površinu, primjenom metalografije dovodi do zaključka da dio materijala rotira zajedno sa vrhom. Prah SiC [102] se premješta oko centralne linije, vizuelizovano metalografijom, radi identifikacije linija tečenja. U radu [63], postavljena je bakarna folija duž linije spoja radi analize ponašanja materijala pri izlaganju velikim deformacijama. Tehnike poput akustične emisije [128] i difrakcije povratnih elektrona [54] su takođe korišćene za karakterizaciju tečenja materijala uz obećavajuće rezultate [175].

U radu [157] predstavljena je detaljna analiza mikrostrukture dvije aluminijumske legure koje su zavarivane postupkom FSW: legura 5083 i legura 6082, pomoću elektronske mikroskopije. Ove legure se uglavnom koriste u sektoru brodogradnje i obično se zavaruju u procesu koji se naziva FSSW koje je razvio „ESAB”. Konstatovano je da postoji velika razlika u brzini zavarivanja ove dvije legure. Legura 6082 može da bude zavarivana mnogo brže nego legura 5083 za istu debljinu lima. Kod legure 5083 je relativno uniformna veličina zrna, blago izdužena u pravcu valjanja. Kod legure 6082 se nalaze dvije veličine zrna, zahvaljujući djelimičnoj rekristalizaciji. Uopšteno, mikrostruktura zavarenog spoja se dobro podudara sa prethodno objavljenim istraživanjima. Veličina zrna u „grumen” zoni je približno $10 \mu\text{m}$ kod obje legure.

U radu [116] ispitane su mikrostrukture legure aluminijuma 2195 kod procesa FSW. Mikrostruktura je bila analizirana u dva slučaja: *as-welded* i *post-welded*. *As-welded* mikrostruktura je grafički interpretirana i ukazuje na tri različita područja šava: dinamički rekristalizovana zona - DXZ, zona termo-mehaničkog uticaja - TMAZ i zona uticaja toplote - HAZ. Grafik pokazuje nedostatak simetrije duž centralne linije šava, koja se pripisuje „plastificiranoj” prirodi kretanja metala oko alata. Vidi se prisustvo malih taloženja zrna koja su bogata bakrom i željezom. U *post-welded* mikrostrukturi, tvrdoća u DXZ zoni opada. Prosječna gustina dislokacija u tim regionima je kvalitativno manja nego u *as-welded* stanju. Postoje mala taloženja koja sadrže srebro, kao i kompozitna bakarna jedinjenja.

U radu [131] su obavili istraživanje za procjenu mikrostrukturnih promjena procesa FSW kod legure aluminijuma 7075. Zona „grumena” je karakteristična po koncentričnim linijama protoka materijala, koje predstavljaju plastičnu deformaciju, a koje razvija rotirajući alat preko trna alata. Zona „grumena” ima fino rekristalizovanu zrnastu strukturu.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCESA FSW

U radu [5] objavljena je studija o poređenju zaostalih zrna i mikrostrukture kod legure 2024, prilikom zavarivanja postupkom FSW, na sobnoj temperaturi (30°C) i niskoj temperaturi (-30°C). Ustanovljeno je da efikasnost zavarivanja znatno opada na niskoj temperaturi, kao i da oblik i veličina zone zavarivanja, takođe opadaju sa temperaturom. Ovo sužavanje zona zavarivanja odrazilo se i na testove mikro-tvrdoće. Poređenjem rekristalizovanih zrna struktura na vrhu i dnu šava centralne linije, utvrđeno je da postoji porast veličine zrna u zoni šava od dna ka vrhu, ali na niskim temperaturama razlika je manja od dna ka vrhu. Veličina zrna je znatno manja kod niskih temperatura zavarivanja.

U radu [94] proučavan je uticaj brzine zavarivanja na formiranje defekata i na promjene u tvrdoći kod procesa FSW legura 5083-O, 2024-T3 i 6063-T6. Kod legure 6063-T6 tvrdoća se drastično smanjuje u zoni zavarivanja (*Weld-Deformed Zone*), ali kod legura 2024-T3 i 5083-O tvrdoća je identična i superiornija od osnovnog materijala. Povećanje brzine zavarivanja povećava brzinu protoka materijala, pa je dinamička rekristalizacija manja nego kod manje brzine zavarivanja. Povećanje brzine zavarivanja, proizvodi otvrđnjavanje materijala, koji smanjuje plastični kapacitet. Toplota generisana od trenja ne može biti dovoljna da se nadoknadi otvrđnjavanje. Plastične deformacije se dešavaju na granicama zrna i pojavljuju se pukotine u zoni. Pukotine imaju tendenciju da se formiraju samo kod legura 5083-O i 2024-T3, na suprotosmjernej strani zavarivanja. Povećanje brzine zavarivanja povećava učestalost formiranja defekata i povećanja aksijale sile.

3. OBRAZLOŽENJE TEME

Istraživanja u ovom radu predstavljaju kontinuitet polaznih istraživanja koja su utemeljena u magistarskom radu „Modeliranje procesa zapreminskog deformisanja korišćenjem metoda fizičke diskretizacije i numeričke simulacije”, odbranjenom na Mašinskom fakultetu u Podgorici. Rad je proistekao iz dugogodišnjih istraživanja složenih procesa obrade deformisanjem praćenih visokom fizičkom i geometrijskom nelinearnošću. Nedovoljna istraženost i kompleksnost ovih procesa uslovjava neophodnost korišćenja međusobno povezanih pristupa: teorijskog, eksperimentalnog i numeričkog.

U radu je istraživan proces spajanja materijala deformisanjem koji se u literaturi može sresti pod nazivom *Fiction Stir Welding - FSW*. Proces FSW je aktuelan i aplikativan, posebno kod zavarivanja aluminijuma i njegovih legura, ali i za široku klasu drugih materijala. Karakteriše ga pouzdanost koja je uslovila primjenu kod veoma odgovornih sistema u brodogradnji, avio i svemirskoj industriji.

Na osnovu publikovanih radova iz ove oblasti, može se zaključiti da se proces FSW, istražuje uglavnom eksperimentalno uz određivanje:

- ◆ mikrostrukture presjeka zavarenog spoja,
- ◆ komponenata sile u različitim pravcima,
- ◆ obrtnog momenta alata,
- ◆ temperature,
- ◆ signala akustičke emisije i
- ◆ mehaničkih karakteristika spoja.

Nakon upoznavanja sa literaturom i uvida u dosadašnja istraživanja, primijećeno je da su veoma oskudna istraživanja na planu modeliranja i simulacije ovih procesa, pa su u doktorskoj disertaciji analizirane mogućnosti primjene MKE softvera. Takođe definisane se parametri koje je potrebno optimizirati tokom istraživanja.

Za uspješno projektovanje bilo kojeg tehničkog postupka u ovom slučaju postupka FSW, od velikog je značaja poznavanje parametara koji karakterišu proces. Kod postupka FSW, to su prije svega komponente sile zavarivanja i temperatura. To je uslovilo da je osnovni zadatak disertacije modeliranje i simulacija procesa FSW korišćenjem metode konačnih elemenata, odnosno određivanje komponenti sile i temperature, kao i njihova analiza i komparacija.

Predmet rada u doktorskoj disertaciji je modeliranje i simulacija termo-mehaničkih parametara, koji karakterišu proces FSW, kao i razvoj metoda za analizu istraživanog procesa spajanja materijala uz korišćenje efekata plastične deformacije.

Ulazni parametri su: geometrijski parametri alata (prečnik trna alata, ugao nagiba trna alata i prečnik čela alata) i kinematski parametri procesa (brzina zavarivanja i ugaona brzina okretanja alata). Moraju biti optimalno izabrani u skladu sa preliminarnim istraživanjima. Radni komadi su od legure aluminijuma 6082-T6.

3. OBRAZLOŽENJE TEME

Spajanje trenjem se izvodi na alatnoj mašini glodalici, velikih gabaritnih dimenzija i velike krutosti, uz pomoć dodatne opreme.

Simulacija procesa je od velikog značaja jer često može biti zamjena realnom eksperimentu. Ipak na sadašnjem nivou razvoja, pri numeričkoj simulaciji neophodna je eksperimentalna verifikacija, jer je proces simulacije kod spajanja materijala deformisanjem - FSW, praćen određenim problemima. Prije svega ističemo:

- ◆ promjenjiv koeficijent trenja,
- ◆ intenzivno plastično tečenje sa velikim stepenima deformacije u blizini alata i
- ◆ mogućnost pojave topljenja kada se zavaruju materijali sa jako izraženom razlikom u čvrstoći i tački topljenja.

Od numeričkih metoda najviše se koristi metoda konačnih elemenata - MKE. Zbog navedenih poteškoća ne postoji softver koji u potpunosti modelira spajanje trenjem i daje kompletne rezultate svih termičkih, deformacionih, naponskih i kinematskih parametara. Istraživanje treba da bude usmjereno u pravcu postizanja tog cilja.

3.1. NAUČNI CILJ

Cilj rada je kompleksno istraživanje složenih procesa spajanja materijala deformisanjem odnosno zavarivanja postupkom FSW. Korišćenjem poznatih metoda biće određeni parametri koji karakterišu proces.

Dobiće se rezultati na planu modeliranja i simulacije procesa FSW. Istraživanja se odnose na spajanje istorodnih materijala u ovom slučaju aluminijuma, sa efektom plastične deformacije. Uspješnost simuliranja će se utvrditi kroz komparaciju različitih pristupa kao i upoređenja sa poznatim istraživanjima, što će stvoriti pouzdan temelj za nova i kompleksna modeliranja i simulacije.

Eksperiment će biti postavljen saglasno teoriji plana eksperimenta uz korišćenje odgovarajuće precizne analogno digitalne mjerne opreme. Tako dobijeni eksperimentalni rezultati mogu se koristiti za modeliranje istraživanih procesa.

Kao ulazi u procesima simulacije, biće analizirani i definisani: geometrijski parametri, granični uslovi, materijal u procesu FSW i drugi parametri. Simulacija procesa će se izvršiti, kroz stalnu promjenu parametara, da bi se utvrdile mogućnosti i ograničenja simulacije na bazi MKE softvera za klasu problema.

Na bazi navedenih ciljeva postavljaju se hipoteze doktorske disertacije:

- h1: Postupkom FSW, moguće je ostvariti kvalitetan spoj radnih komada od legure aluminijuma kroz proces optimizacije ulaznih parametara.
- h2: Zavisnost ulaznih i izlaznih istraživanih parametara postupka FSW je moguće egzaktno utvrditi.
- h3: Proces FSW je moguće simulirati na bazi metode konačnih elemenata.

3.2. NAUČNI DOPRINOS

U radu će se kroz kompleksan istraživački pristup dati naučni doprinos u oblasti aktuelne tehnologije procesa spajanja deformisanjem odnosno zavarivanja postupkom FSW. U tom smislu bi se sprovelo modeliranje procesa FSW, na osnovu eksperimentalnih rezultata i numerička simulacija procesa korišćenjem odgovarajućeg softverskog paketa na bazi metode konačnih elemenata. Eksperimentalnim istraživanjem bi se obuhvatilo određivanje termo-mehaničkih i mikrostrukturnih parametara procesa FSW.

Rezultati istraživanja ovog rada bi trebalo da doprinesu boljem sagledavanju i uspješnijoj aplikaciji ispitivanog procesa FSW.

3.3. GLOBALNI PLAN ISTRAŽIVANJA

U dijelu preliminarnih istraživanja za potrebe izrade doktorske disertacije definisan je globalni plan istraživanja koji je okarakterisan sledećim aktivnostima:

- ◆ Prikupljanje i analiza literaturnih izvora.
- ◆ Priprema istraživačkog mjestu.
- ◆ Softverska podrška istraživanju procesa FSW.
- ◆ Upoređivanje i verifikacija sa poznatim eksperimentima.
- ◆ Istraživanje i analiza procesa FSW.
- ◆ Definisanje plana istraživanja.
- ◆ Priprema materijala za eksperimentalna istraživanja.
- ◆ Projektovanje i izrada pomoćnog pribora za izvođenje procesa.
- ◆ Projektovanje i izrada alata za izvođenje procesa.
- ◆ Instalacija i baždarenje mjerne opreme.
- ◆ Preliminarna istraživanja.
- ◆ Planiranje eksperimenta.
- ◆ Izvođenje glavnih eksperimentalnih istraživanja.
- ◆ Obrada rezultata.
- ◆ Disperziona i regresiona analiza dobijenih rezultata - modeliranje.
- ◆ Optimizacija procesa.
- ◆ Numerička simulacija procesa metodom konačnih elemenata.
- ◆ Upoređenje eksperimentalno i modelskih dobijenih rezultata sa rezultatima numeričke simulacije.
- ◆ Analiza rezultata i zaključna razmatranja.

3.4. DETALJNIJI PLAN ISTRAŽIVANJA

Prikupljanje i analiza literatumih izvora. Cilj je da se sistematizuje opsežna literatura iz ove oblasti i precizno odrede postojeći rezultati na planu modeliranja i numeričke simulacije procesa FSW, kao i realizovanih eksperimentalnih istraživanja.

3. OBRAZLOŽENJE TEME

Priprema istraživačkog mjesa. Neophodno je, zbog kompleksnih dugotrajnih istraživanja, da se detaljno pripremi istraživačko mjesto. To znači da je potrebno kompletirati istraživačku opremu, nabaviti novu i dovesti u funkciju postojeću.

Softverska podrška. Potrebno je testirati postojeće softvere, nabaviti nove i prilagoditi softvere istraživanim problemima. Primjena MKE softvera, veoma često može biti neuspješna, zato je potrebno izanalizirati i teorijske osnove metode konačnih elemenata, kao i geometrijske parametre, granične uslove, način definisanja materijala i druge parametre.

Istraživanje i analiza procesa FSW. Za uspješno istraživanje, potrebno je studiozno izvršiti analizu odvijanja procesa. Potrebno je i analizirati teorijske osnove na kojima se bazira proces FSW.

Definisanje plana istraživanja. Izvršiće se definisanje (organizovanje) plana istraživanja.

Priprema materijala, projektovanje alata i pomoćnog pribora za eksperimentalna istraživanja. Da bi se mogla izvršiti eksperimentalna istraživanja potrebno je na osnovu definisanih dimenzija alata isprojektovati odgovarajuće familije alate i izvršiti pripremu eksperimentalnog materijala.

Planiranje eksperimenta. Usvojiće se višefaktorni ortogonalni plan sa variranjem faktora na dva nivoa varijacije i ponavljanjem u centralnoj tački plana četiri puta.

Izvođenje glavnih eksperimentalnih istraživanja. Na osnovu plana eksperimenta, pripremljenih radnih komada i urađenih alata pristupiće se izvođenju samog eksperimenta, radi dobijanja traženih rezultata.

Obrada rezultata. Korišćenjem odgovarajućih aktuelnih softvera izvršiće se klasifikacija i obrada dobijenih rezulta.

Disperziona i regresiona analiza dobijenih rezultata - modeliranje. Nakon izvršenih eksperimentalnih istraživanja pristupiće se dobijanju regresionog modela istraživane familije alata, u funkciji ulaznih parametara. Odrediće se koeficijenti regresije, izračunaće se disperzija i ispitati adekvatnost modela.

Optimizacija procesa. Kako je jedan od glavnih faktora koji utiče na ekonomičnost postupka, utrošak energije, u radu je potrebno izvršiti optimizaciju procesa FSW u odnosu na komponentu vertikalne sile zavarivanja.

Numerička simulacija metodom konačnih elemenata. Kao što je već naglašeno, potrebno je za iste ulazne veličine izvršiti numeričku simulaciju procesa. Simulacija se izvodi na bazi MKE softvera.

Upoređenje eksperimentalno i modelskih dobijenih rezultata sa rezultatima numeričke simulacije. Analizom i poređenjem svih izlaznih veličina, dobijenih eksperimentalnim putem, modeliranjem, optimizacijom procesa, numeričkom simulacijom procesa i mehaničkim ispitivanjima kvaliteta zavarenih radnih komada, dobiće se određeni zaključci koji se odnose na unapređenja procesa FSW. Detaljnijim poznavanjem svih parametra procesa FSW stvorice se uslovi mogućnosti odgovora na sve strože zahtjeve u pogledu kvaliteta proizvoda, postojanosti alata i iskorišćenja proizvodnih resursa.

4. TEORIJSKE POSTAVKE

4.1. OSNOVI POSTUPKA FSW

4.1.1. PRINCIP RADA

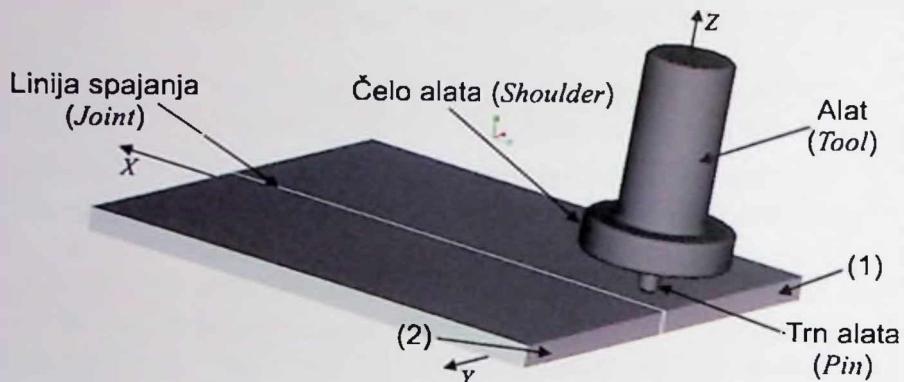
Devedesetih godina prošlog vijeka razvijen je novi postupak spajanja istorodnih i raznorodnih materijala koji se izvodi u čvrstom stanju bez topljenja materijala poznatiji pod imenom „Zavarivanje trenjem sa miješanjem“ (*Friction Stir Welding - FSW*). Postupak je patentiran od strane „Instituta za zavarivanje“ (*The Welding Institute - TWI*) iz Velike Britanije decembra, 1991. godine, a pronašao ga je *Wayne M. Thomas* koji je uspješno spojio limove legure aluminijuma [163, 164, 165, 167]. Termini kao što su autogeno zavarivanje trenjem (*Autogenous Friction Stir Welding - AFSW*) i hibridno zavarivanje trenjem (*Hybrid Friction Stir Welding - HFSW*) se ponekad koriste, ali je konvencionalno samo ime „*Friction Stir Welding - FSW*“ [169]. Postupak zavarivanja materijala FSW, je veoma brzo, već 1994. godine, dobio svoju komercijalnu primjenu i izazvao veliku pažnju istraživača u praksi.

Postupak FSW, se izvodi tako da se na radnom stolu mašine nalaze limovi koje je potrebno spojiti. Limovi moraju biti čvrsto stegnuti za radni sto mašine, koji može horizontalno translatorno da se kreće. Specijalni alat koji se koristi u procesu zavarivanja je cilindričnog oblika i sastoji se iz tijela alata i dva koncentrična dijela koja rotiraju velikom brzinom. Tijelo alata služi da se alat pričvrsti u stezne čeljusti mašine. Dio alata većeg prečnika naziva se čelo alata (*shoulder*), dok se dio manjeg prečnika naziva trn alata (*pin*). Oblici čela i trna alata mogu biti različiti. Čelo alata može imati i koncentrično udubljenje u svojoj površini obično polukružnog oblika, dok je trn najčešće koničnog oblika koji može biti profilisan zavoјnicom ili raznim drugim žlebovima. Visina trna uglavnom zavisi od debljine lima koji se zavaruje (spaja), ali mora biti nekoliko desetih djelova milimetra manja od debljine lima.

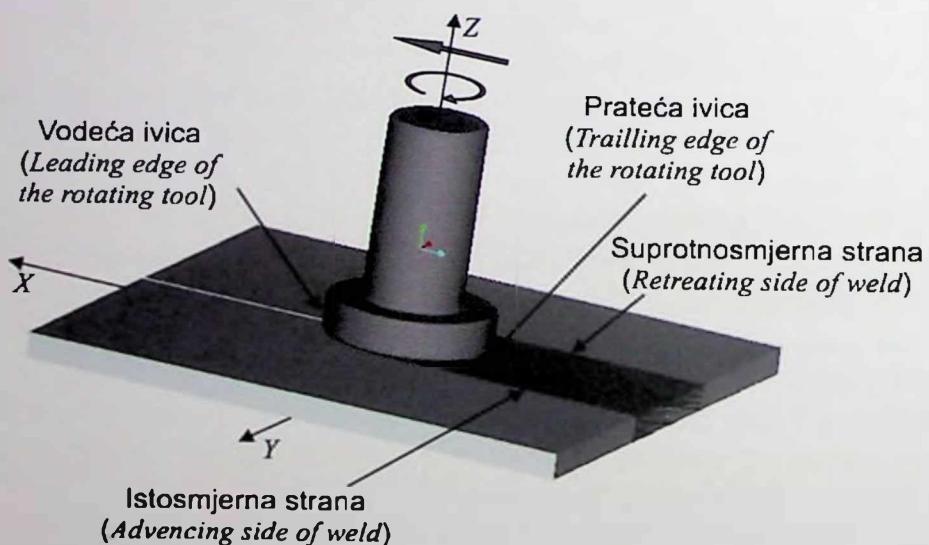
Postupak FSW, počinje tako što je alat pozicioniran iznad radnog stola mašine, a njegova osa normalna na liniju dodira (spajanja) limova (Slika 4.1). Rotirajući alat prilazi lagano liniji spoja i zariva se u materijal - radne komade (limovi 1 i 2 na Slici 4.1). Tom prilikom u materijalu (radnim komadima) se formira početna rupa, pri čemu počinje da se generiše toplota. Trn alata se zariva u materijal sve dok čelo alata ne napravi kontakt sa gornjom površinom radnih komada. Alat mora da sa dovoljnim pritiskom zadrži materijal unutar zone zavarivanja i da stvori dovoljnu temperaturu da bi se proces FSW nesmetano odvijao. U tom položaju alat zagrijava materijal do blizu tačke topljenja i postaje plastičan. Zahvaljujući obliku trna, zagrijani materijal se kreće oko trna i na taj način se miješa. Zatim počinje horizontalno translatorno uzdužno kretanje radnog stola mašine. U daljem toku odvijanja procesa FSW, trn praktično „klizi“ između limova u smjeru zavarivanja, nov materijal se zagrijava, postaje plastičan i neprekidno se miješa. Za to vrijeme iza čela alata se stvara brazda glatkog zagrijanog materijala koji se hlađi i

4. TEORIJSKE POSTAVKE

očvršćava (Slika 4.2), a između limova (radnih komada), se formira monolitan spoj, dok se donja ravan formira od podloge na kojoj radni komadi stoje i ona je glatka i ravna. Isključivanjem translatornog kretanja radnog stola mašine i izvlačenjem alata iz materijala, završava se proces zavarivanja. Umjesto radnog stola mašine, translatorno kretanje može da vrši samo alat ili radni sto mašine i alat istovremeno.



Slika 4.1. Prikaz alata i radnih komada (limova) prije početka procesa zavarivanja



Slika 4.2. Prikaz alata i radnih komada (limova) u toku procesa zavarivanja

Dakle, kod procesa spajanja materijala postupkom FSW, vrlo je bitno poznavati generisanu toplotu koja se dobija iz dva glavna izvora: a) toplota generisana od trenja između čela alata i površine radnih komada i b) toplota generisana usled plastične deformacije materijala, nastala od trna alata [141]. Na ovaj način se povećava temperatura do tople plastične obrade kada se vrši mahaničko miješanje i spajanje materijala, a pri tome se omogućava da se alat kreće u longitudinalnom pravcu odnosno duž linije spajanja.

Zavarivanje materijala je olakšano velikim plastičnim deformacijama u čvrstom stanju, koje uključuje dinamičku rekristalizaciju osnovnog materijala.

DOKTORSKA DISERTACIJA

Kako se proces zavarivanja FSW odnosi na spajanje dva ili više radnih komada, gdje alat rotira i pomjera se kontinualno duž linije spajanja, pri tome formirajući spoj među radnim komadima, usvojena je sledeća terminologija procesa FSW, data u Tabeli 4.1, a prikazana je na Slici 4.1 i Slici 4.2 [169].

Tabela 4.1. Usvojeni termini i definicije [169]

Termin:	Definicija:
Trn alata (<i>Pin</i>)	Dio alata zariven u materijal za vrijeme zavarivanja.
Čelo alata (<i>Shoulder</i>)	Dio alata koji pritiska površinu radnih komada za vrijeme zavarivanja.
Istosmjerna strana (<i>Advancing side</i>)	Strana zavarivanja gdje je smjer kretanja alata isti kao i smjer rotacije čela alata.
Suprotnosmjerna strana (<i>Retreating side</i>)	Strana zavarivanja gdje je smjer kretanja alata suprotan smjeru rotacije čela alata.
Vodeća ivica (<i>Leading edge</i>)	Vodeća ivica čela alata za vrijeme zavarivanja.
Prateća ivica (<i>Trailing edge</i>)	Prateća ivica čela alata za vrijeme zavarivanja.
Vodeća strana trna (<i>Pin leading face</i>)	Vodeća strana trna alata za vrijeme zavarivanja.
Prateća strana trna (<i>Pin trailing face</i>)	Prateća strana trna alata za vrijeme zavarivanja.
Zona miješanja (<i>Stirred Zone</i>)	Karakteristični oblikovani ovalni region u centru zavarivanja u aluminiju i mnogim ostalim materijalima, sa sitnozrnom finom mikrostrukturom.
Zona termomehaničkog uticaja (<i>Thermo-Mechanically Affected Zone - TMAZ</i>)	Oblast spajanja, gdje je mikrostruktura izmijenjena pomoću kombinovanih efekata toplote i plastične deformacije.
Zona uticaja topline (<i>Heat Affected Zone - HAZ</i>)	Oblast spajanja gdje je mikrostruktura izmijenjena pomoću topline.
Ravanska pukotina (<i>Planar flaw</i>)	Prekid u zoni zavarivanja, koji postoji primarno u jednoj ravni.
Zona tečenja (<i>Void</i>)	Zapreminske tečenje u zoni zavarivanja.
Brzina zavarivanja (<i>Welding speed</i>)	Brzina kretanja alata duž linije spajanja.
Brzina rotacije (<i>Rotation speed</i>)	Ugaona brzina okretanja alata kod procesa zavarivanja.

4. TEORIJSKE POSTAVKE

Tabela 4.1. Usvojeni termini i definicije [169] (nastavak)

Termin:	Definicija:
Rotacija, u smjeru kazaljke na satu <i>(Clockwise rotation)</i>	Rotacija alata gledano odozgo na alat, a odozdo na radni komad.
Ugao nagiba <i>(Tilt angle)</i>	Ugao za koji je osa alata nagnuta od vertikale, u smjeru suprotno od pravca zavarivanja.
Bočni ugao nagiba <i>(Sideways tilt angle)</i>	Ugao za koji je osa alata nagnuta od vertikale, u smjeru poprečno na pravac zavarivanja.
Dubina prodiranja <i>(Heel plunge depth)</i>	Dubina do koje prodire najniži dio čela alata kada postoji ugao nagiba alata.
Otisak čela alata <i>(Tool shoulder footprint)</i>	Površina čela alata u kontaktu sa površinom radnog komada.
Vertikalna sila - Z <i>(Down force - Z)</i>	Sila koja djeluje u aksijalnom pravcu alata.
Uzdužna sila - X <i>(Traversing force - X)</i>	Sila koja djeluje paralelno pravcu zavarivanja.
Bočna sila - Y <i>(Side force - Y)</i>	Sila koja djeluje u pravcu normalnom na X i Z sile.
Bočno pomjeranje <i>(Lateral offset)</i>	Rastojanje ose alata od linije spajanja kod procesa FSW raznorodnih materijala.

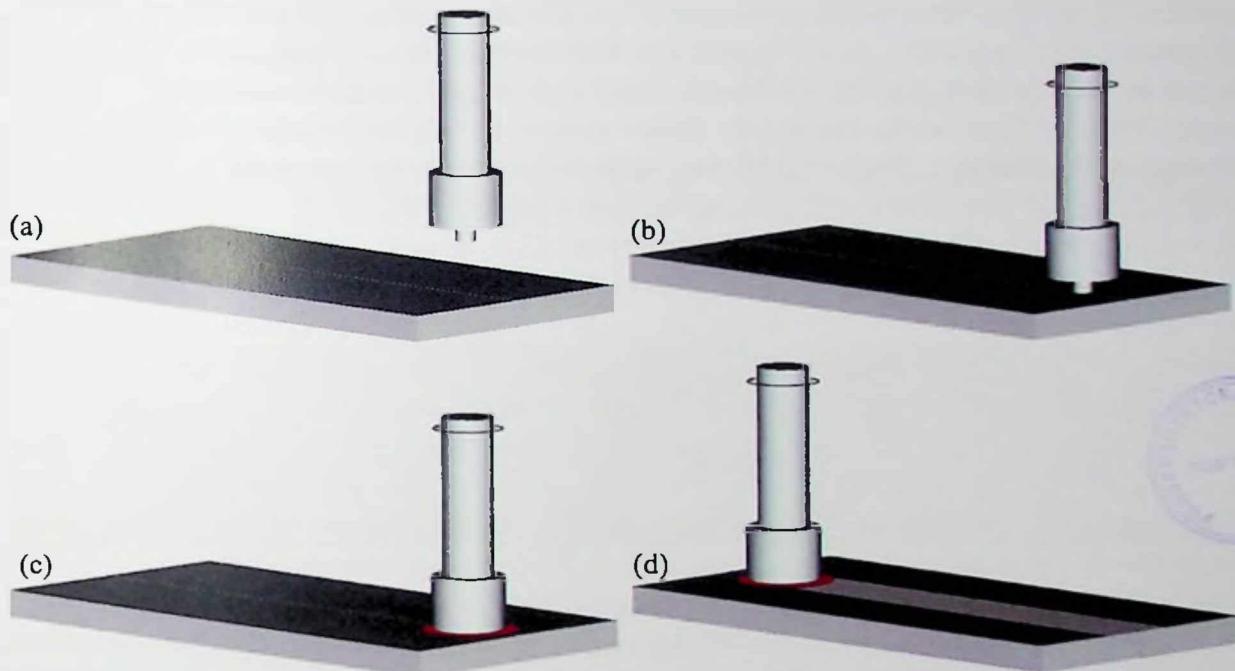
4.1.2. FAZE PROCESA FSW

Proces FSW, moguće je podijeliti na dva karakteristična perioda, na dvije faze, kako je prikazano na Slici 4.3.

Prva faza počinje dodirom vrha trna alata i radnih komada i traje do kontakta čela alata sa gornjom površinom radnih komada, tj. do prekida aksijalnog kretanja. Taj period se može definisati fazom prodiranja ili utiskivanja. Ova faza se karakteriše konstantnim intenzitetom generisanja toplove trenjem. Količina oslobođene toplove je najmanja na početku, a maksimalna na kraju faze prodiranja. Toplota se oslobođa trenjem između cijele površine trna alata i materijala, a na kraju se u taj proces uključuje i prstenasta površina čela alata. Već u ovoj fazi počinje sljepljivanje materijala limova na frikcione površine alata i njegovo nagomilavanje.

Početak translatornog kretanja alata duž linije spajanja limova označava početak druge faze. Ovaj period se može definisati kao faza formiranja spoja, i on se karakteriše različitim i specifičnim generisanjem toplove od strane radnih površina alata. Toplota se najintenzivnije generiše na frontalnom dijelu frikcione površine trna, jer ona dolazi u dodir sa nezagrijanim materijalom na koji trn nailazi u smjeru svog translatornog kretanja. Na ostalim djelovima površine trna, kao i na površini čela alata, intenzitet generisanja toplove je mnogo manji. Razlog tome jeste što se te površine nalaze u kontaktu sa ranije već zagrijanim i plastičnim materijalom, a u tom slučaju generisanje toplove ima samoregulišući karakter. To znači da se toplopa oslobođa samo u količini

dovoljnoj da se temperatura zavarivanih djelova održava na 100°C do 200°C ispod tačke topljenja slabijeg materijala u spoju. Izložena podjela ciklusa zavarivanja na dvije karakteristične faze omogućava lakšu analizu procesa generisanja toplotne, zatim proračun toplotne raspodjele i temperaturnog polja, problema habanja i nagomilavanja materijala na frikcionim površinama alata, itd. Samim tim takav pristup omogućava lakše rješavanje uočenih nedostataka kod procesa FSW. Ova faza se završava prekidom translatornog kretanja. [80, 109, 132, 146, 166, 168, 191].



Slika 4.3. Faze procesa FSW: (a), (b) i (c) - prva faza; (d) - druga faza

4.1.3. METAL ŠAVA

Kod procesa FSW, zavareni spoj (metal šava) je asimetričan, pa su definisane istosmjerna i suprotnosmjerna strana zavarivanja. Istosmjerna strana metala šava je definisana kao strana na kojoj se poklapaju smjerovi vektora ugaone brzine okretanja alata i vektora brzine pravolinijskog kretanja alata. Suprotnosmjerna strana metala šava je definisana kao strana gdje je pravac kretanja suprotan vektoru brzine okretanja alata. Vodeća ivica je prednji dio alata, a prateća ivica je zadnji dio alata. Lice metala šava je gornja površina zavarenih limova koja se formira posle prolaska čela alata, a korijen metala šava je donja površina.

Na licu metala šava se nalaze karakteristični otisci od alata u obliku polukružnih rubova. Razmak između dva ruba odgovara putu koji pređe alat pravolinijskim kretanjem po radnim komadima u smjeru zavarivanja za vrijeme jednog obrta. U zavisnosti od vrste legure i parametara zavarivanja ovi rubovi mogu biti više ili manje uočljivi. Na suprotnosmjernoj strani lica metala šava, formira se ivica od materijala koji je tekao preko osnovnog metala. Ova ivica se često naziva „bljesak“ (*flash*). Pravilnim izborom parametara zavarivanja i dizajna alata „bljesak“ može biti minimiziran. Na kraju

procesa FSW u metal šavu pojavljuje se otvor - „keyhole”, koji ostaje pošto se alat izvuče iz zavarenih radnih komada. Otvor ima oblik i veličinu koja je približna obliku i veličini trna alata koji se koristi u procesu FSW [109, 130, 168, 191].

4.1.4. MIKROSTRUKTURNE KARAKTERISTIKE

U literaturnim izvorima, postoji više različitih termina koji opisuju mikrostrukturne promjene kod procesa FSW. Asimetrična priroda metala šava i neobičan oblik stepenastog alata, uslovili su da, kao rezultat zavarenog spoja imamo veoma karakterističnu mikrostrukturu. Prvi pokušaji mikrostrukturne podjele zavarenog spoja izvedeni su 1997. godine samo za legure aluminijuma. Vrlo brzo su se odomaćili nazivi mikrostrukturnih zona, koji su usvojeni konsenzusom i koji obuhvataju i mikrostrukturne podjele ostalih metala. Mikrostrukturna podjela je izvedena na TWI institutu i nju sačinjavaju četiri zone koje su prikazane na Slici 4.4 [109, 191].



Slika 4.4. Struktura zavarenog spoja kod procesa FSW

- A - Zona osnovnog materijala.
- B - Zona uticaja toplote (*Heat Affect Zone - HAZ*).
- C - Zona termo-mehaničkog uticaja (*Thermo-Mechanically Affect Zone - TMAZ*).
- D - Zona miješanja (*Stirred Zone*) ili „grumen” zona (*Nugget Zone - NZ*).

U zoni osnovnog materijala nema plastičnog deformisanja materijala, niti uticaja toplote, koji može uticati na mehaničke osobine, tako da u zoni osnovnog materijala nema mikrostrukturnih promjena.

Zona uticaja toplote je zajednička za sve procese zavarivanja, pa postoji i kod procesa FSW. Ova zona je izložena topotnom uticaju, ali se ne deformiše tokom procesa zavarivanja. Tokom procesa zavarivanja, ona prolazi kroz odgovarajući temperaturni ciklus koji dovodi do promjena mehaničkih osobina i mikrostrukture. Veličina zone uticaja toplote direktno zavisi od unijete toplote. Temperature u ovoj zoni su niže od onih u TMAZ zoni, ali još uvijek imaju značajan efekat, ako je mikrostruktura termalno nestabilna [109, 191, 192].

U zoni termo-mehaničkog uticaja toplote, materijal je izložen plastičnim deformacijama i temperaturnim uticajima od strane alata koji se javljaju na obje strane zone miješanja. Za razliku od zone miješanja, mikrostruktura se može razlikovati od strukture osnovnog materijala, mada je značajno deformisana, a i temperature su niže, pa je prilikom procesa zavarivanja i odgovarajuća mikrostruktura manje promijenjena.

Kod aluminijuma u ovoj zoni izdvajaju se jasno tri oblasti: tzv. (*nugget*) - „grumen“ zona, oblast izvan „grumen“ zone i oblast rukavaca iznad „grumen“ zone. Oblast izvan „grumen“ zone u manjoj mjeri je deformisana i u zavisnosti od legure, ne mora da bude rekristalizovana. Granica između „grumen“ zone i TMAZ zone je jasno vidljiva zbog otpora osnovnog materijala rekristalizaciji. Rukavac iznad „grumen“ zone, se formira kada čelo alata pređe preko „grumen“ zone metala šava. Zbog nesimetričnosti metala šava, istosmjerna i suprotnosmjerna strana metala šava ispoljavaju značajne razlike. Prelaz od „grumen“ zone prema osnovnom materijalu je veoma oštar na istosmjernoj strani i više postepen na suprotnosmjernoj strani. Oblast lakše deformisanog materijala (oblast izvan „grumen“ zone), na istosmjernoj strani metala šava je veoma uska. Kod drugih materijala ne postoji jasno izražena rekristalizovana „grumen“ zona, već će čitava zona termo-mehaničkog uticaja biti djelimično rekristalizovana. Ovo je karakteristično za materijale koji imaju difuziono kontrolisan i termalno aktiviran fazni preobražaj, koji će dovesti do rekristalizacije, npr. čist titanijum i α - β legura titanijuma, austenitni nerđajući čelik i bakar. Kod feritnog čelika i α - β legure titanijuma (Ti-6Al-4V), često je granica između HAZ i TMAZ teško uočljiva [109, 192].

Zona miješanja je (tzv. *nugget* - „grumen“ dinamički rekristalizovana zona) zona velike deformacije materijala, koja odgovara otprilike lokaciji trna alata tokom procesa FSW. Zrna u ovoj zoni su grubo promiješana i često reda veličine manje od veličine zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna u zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja, kreće se od 1 μm do 10 μm . Ta oblast se formira odmah ispod čela alata, a širina joj je neznatno veća od prečnika trna alata. Ova zona se često smatra sub-zonom TMAZ zone. Jedinstvena karakteristika ove zone je pojava nekoliko koncentričnih prstenova, koji se nazivaju „luk - prsten“ strukture. Precizno porijeklo ovih prstenova nije čvrsto utemeljeno, mada su ustanovljene varijacije o broju gustine čestica i veličine zrna [192].

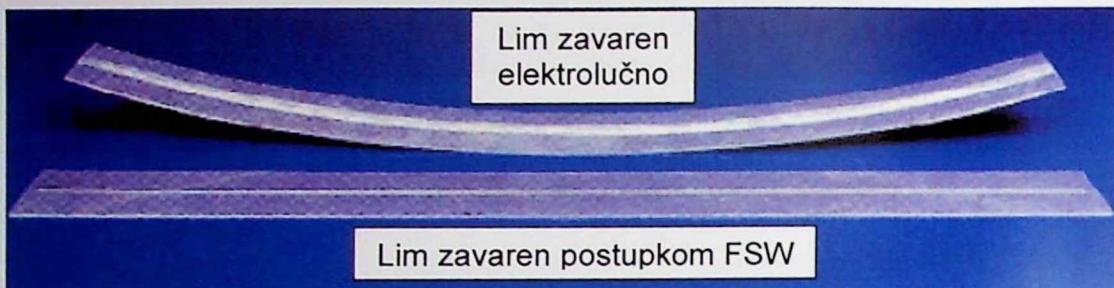
Još se prilikom procesa FSW javlja nagomilavanje materijala (*flow arm*), na gornjoj površini šava koje se sastoji od materijala koji je tekao ispod čela alata od istosmrerne strane šava, oko zadnje strane alata i deponovan je na suprotnosmjernoj strani [192].

4.1.5. PREDNOSTI I NEDOSTACI POSTUPKA FSW

Postupak FSW, je razvijen sa ciljem da se prevaziđu problemi koji se javljaju pri zavarivanju gdje dolazi do topljenja materijala. Ovi problemi su prevaziđeni posebno kod zavarivanja aluminijuma i njegovih legura. Postupak FSW, se uglavnom koristi za zavarivanje limova veće debljine, mada se može koristiti i za zavarivanje limova manje debljine. Debljina aluminijumskog lima koji se može zavarivati ovim postupkom zavisi od snage mašine i kreće se od 0.5 mm do 50 mm u jednom prolazu ili jednostranom šavu. U dvostranom šavu moguće je zavarivati i limove do 75 mm debljine. Kako je priroda FSW čvrsto stanje, to odmah vodi do nekoliko prednosti u odnosu na metode zavarivanja topljenjem metala. Hlađenje tečne faze je odmah izbjegnuto. Pitanja kao što su poroznost (šupljikavost), redistribucija rastvora, pucanje očvršćavanjem i pucanje topljenjem nijesu primijećena tokom procesa FSW. U principu postupak FSW je našao svoju primjenu, ima mali broj nedostataka i veoma je tolerantan za varijacije u parametrima i materijalima. Jedna od značajnih prednosti u odnosu na elektrolučne

4. TEORIJSKE POSTAVKE

postupke zavarivanja je što nema distrozije odnosno krivljenja lima u toku odvijanja procesa FSW (Slika 4.5).



Slika 4.5. Distorzije limova zavarenih elektrolučno i postupkom FSW [40]

Pored navedenih, postupak FSW posjeduje svojstva koja su vama rijetko prisutna kod drugih postupaka: formiranje zavarenog spoja sa zanemarljivo malim unutrašnjim naponima, dobijanje spojeva koji su otporni na koroziju i pojavu krtog loma, ali sve to kod materijala kod kojih do sada to nije bilo moguće, ili je bilo izuzetno teško i skupo ostvariti. Zbog toga je u ekonomskom pogledu postupak FSW, ubjedljivo najefikasniji, a ekološki je apsolutno čist.

Kao što je već rečeno FSW, spada u grupu postupaka zavarivanja u čvrstom stanju. Dakle ne dolazi do topljenja materijala, tako da šavovi imaju izrazito dobre karakteristike.

Generalno, prednosti postupka FSW su:

- ◆ Mogućnost potpune automatizacije procesa. Lako se proces automatizuje na glodalicama.
- ◆ Dobijanje homogene sitnozrnaste strukture spoja sa visokim mehaničkim i drugim svojstvima.
- ◆ Mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala.
- ◆ Dodatni materijal nije potreban.
- ◆ Dobra mehanička svojstva zavarenog spoja.
- ◆ Poboljšana sigurnost usled odsustva otrovnih gasova ili prskanje od rastopljenog materijala.
- ◆ Nema potrošnog materijala (konvencionalni čelični alat može da zvari 1000 metara legure aluminijuma).
- ◆ Niži troškovi postavke i obuke varilaca.
- ◆ Nije potreban sertifikat zavarivača.
- ◆ Nema isparavanja štetnih gasova.
- ◆ Minimalna skupljanja i krivljenja materijala tokom procesa zavarivanja.
- ◆ Nema poroznosti, niti prskanja.
- ◆ Nije potreban zaštitni gas za zavarivanje aluminijuma.
- ◆ Velika ušteda energije.
- ◆ Može da se zavaruje u svim pozicijama (horizontalno, vertikalno, orbitalno, nadglavno itd.) jer nema prosipanja materijala iz šava.
- ◆ Može se koristiti za izvođenje linearnih, nelinearnih, obimnih i trodimenzionalnih zavarenih spojeva.

- ◆ Dobijeni zavareni spoj ne sadrži nemetalne uključke i nečistoće.
- ◆ Jednaka širina metala šava po dužini.
- ◆ Generalno dobar izgled šava i minimalna debljina ispod i iznad zavarenog spoja, čime se smanjuje potreba za skupe obrade posle završenog procesa zavarivanja.

Ipak, proces FSW je povezan sa izvjesnim brojem defekata. Nedovoljna varna temperature, zbog male brzine obrtanja alata ili velike brzine uzdužnog kretanja, što znači da je materijal primio veliku plastičnu deformaciju tokom procesa zavarivanja. Ovo može dovesti do „tunel“ efekta duž šava tokom čitavog procesa, a nedostaci se mogu javiti i na površini. Mala temperatura može ograničiti uticaj alata i tako smanjiti kontinuitet veze između materijala sa svake strane šava.

Jedna od teškoća u realizaciji procesa zavarivanja FSW je što radni komadi koji se zavaruju moraju biti čvrsto stegnuti, a površine koje se spajaju moraju biti potpuno priljubljene jedna uz drugu. U te svrhe se koriste specijalni sistemi za pritezanje. Takođe sa površina koje se zavaruju moraju biti i uklonjene sve nečistoće. Osim toga, na mjestu izlaska alata iz materijala po završetku zavarivanja nastaje otvor. On se otklanja najčešće odsijecanjem dijela materijala, što predstavlja izvjestan gubitak materijala. Ozbiljnije teškoće u primjeni postupka FSW, stvaraju dva problema tribološke prirode. Prvi se sastoji u tome što istovremeno djelovanje topote, mehaničkih otpornih sila i sile trenja izaziva pojačano habanje trna alata i njegovo deformisanje. Samim tim njegove dimenzije se mijenjaju, a to utiče na kvalitet spoja. Zbog toga je neophodna povremena kontrola geometrije alata, a poslije uočene promjene njegovih radnih parametara i zamjena. Na primjer, pri zavarivanju limova od aluminijuma serije 6XXX u SAD, jedan trn alata može da se koristi za zavarivanja do 1000 metara šava, a zatim slijedi njegova zamjena. Drugi problem tribološkog karaktera jeste pojava prelaženja materijala sa jednog na drugo tijelo friкционog para, u ovom slučaju sa limova na alat. Taj materijal se vezuje za frikcione površine, nagomilava se i tako remeti geometriju i funkcionalnost alata. Ova pojava je naročito izražena na povišenoj temperaturi. Pri tome zagrijani materijal limova prelazi, sljepljuje se i nagomilava kako na površinu trna tako i na čelo alata. Naravno, pojava je štetna i ne može potpuno da se otkloni, ali može da se minimizira izborom odgovarajućeg materijala za izradu alata [146].

Generalno, nedostaci postupka FSW su:

- ◆ Postojanje rupe na kraju procesa zavarivanja, kada je alat izvučen iz radnog komada.
- ◆ Potrebna velika vertikalna (aksijalna) sila.
- ◆ Potrebno je dobro stegnuti ploče lima koje se zavaruju, da tokom procesa ne bi došlo do njihovog razvrtanja.
- ◆ Manje fleksibilna od manuelnih lučnih procesa (problemi sa varijacijama debljine i nelinearni šav)
- ◆ Često sporije uzdužno kretanje od drugih tehniki procesa zavarivanja, (za manje dužine zavarenih spojeva).
- ◆ Ne može se vršiti zavarivanje kod koga se zahtjeva dodavanje materijala.
- ◆ Mora se koristiti oslona ploča.

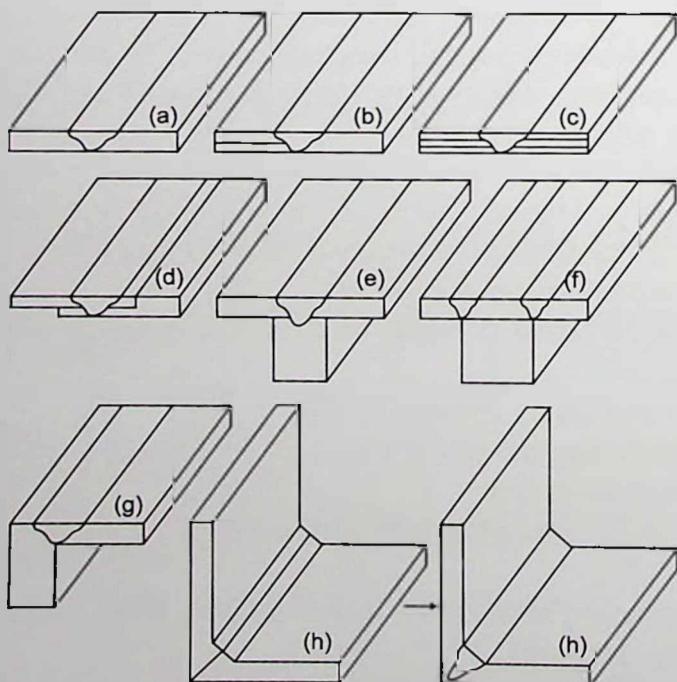
4.1.6. MATERIJALI KOJI SE MOGU ZAVARIVATI POSTUPKOM FSW

Postupkom FSW uspješno se zavaruje [191]:

- ◆ Aluminijum i njegove legure: serija 1XXX (komercijalno čist aluminijum), serija 2XXX (Al-Cu), serija 3XXX (Al-Mn), serija 4XXX (Al-Si), serija 5XXX (Al-Mg), serija 6XXX (Al-Mg-Si), serija 7XXX (Al-Zn) i serija 8XXX (Al-Li).
- ◆ Bakar i njegove legure.
- ◆ Olovo.
- ◆ Titanijum i njegove legure.
- ◆ Legure Magnezijuma.
- ◆ Cink.
- ◆ Plastika.
- ◆ Niskougljenični čelici.
- ◆ Austenit, martenzit, dupleks čelici.
- ◆ Legure nikla.

4.1.7. VRSTE ZAVARENIH SPOJEVA

Postupkom FSW mogu se spajati limovi i pločasti djelovi praktično u svim položajima, u dijapazonu debljina od 0.5 mm do 75 mm od legura aluminijuma i do 25 mm od legura Ti i čelika. Ovim postupkom najčešće se izrađuju sučevi i preklopni, a mnogo ređe ugaoni spojevi (šavovi) koji su prikazani na Slici 4.6 [109].



Slika 4.6. Vrste zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW

- (a) sučevi; (b) kombinovani sučevi i preklopni spoj; (c) višestruki preklopni spoj;
 (d) upušteni preklopni spoj; (e) T spoj dva elementa; (f) T spoj tri elementa;
 (g) ugaoni-sučevi spoj; (h) ugaoni spoj [109, 146]

Najčešće se sučeno spajaju radni komadi debljine od 1.2 mm do 50 mm. Zavarivanje može da se izvede jednostrano ili dvostrano. Najoptimalnije je zavarivanje sučenih spojeva debljine 1.6 mm do 10 mm, a preklopnih, debljine 1.2 mm do 6.4 mm [132]. Zavarivanje može da se izvodi sa jednim ili sa više alata istovremeno, sa jedne ili sa obje strane limova, tako da se u jednom prolazu dobija veći broj spojeva. Pomoću procesa FSW mogu da se realizuju ne samo ravni pravolinijski, već i krivolinijski spojevi različite konfiguracije u različitim položajima, uključujući i tzv. nad glavom. U tom pogledu, praktično nema velikih ograničenja. Pored toga, razvoj tačkastog zavarivanja trenjem FSSW omogućava još širu njegovu primjenu, čak i u uslovima montaže specifičnih djelova. Dužina spoja može da bude ograničena jedino veličinom postolja i za sada se kreće do približno 20 metara. Pored visokih mehaničkih svojstava, zavareni spoj ima glatku površinu i dodatna mehanička obrada u velikom broju slučajeva nije potrebna. Istovremeno, kod postupka FSW, uopšte nema gubitka materijala, što je važna karakteristika i prednost u odnosu na mnoge druge postupake zavarivanja. Sa tog aspekta je postupak FSW izuzetno ekonomičan. Postupak FSW je najprije testiran na aluminiju kao materijalu koji se u savremenoj industriji veoma mnogo koristi ali kod koga se tradicionalnim postupcima teško dobijaju kvalitetni spojevi zbog izražene pojave poroznosti šava i distorzije djelova. Obje pojave su veoma štetne, zahtijevaju skupu dodatnu obradu kojom ne mogu potpuno da se otklone, a posebno su izražene kod limova [146].

4.1.8. TEHNOLOŠKI PARAMETRI PROCESA FSW

Fizička suština generisanja toplote i formiranja spoja kod procesa FSW je dosta slična kao kod običnog zavarivanja trenjem, pa su i osnovni parametri procesa slični, a to su: broj obrtaja alata (ugaona brzina okretanja alata), translatorna brzina alata (brzina zavarivanja) i aksijalna sila. Oni najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine lima, a njihove optimalne vrijednosti se, za sada, određuju isključivo eksperimentalno. Kao parametri procesa, određuju se i odgovarajući geometrijski parametri pojedinih elemenata alata (prečnik trna alata, prečnik čela alata i ugao nagiba trna alata) [146]. Pored ovih parametara značajni su i dubina prodiranja čela alata u materijal, kao i ugao nagiba ose alata [192].

4.1.8.1. Broj obrtaja i translatorna brzina alata

Postoje dvije brzine kretanja alata koje treba posmatrati kod postupka FSW. Ugaona brzina kojom se okreće alat i translatorna brzina koja određuje brzinu zavarivanja posmatranog materijala odnosno brzina zavarivanja (Slika 4.7). Ova dva parametra imaju veliki značaj kod postupka FSW. Oni moraju biti pravilno odabrani, da bi se obezbijedilo uspješno i efikasno odvijanje procesa FSW [192].

Odnos između brzine zavarivanja i toplotne energije u toku procesa zavarivanja je dosta složen, ali generalno se može reći, da će povećanje ili smanjenje brzine rezultirati hladnjim ili toplijim šavovima. U cilju da se dobije što bolji šav, potrebno je da materijal oko alata bude dovoljno zagrijan da omogući plastični protok materijala i smanji silu koja djeluje na alat. Ako alat nije dovoljno zagrijan, onda je moguće da se javljaju određene praznine ili druge greške koje mogu biti prisutne u zoni miješanja, a u ekstremnim

4. TEORIJSKE POSTAVKE

slučajevima može doći i do loma alata. Pretjeran unos toplote može biti štetan za konačan izgled šava, jer može doći do topljenja materijala. Broj obrtaja tokom odvijanja procesa FSW je konstantan i kreće se u širokim granicama od 100 o/min do 2000 o/min, dok je za neke materijale i veći.

Translatorna brzina je istovremeno i brzina zavarivanja i ona zavisi od mehaničkih svojstava i debljine materijala limova. Na primjer, kod običnog aluminijuma debljine 2 mm može da iznosi i do 2000 mm/min, ali kod visoko kvalitetnih legura, brzina zavarivanja je mnogo manja i kreće se oko 125 mm/min. Brzina zavarivanja je konstantna i najčešće se određuje iz odnosa:

$$\frac{v}{\omega \cdot r}, \quad (4.1)$$

gde je v - translatorna brzina (brzina zavarivanja), r - poluprečnik trna alata i ω - njegova ugaona brzina. Taj odnos se obično kreće u granicama od 0,01 do 0,02. Na primjer, pri zavarivanju limova legure aluminijuma 6061-T6 (USA standard) debljine 6,4 mm, najbolji rezultati su dobiveni za odnos 0,015. Alat je imao trn poluprečnika 3,25 mm, rotirao je sa 400 o/min, a translatorna brzina lima je bila 120 mm/min [146].

4.1.8.2. Sile zavarivanja

Sile koje djeluju na alat tokom procesa FSW su: vertikalna ili aksijalna, uzdužna ili longitudinalna i bočna sila.

Vertikalna sila - F_z je potrebna da održi poziciju alata i materijal ispod površine. Neke mašine za zavarivanje postupkom FSW rade pod kontrolom opterećenja, ali u mnogim slučajevima vertikalni položaj alata je unaprijed postavljen i tako će se razlikovati opterećenja tokom zavarivanja. Vertikalna (aksijalna) sila kod procesa FSW je u stvari sila kojom alat deluje na materijal. Ona je najveća u početnom periodu prodiranja trna kroz materijal, a zatim se smanjuje, dok čelo alata ne dohvati gornju površinu materijal koji se zavaruje. Tada ponovo počinje da raste dok se ne dostigne određena temperatura kad počinje da opada i zadržava svoju konstantnu vrijednost sve do završetka procesa FSW. Međutim, za razliku od rotacionog zavarivanja trenjem, veličina aksijalne sile kod postupka FSW mnogo je manja, zbog načina generisanja topline, ona ne zavisi od površine zavarivanih djelova. Ona zavisi od svojstava materijala zavarivanih djelova i geometrijskih karakteristika trna i čela alata i može da se kreće do 200 kN. Kako je komponenta vertikalne sile dominantna kod procesa FSW, ona se često naziva i sila zavarivanja - F_z .

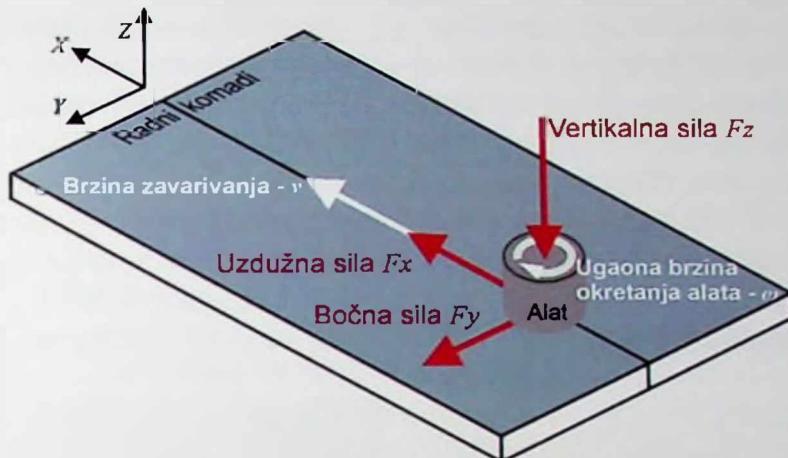
Uzdužna - F_x ili longitudinalna sila djeluje paralelno smjeru kretanja alata, a pozitivan smjer se definiše sa smjerom kretanja alata. Budući da se ova sila javlja kao posledica otpora materijala kretanju alata, može se očekivati da će ova sila ako se smanji temperatura materijala oko alata biti veća.

Bočna sila - F_y može da djeluje normalno na pravac kretanja alata i pozitivan smjer se definiše ka istosmjernoj strani šava.

U cilju sprečavanja loma alata i smanjivanja pretjeranog habanja alata, proces FSW, treba da bude takav da sila koja djeluje na alat, bude, što je moguće niža i da se nagle promjene izbjegnu. Kako bi se našla najbolja kombinacija parametara zavarivanja postupkom FSW, mora se postignuti kompromis, jer uslovi koji favorizuju niske sile (npr.

visok unos topline, mala brzina zavarivanja) mogu biti nepoželjni sa stanovišta produktivnosti i kvaliteta šava.

Na Slici 4.7 dat je prikaz sila koje djeluju tokom odvijanja procesa FSW.



Slika 4.7. Prikaz sila F_x , F_y i F_z , kao i brzina v i ω

4.1.8.3. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW

Dizajn alata je kritičan faktor koji može da utiče na poboljšanja, kvalitet šava i maksimalnu brzinu zavarivanja. Poželjno je da materijal koji se koristi za izradu alata posjeduje dovoljnu čvrsoću i tvrdoću na temperaturi zavarivanja. Dalje bi trebalo da ima dobru otpornost na oksidaciju i nisku toplotnu provodljivost da bi se smanjio gubitak topline i toplotna oštećenja na mašinama. Materijal za izradu alata čelik AISI H13 se pokazao prihvatljivim za zavarivanje legura aluminijuma za debljine od 0.5 mm do 50 mm, ali i više naprednih alatnih materijala poput raznih čelika ili titanijuma [192].

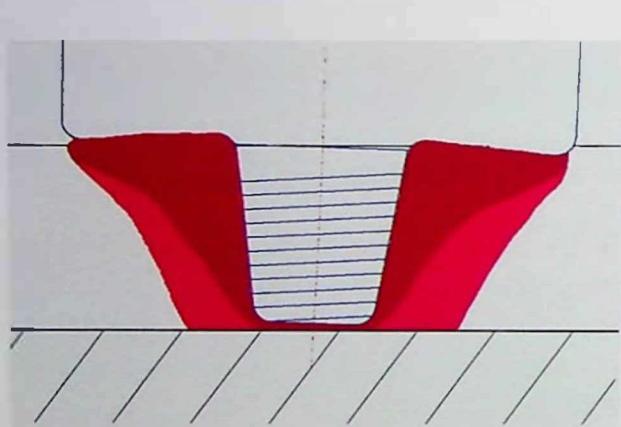
Poboljšanja u konstrukciji alata su pokazala velika unapređenja produktivnosti i kvaliteta. Institut za zavarivanje TWI je razvio specijalno konstruisane alate i na taj način povećao debljinu ploča koje mogu da se zavaruju. Primjer je spirala (*whorl*) koja ima zašiljen trn alata gdje se postiže bolji protok materijala. Dodatne konstrukcije alata uključuju *Trifluete* i *Trivex* seriju. *Trifluete* je složen sistem od tri zašiljena trna alata sa zavojnicom, koji poboljšavaju kretanje materijala oko alata, odnosno omogućavaju bolje miješanje materijala. *Trivex* serija koristi jednostavnije necilindrične trnove alata, koji doprinose smanjenju sila koje djeluju na alat [192].

Većina alata imaju konkavan profil čela alata, koji sprečava da materijal koji je izašao usled prodiranja trna alata ostane ispod čela alata. *Trifluete* serija alata koristi alternativni sistem sa nizom koncentričnih žlebova koji su namijenjeni da proizvedu dodatno kretanje materijala u gornjim slojevima šava [192].

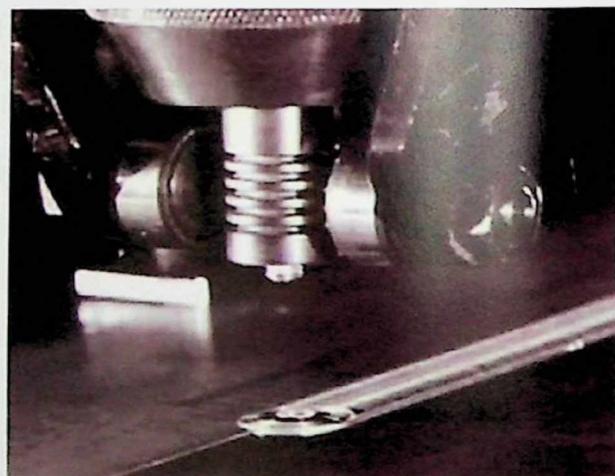
4.1.8.4. Ugao nagiba i dubina prodiranja čela alata

Dubina prodiranja je definisana kao dubina najniže tačke čela alata ispod površine zavarivanih ploča i utvrđeno je da je ovaj parametar kritičan za obezbjeđivanje kvaliteta šava. Prodiranje ispod površine materijala povećava pritisak ispod alata, a to može dovesti do zakrivljenja ose alata od 2° do 4° , kao što je prikazano na Slici 4.8. Dubina

prodiranja mora biti pravilno podešena, jer mora da se obezbijedi neophodni silazni pritisak, ali i da se obezbijedi da alat ne prodire previše u materijal koji se zavaruje. Sa druge strane prečerano prodiranje može da dovede da trn alata prodre kroz radne komade u oslonu ploču, što može dovesti do loma trna alata ili do lošeg kvaliteta šava. Ovaj problem je prevaziđen tako što su konstruisane mašine sa hidrauličnim podešavanjem položaja čela alata, kojima se ostvaruje odgovarajući pritisak na ploče koje se zavaruju. Na ovaj način se kontroliše dubina prodiranja u materijal i sprečava se pojava deformacija ispuštenja ploča u blizini metala šava. Na Institutu za zavarivanje TWI, dizajniran je mehanički sistem upravljanja za kontrolu i održavanje položaja čela alata u odnosu na površinu materijala. Sistem se sastoji od dva valjka koja su postavljena pored alata, a oni obezbeđuju da alat na prodre previše u materijal i na taj način omogućavaju kvalitetno zavarivanje [86, 192]. Na Slici 4.9 dat je prikaz sistema za kontrolu dubine prodiranja čela alata.



Slika 4.8. Prodiranje čela alata u materijal i ugao nagiba ose alata [192]



Slika 4.9. Sistem za kontrolu dubine prodiranja čela alata u materijal koji se sastoji od dva pomoćna valjka [86]

4.1.9. TEČENJE MATERIJALA

Tečenje materijala oko alata je složen proces i različito se manifestuje za različite legure. Razlikuje se od osnovnog materijala kada se posmatra kroz mikroskop. Postoji više modela koji objašnjavaju kretanje materijala oko alata.

Rotacioni alat izvlači malo ili nimalo materijala oko i ispred trna i prolazi dolje sa obje strane. Nakon što je prošao iza trna alata, vrši se pritisak od strane samog nedeformisanog materijala i materijal se ponovo sjedinjuje i spaja. Preko spoja prolazi zadnji dio čela alata sa velikom vertikalnom silom koja djeluje na materijal [192].

Alternativna teorija smatra da neki materijal rotira oko trna alata, za najmanje jednu rotaciju i to je materijal koji proizvodi pokret odnosno luk-prsten (*onion-ring*) u strukturi zone miješanja [192]. Istraživači su koristili kombinaciju tankog bakra i tehniku zamrznutog trna alata. Alat bi se brzo zaustavio u mjestu, tako da je zaključeno da kretanje materijala dolazi iz dva procesa [192]:

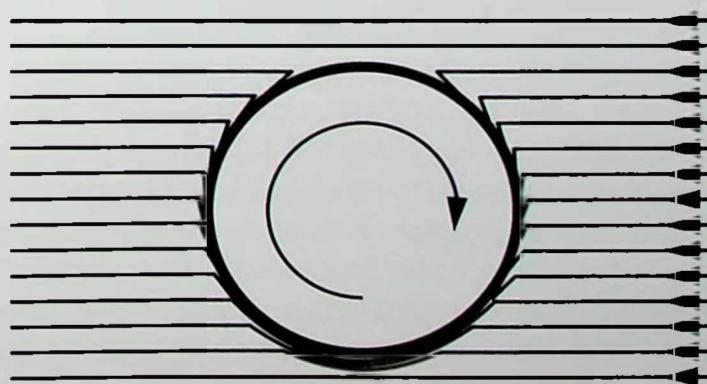
1. Materijal sa istosmjerne prednje strane šava ulazi u zonu koja rotira i napreduje ka trnu alata. Ovaj materijal je vrlo deformisan i zaustavlja se iza trna alata u obliku luka, kada se gleda odozgo. Konstatovano je da je bakar ušao u zonu oko trna alata, gdje je razbijen na fragmente (male djelove). Ovi fragmenti materijala su pronađeni samo u obliku luka iza alata.

2. „Svetli“ - „lighter“ materijal je došao iz suprotnosmjerne prednje strane trna alata i vukao ga je okolo do zadnjeg dijela alata. Ovi djelovi materijala su popunili praznine između lukova sa istosmjerne strane materijala. Materijal nije rotirao oko trna alata i ima manje deformacije što rezultira zrnom veće veličine. Osnovna prednost ovog objašnjenja je da daje prihvatljivo objašnjenje za formiranje tzv. luk-prsten strukture [192].

Kod procesa FSW postoji primarna i sekundarna komponenta tečenja materijala. Primarno tečenje se odnosi na tečenje materijala oko trna alata, slično je laminarnom kretanju tečnosti oko rotirajućeg cilindra. Da bi se dobio zavareni spoj bez grešaka, mora biti dovoljna količina materijala prenesena od strane rotirajućeg trna, oko suprotnosmjerne strane, prema zadnjem dijelu alata na istosmjernoj strani metala šava.

Alat treba da bude dizajniran tako da trn gura materijal na dolje, prema korijenu metala šava, prouzrokujući na taj način vertikalnu komponentu protoka materijala. Ovo je moguće ostvariti konstrukcijom zavojnice na trnu. Dodatno, vertikalno pomjeranje materijala, cirkulacijom oko uzdužne ose metala šava, nastaje rotacijom čela alata. Materijal, koji se prvobitno nalazio na suprotnosmjernoj strani, blizu lica metala šava, završava na licu metala šava istosmjerne strane, dok materijal, koji se nalazio blizu lica metala šava na istosmjernoj strani kreće se, dolje, prema srednjoj ravni ploče koja se zavaruje. Važnost ovog sekundarnog tečenja materijala se smanjuje sa povećavanjem debljine ploča koje se zavaruju. Kod veoma debelih ploča tečenje materijala je gotovo potpuno završeno od strane trna, osim za tanku oblast blizu lica metala šava [109, 168].

Na Slici 4.10 prikazana je dvodimenzionalna šema tečenja materijala oko trna alata u toku procesa FSW [109, 168].



Slika 4.10. Prikaz tečenja materijala oko trna alata u toku procesa FSW [109]

Kod procesa FSW javljaju se dva tipa grešaka: manjak penetracije korjene strane metala šava i „tunel“ efekat na istosmjernoj strani metala šava.

Manjak penetracije korjene strane metala šava je obično rezultat većeg rastojanja izmedju podloge i donjeg dijela trna alata. Kada je rastojanje veliko, materijal na graničnoj površini korjene strane šava, nije dovoljno deformisan da bi se eliminisala

4. TEORIJSKE POSTAVKE

linija veze između zavarivanih radnih komada, jer je prisutno slabo difuziono vezivanje. Manjak penetracije nije zapreminska greška, pa se ne može otkriti radiografskim postupkom, već ultrazvučnim uređajima visoke osjetljivosti. Posledica manjka penetracije je smanjenje zatezne čvrstoće zavarenog spoja i prisustvo prslina kroz „grumen” zonu metala šava. Potrebna minimalna razdaljina između vrha alata i korjene strane metala šava zavisi od legure, geometrije alata i kinematskih parametara zavarivanja [23].

Postojanje „tunel” efekta je rezultat nedovoljnog tečenja materijala oko trna alata do istosmjerne strane. „Tunel” efekat najčešće nastaje kada alat napreduje velikom brzinom [23]. „Tunel” efekat je zapreminska greška koja se može otkriti na radiogramu ili metalografskom analizom poprečnog presjeka zavarenog spoja. Zbog ponovljive prirode procesa FSW „tunel” efekat je neprekidan, ako je prisutan, a može se izbjegći pravilnom izborom geometrije alata i kinematskih parametara zavarivanja.

4.1.10. GENERISANJE TOPLOTE

Za proces FSW, generalno gledano, poželjno je da se poveća brzina zavarivanja i minimizira unos toplote, jer će to vjerovatno povećati produktivnost i smanjiti uticaj zavarivanja na mehaničke osobine šava. Istovremeno, neophodno je obezbijediti da je temperatura oko alata dovoljno visoka da dozvoli adekvatan protok materijala i sprijeći nedostatke u procesu zavarivanja ili loma alata.

Kada je brzina zavarivanja veća, za dati unos toplote, ima manje vremena da se ta toplota sproveđe ispred alata i toplotni gradijent bude veći. U nekom trenutku će se desiti da je trenutna brzina zavarivanja toliko velika da se materijal ispred alata neće dovoljno zagrijati, tako da se ne može obezbijediti dovoljan protok materijala oko trna alata, što dovodi do lošeg kvaliteta šava ili do loma alata. Ako je unos toplote preveliki onda postoji mogućnost da se poveća brzina, a samim tim i poveća produktivnost.

Proces zavarivanja se može podijeliti u nekoliko faza tokom kojih će protok toplote biti različit.

- ◆ **Faza zadržavanja - *Dwell*.** Rotacioni alat se koristi da bi se postigla dovoljna temperatura ispred alata i zagrijao materijal koji je u stacionarnom stanju. Na taj način se omogućava njegovo uzdužno kretanje. Ova faza može da sadrži i prodiranje alata u površinu radnog komada [192].
- ◆ **Faza prelazanog zagrijavanja - *Transient heating*.** Kada alat počinje da se kreće, nastaje prelazni period u procesu stavaranja toplote. Generacija toplote oko alata doveće na kompleksan način do postizanja nepromjenjivog stanja [192].
- ◆ **Faza prividno nepromjenjivog stanja - *Pseudo steady-state*.** Iako će se oscilacije u generaciji toplote pokazati na termalnom polju oko alata, ono će ostati konstantno barem po makroskopskoj skali [192].
- ◆ **Faza post nepromjenjivog stanja - *Post steady-state*.** Dodatno zagrijavanje alata može se desiti od toplote koja se „reflektuje” od strane materijala na kraju procesa zavarivanja [192].

Stvaranje toplote u toku procesa FSW, proizilazi iz dva osnovna izvora: trenjem na površini alata i deformacije materijala oko alata. Često se prepostavlja da se najveća

količina toplote generiše pod čelom alata zbog veće površine i treba da bude jednaka snazi koja je potrebna da prevaziđe silu kontakta između alata i materijala.

Stanje kontakta ispod čela alata može biti opisano preko trenja klizanja - *sliding* i trenja ljepljenja - *sticking*.

Kod trenja klizanja koristi se μ - koeficijenat trenja i P - međupovršinski pritisak, a kod trenja ljepljenja se na osnovu međupovršinskih smicanja τ na odgovarajućoj temperaturi koristi i brzina deformacije. Matematičke aproksimacije za ukupnu toplotu koju generiše čelo alata Q_{ukupno} su razvijene korišćenjem oba modela trenja klizanja i ljepljenja. U izrazu (4.2) data je ukupna toplota koja se generiše za slučaj trenja klizanja, a u izrazu (4.3) data je ukupna toplota koja se generiše za slučaj trenja ljepljenja [192].

$$Q_{ukupno} = \frac{2}{3} \pi \cdot P \cdot \mu \cdot \omega \cdot (R_{čeloalata}^3 - r_{imalata}^3). \quad (4.2)$$

$$Q_{ukupno} = \frac{2}{3} \pi \cdot \tau \cdot \mu \cdot \omega \cdot (R_{čeloalata}^3 - r_{imalata}^3). \quad (4.3)$$

Gdje je: ω - ugaona brzina okretanja alata, $R_{čeloalata}$ - poluprečnik čela alata i $r_{imalata}$ - poluprečnik trna alata. Velike teškoće u primjeni ovih jednačina su određivanje koeficijenta trenja ili međupovršinskih smičućih napona. Ovi parametri se koriste prilikom modeliranja, jer daju razumne vrijednosti temperaturnog polja [192].

4.1.11. METALURŠKE TRANSFORMACIJE

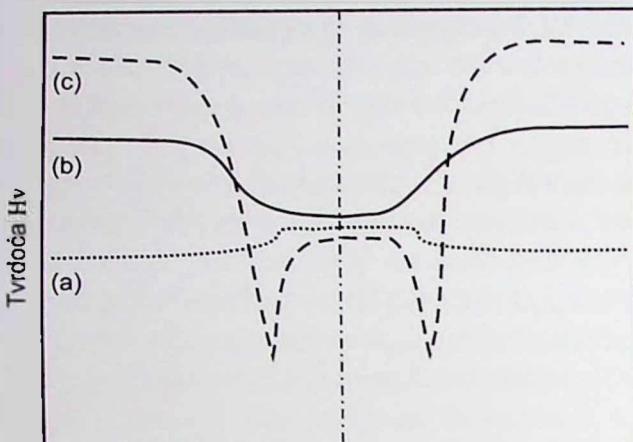
Metalurške transformacije koje se dešavaju u oblasti zavarivanja legura aluminijuma postupkom FSW su od velike važnosti, jer one upravljaju osobinama zavarenog spoja [47, 81, 168]. Transformacije koje se dešavaju u legurama koje ne ojačavaju termičkim taloženjem su jednostavnije nego one koje se dešavaju u legurama koje ojačavaju termičkim taloženjem. Dobar primjer su legure serije 5XXX Al-Mg, koje ne ojačavaju termičkim taloženjem, odnosno koje se dobijaju ili potpunim kaljenjem (O-tvrdića) ili ojačavanjem deformacijom (HXXX). Kada zavarujemo materijal O-stepena tvrdoće postupkom FSW, tvrdoća u oblasti metala šava može biti ili identična tvrdoći osnovnog materijala ili malo veća. Ovo povećanje tvrdoće u oblasti „grumen“ zone nastaje zbog formiranja finozrne strukture. Kada zavarujemo legure koje ojačavaju deformacijom (npr. H113), tvrdoća metala šava je manja u odnosu na osnovni materijal. Zapravo postupak FSW djeluje lokalno kao žarenje, smanjući broj dislokacija i tvrdoću u oblasti metala šava [168].

Na Slici 4.11 dati su dijagrami tvrdoće u presjeku zavarenog spoja za različite tipove legura zavarene postupkom FSW [168].

(a) - Tipično za čist materijal ili legure koje ne ojačavaju termičkim taloženjem: malo povećanje tvrdoće u oblasti „grumen“ zone metala šava.

(b) - Tipično za legure koje ojačavaju deformacijom: malo smanjenje tvrdoće u oblasti „grumen“ zone metala šava.

(c) - Tipično za legure koje ojačavaju termičkim taloženjem: karakterističan „W“ oblik dijagrama tvrdoće sa najmanjom vrijednošću u oblasti izvan „grumen“ zone [168].



Položaj u odnosu na liniju spajanja

Slika 4.11. Šematski prikaz tvrdoće postupka FSW za različite tipove legura aluminijuma [168]

Kod zavarivanja postupkom FSW, legura koje su ojačane termičkim taloženjem, metalurške transformacije, osobine metala šava i zone uticaja topote su kompleksnije. U oblasti „grumen“ zone metala šava ojačanje termičkim taloženjem obično nije prisutno. Ovo je posmatrano u legurama serija 7XXX, 2XXX i 6XXX [116]. Odsustvo taloga je pokazatelj izvršenog termo-mehaničkog režima u „grumen“ zoni metala šava. U zoni uticaja topote, bliže „grumen“ zoni, prisutno je ogrubljavanje taloga: broj čestica je velikim dijelom smanjen, a prečnik je povećan. Sa povećanjem razdaljine od „grumen“ zone, broj krupnih čestica se smanjuje i ponovo je prisutna mikrostruktura osnovnog materijala. Posmatrano od centra metala šava do strukture osnovnog materijala dobijamo dijagram tvrdoće "W" oblika, karakterističan za proces FSW. aluminijumskih legura ojačanih termičkim taloženjem. Minimalna oblast tvrdoće obično odgovara materijalu izvan „grumen“ zone metala šava, odnosno zone uticaja topote. Zona „grumena“ je na nivou tvrdoće između zone uticaja topote i osnovnog materijala. Efekti starenja posle zavarivanja za legure 6063 i 7050, doveli su do saznanja da se tvrdoća „grumen“ zone može približiti vrijednosti osnovnog materijala sa odgovarajućim tretmanom starenja posle zavarivanja. Tvrdoća u oblasti izraženog starenja (oblasti sa najmanjom tvrdoćom u zavarenom spoju) ne može biti povećana do nivoa tvrdoće osnovnog materijala. Tvrdoća na bilo kojoj strani metala šava se povećava povećanjem brzine zavarivanja. Visoke brzine zavarivanja teže povećanju tvrdoće „grumen“ zone (pri većoj brzini zavarivanja manji je unos topote u zonu miješanja materijala, a time i veća brzina hlađenja, pa dobijamo sitnozrnu strukturu metala šava) [168].

4.1.12. MEHANIČKE OSOBINE ZAVARENOG SPOJA

4.1.12.1. Osobine zatezanja

Zavareni spoj dobijen postupkom FSW, može da se kontroliše na više načina. Poslije vizuelne kontrole, najčešće se vrši ispitivanje na poprečno zatezanje (pravac opterećenja normalan na pravac zavarivanja). Zavareni spojevi dobijeni postupkom

FSW su heterogeni, pa granica tečenja i procentualno izduženje nijesu mnogo značajne kao osobine zavarenog spoja. Deformacija postaje neravnomjerna čim najslabiji dio zavarenog spoja počne da se isteže. Razvijene su tehnike za mjerjenje lokalnih deformacija i lokalne elastičnosti heterogenog materijala zavarenog spoja. Utvrđeno je da je materijal u zoni uticaja toplove i „grumen“ zoni, kod postupka FSW veoma elastičan [168].

Kod legura ojačanih taloženjem javljaju se naponi lokalizovani u zoni uticaja toplove - HAZ na istosmjernoj i suprotnosmjernoj strani metala šava. Zbog lokalizacije napona u HAZ zoni većina zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW će pući u ovoj zoni kada se optereti poprečnim zatezanjem sve dok su prisutni zavareni spojevi bez grešaka [129, 168].

4.1.12.2. Žilavost loma

Rezultati o žilavosti loma metala šava dobijenog postupkom FSW uglavnom se odnose na eksperimentalno dobijene R - krive. Vrlo mali broj rezultata se odnosi na faktor inteziteta napona K_I , kada je naprezanje normalno na prslinu i kritičnu vrijednost faktora inteziteta napona K_{Ic} . R - krive pokazuju da je metal šava, dobijen postupkom FSW, boljih osobina u odnosu na osnovni materijal, posebno za legure koje su zavarene blizu ili u najvišim starosnim uslovima [168].

4.1.12.3. Zamor materijala

Kada su u pitanju konstrukcije sa velikom tačnošću dimenzija, svojstva ponašanja zamorne prsline i otpornost materijala na zamor su od ključnog značaja kod spojeva dobijenih postupkom FSW. Većina dostupnih podataka o zamoru materijala FSW spojeva su u obliku $S-N$ krive [168].

Kod zavarivanja legure aluminijuma 2024-T3 postupkom FSW izvršeno je testiranje na zamor materijala u bočnom i longitudinalnom pravcu sa cikličnim opterećenjem zatezanje - zatezanje ($R=0.1$). U *as-welded* uslovima testiranje na uzorcima u oba pravca su pokazala značajno smanjenje otpornosti materijala na zamor, 50 % manje u odnosu na osnovni materijal. Međutim, kada se ukloni sloj materijala debljine 0.5 mm sa površine korjena i lica metala šava, otpornost materijala zavarenog spoja na zamor je približno jednaka osnovnom materijalu. Kod zavarenih spojeva postupkom FSW kod kojih nijesu mašinski otklonjene površinske neravnine, tanka ivica materijala koja nastaje na istosmjernoj strani lica metala šava predstavlja mjesto koncentracije napona i tu nastaje zamorna prsina kod opterećenja u bočnom pravcu. Kod opterećenja u longitudinalnom pravcu za uzorake koji nijesu mašinski obrađivani, mjesto nastanka zamorne prsline je uvijek na jednom od polukružnih otisaka alata na licu metala šava. Kada se uklone polukružni otisci alata i ivica, zamorna prsina kod bočno opterećenih uzoraka nastaje u oblastima minimalne tvrdoće odnosno u zoni HAZ, dok zamorna prsina kod longitudinalno opterećenih uzoraka može nastati pod istim uslovima kao kod osnovnog materijala [168].

Utvrđeno je da zavareni spojevi debljine 1.6 mm i 4 mm kod legure aluminijuma 2024-T6 dobijeni većim brzinama zavarivanja imaju veću otpornost prema cikličnim opterećenjima (otpornost na zamor materijala). Ovo je dovedeno u vezu sa činjenicom

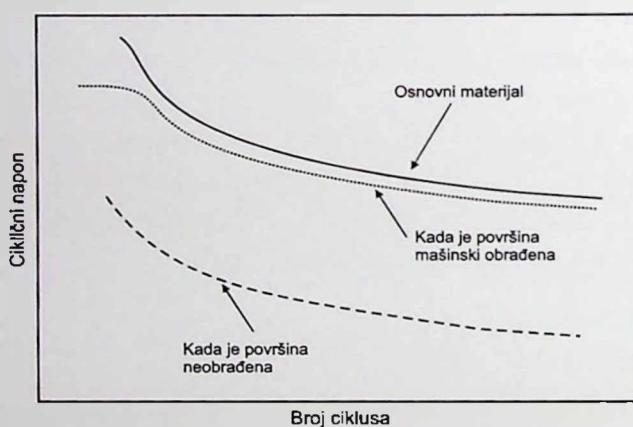
4. TEORIJSKE POSTAVKE

da zavareni spojevi dobijeni većim brzinama zavarivanja imaju veću tvrdoću u oblastima minimalne tvrdoće za HAZ i „grumen“ zonu.

Generalno gledano, dinamička čvrstoća spojeva dobijenih postupkom FSW, zavisi od koncentracije napona i prisustva oblasti slabe tvrdoće u zoni uticaja toplote. Podaci pokazuju da efekti koncentracije napona koji potiču od FSW procesa mogu biti eliminisani mašinskom obradom posle zavarivanja. Minimalna tvrdoća u zoni uticaja toplote zavarenog spoja dobijenog postupkom FSW ne može biti eliminisana, ali se može ublažiti povećanjem brzine zavarivanja [168].

Na Slici 4.12 prikazana je zavisnost cikličnog napona od broja ciklusa:

- ◆ za osnovni materijal,
- ◆ kada je površina mašinski obrađena i
- ◆ kada je površina neobrađena.



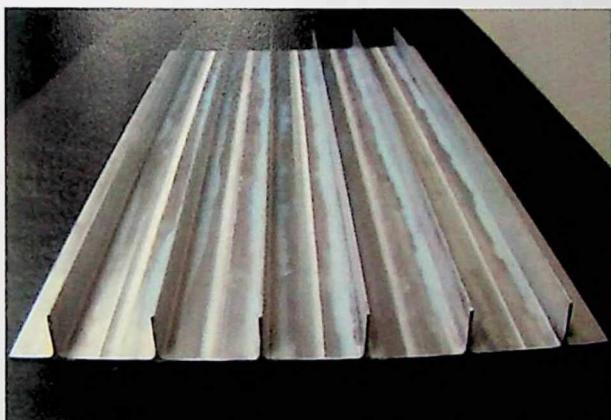
Slika 4.12. Prikaz otpomosti na zamor spojeva zavarenih postupkom FSW [168]

4.1.12.4. Zaostali naponi

Zaostali naponi se javljaju kod svih procesa zavarivanja, pa i kod procesa FSW. Istraživanja koja su sprovedena o nastanku i rastu prslina kod zavarenih spojeva postupkom FSW, koji su bili izloženi zamoru, pokazuju da zaostali naponi imaju veliki uticaj na nastanak i rast prslina u zavarenom spaju. Zaostali naponi u zavarenom spiju se mogu mjeriti korišćenjem x - zraka ili neutronskom difrakcijom. Prva mjerena zaostalih napona zavarenih spojeva postupkom FSW, izvedena su korišćenjem x - zraka. Ova mjerena su izvršena na zavarenim spojevima legura 2219, 7050 i C458, gdje su se dobijene vrijednosti kretale oko 50 MPa. Ovi rezultati koji su određeni tehnikom x - zraka se primjenjuju na materijalu u blizini površine matala šava. Kasnija mjerena pomoću neutronske difrakcije, kod zavarenog spaja legure 2024-T3 debljine 7 mm pokazala su veće vrijednosti. U „grumen“ zoni zaostali naponi u longitudinalnom pravcu kretali su se od 75 MPa do 105 MPa, a u bočnom pravcu su bili manji, skoncentrisani u zoni zavarivanja. Mjerena zaostalih napona kod legure 7108-T79 u longitudinalnom pravcu su pokazala još veće vrijednosti od preko 140 MPa. Ova mjerena su pokazala da zaostali naponi koji se javljaju u zavarenim spojevima dobijenim postupkom FSW, imaju mnogo manje vrijednosti od zaostalih napona u zavarenim spojevima koji su dobijeni nekim od postupaka topljenjem materijala [168].

4.1.13. PRIMJENA POSTUPKA FSW

Primjena zavarivanja postupkom FSW u industriji počela je najprije u fabrici „SAPA“ u Švedskoj i to za izradu jednostavnih platformi od aluminijuma kod brodskih uređaja za zamrzavanje ribe. Kasnije je u ovoj fabrići razvijena čitava serija automatizovanih mašina za proces FSW. Brodogradnja je dakle prvi sektor u kome je postupak FSW dobio svoju punu primjenu. U ovoj industrijskoj grani postupak FSW se koristi u izgradnji paluba (Slika 4.13), bokova broda, podova, pregrada, konstrukcije broda, jarbola, čamaca za jedrenje itd., zaključno sa platformama za slijetanje helikoptera na brodovima. Poslednjih godina postupak FSW, se intenzivno koristi u proizvodnji željezničkih vagona, vagona cistijerni, putničkih vagona, tramvaja, teretnih vagona, tijela kontejnera, itd. Pri izradi vozova nove generacije postupak FSW se koristi pri zavarivanju: noseće konstrukcije, stranica voza, krovova, podova (Slika 4.14) i mnogih drugih elemenata koji se izrađuju od legura aluminijuma. Umjesto tradicionalnih postupaka zavarivanja, sada se u željezničkoj industriji koristi isključivo postupak FSW [132, 146, 191].



Slika 4.13. Zavarivanje palube broda korišćenjem postupka FSW [191]



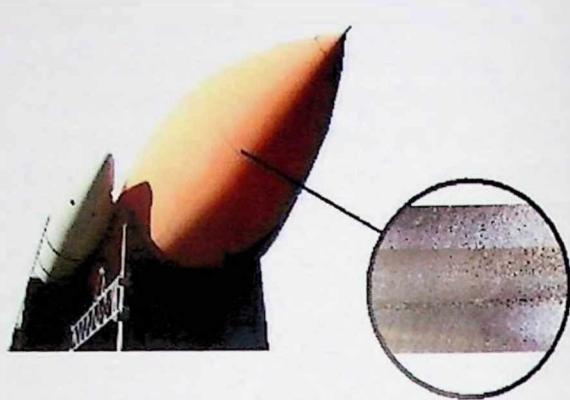
Slika 4.14. Proizvodnja poda željezničkih vagona korišćenjem postupka FSW [191]

Dobre karakteristike i visoka pouzdanost zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW došle su do izražaja u izradi velikog broja različitih djelova u avio i svemirskoj industriji. Kod Spejs Šatla spojevi spoljašnjih rezervoara za gorivo od nedavno se rade isključivo postupkom FSW. Ovo omogućuje da se ovi rezervoari rade od specijalnih legura Al-Li 2195, čime se njihova masa smanjila za više od tri tone. U avio industriji preko 40.000 zakivaka zamijenjeno je spojevima izvedenim postupkom FSW, sa tendencijom daljeg rasta. Kada su u pitanju visoko odgovorni spojevi, obično se koristi postupak FSW. Kako je postupak FSW visoko produktivan, vrijeme izrade rezervoara za gorivo kod Delta programa u fabrikama Boing je skraćeno sa 23 na 6 dana, a ukupni troškovi su smanjeni za 60% [146].

Primjeri primjene postupka FSW, u avio i svemirskoj industriji dati su na Slici 4.15 i Slici 4.16.



Slika 4.15. Zavarivanje trupa aviona konačenjem postupka FSW [191]



Slika 4.16. Zavarivanje rezervoara rakete konačenjem postupka FSW [191]

Zavarivanje postupkom FSW, koristi se i u nekoliko vodećih svjetskih automobilskih kompanija. Cilj je da se proizvedu vozila manje težine, čime se povećava njihova nosivost i smanjuje potrošnja goriva, pa se i smanjuje zagađenje životne sredine. Ovaj postupak zavarivanja se koristi pri izradi: motora i šasija, felni, veze sa hidrauličnim cijevima, karoserija, tijela kamiona, cistijerni za gorivo, prikolica, autobusa i vozila za prevoz na aerodromima, okvira motocikala i bicikala, pri popravci automobila izrađenih od aluminijuma. Primjena u automobilskoj industriji je i kod proizvodnje bandaža. U firmi *Hydro Aluminium* (Norveška) zavaruje se tijelo bandaža izrađeno valjanjem, i glavčina, izrađena livenjem ili kovanjem. Na ovaj način smanjena je masa bandaža. U firmi *Shoma Aluminium & Rubber* (Japan) zavarene su vulkanizirane cijevi prečnika od 20 mm do 30 mm. Ove cijevi se koriste kod izrade amortizera za putničke automobile [132].

Zavarivanja postupkom FSW, koristi se i pri proizvodnji: kućišta elektromotora, rashladnih ploča, kuhinjske opreme, bijele tehnike, benzinskih rezervoara i plinskih boca, namještaja itd.

Primjenom postupka FSW, jednako dobri rezultati dobijeni su i pri spajanju limova od Cu, Zn, Mg i njihovih legura, zatim kod mnogih vrsta čeličnih limova ali i kod kombinacija različitih metala, kao što je Ti i čelik, kao i kod pojedinih kompozitnih materijala na bazi metalne matrice. Aluminijum, bakar, ugljenični i nisko legirani čelici i mnogi drugi metali zavaruju se postupkom u normalnim spoljašnjim uslovima. Ali kod zavarivanja čelika sa velikim sadržajem legirajućih elemenata, preporučuje se upotreba nekog od zaštitnih gasova u cilju sprečavanja štetnog uticaja spoljašnje atmosfere. Limovi od nisko ugljeničnog čelika i čelika sa 12% hroma debljine od 3 mm do 12 mm, mogu se uspješno zavarivati samo sa jedne strane. Limove debljine veće od 25 mm treba zavarivati dvostrano [146].

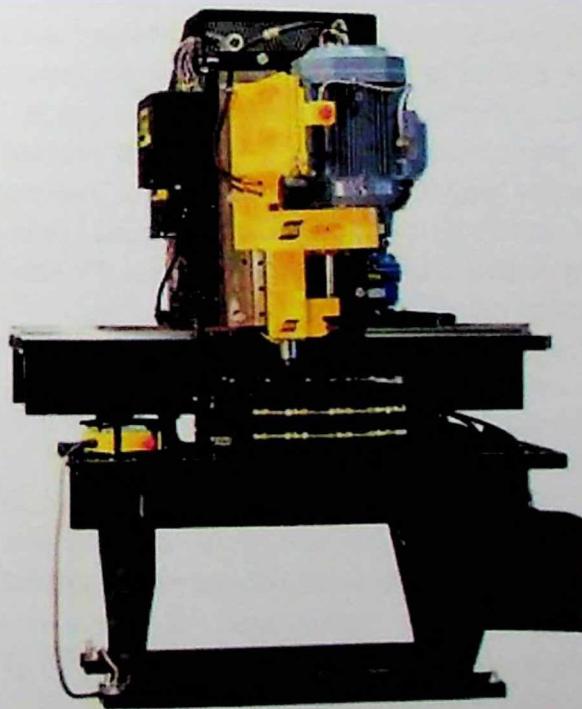
4.1.14. MAŠINE ZA ZAVARIVANJE

Mašine za zavarivanje postupkom FSW, najviše su razvijene u skandinavskim zemljama i u Japanu. Najveći broj patenata iz oblasti konstruktivnih izvedbi mašina ima u Japanu. Mašina za duge šavove razvijena od „ESAB“ (Švedska) (Slika 4.17), koristi

se u „*Marine Aluum Werft*“ (Norveška), za zavarivanje brodskih panela i za željezničke vagone. Ova mašina se koristi i za: teške profile, H-nosače, T-nosače i platforme; izrađuju se paneli dužine 6 m x 16 m i visine do 155 mm. Kod izrade nosača dužina je bez ograničenja, visina do 300 mm i širina do 400 mm. Materijali koji se zavaruju su Al legure, debljine od 1.6 mm do 15 mm. Legura aluminijuma (AA6082-T6) debljine 5 mm, zavaruje se brzinom od 0.7 m/min do 1.0 m/min. Mašina je u cijelini automatizovana [86, 132]. „ESAB“ proizvodi i mašine manjeg radnog prostora, od 1 m do 2 m (Slika 4.18). Poslednjih godina u TWI institutu izrađen je prototip mašine za zavarivanje sa radnim prostorom 3.3 m x 4.0 m x 1.5 m i brzinom zavarivanja od 1.7 m/min [132, 191].



Slika 4.17. Mašina za zavarivanje postupkom FSW,
za duge šavove proizvedena u „ESAB“-u



Slika 4.18. Manja mašina za zavarivanje postupkom FSW
proizvedena u „ESAB“-u

4.2. OSNOVE METODA KORIŠĆENIH KOD PROCESA FSW

Obrada metala pod dejstvom nekog alata ili „kalupa” je jedna od najstarijih tehnoloških metoda u obradi deformisanjem. Postoji dosta analogija obrade metala deformisanjem sa procesom FSW. Na primjer: kod slobodnog kovanja (sabijanja), metal se slobodno širi u pravcima normalnim na pravac sabijanja, dok kod sabijanja u kalupima metal pod dejstvom udara kovačkog čekića ili pritiskom prese ispunjava profilisani prostor (gravuru) izrađen u kovačkom alatu (kalupu). Kod procesa FSW, kovački čekić je u stvari alat za zavarivanje koji rotira oko svoje ose i pritska materijal, koji se pod uticajem alata sabija i deformiše. Za razliku od tehnoloških metoda iz obrade deformisanjem, kod procesa FSW je veoma teško odrediti, napone i deformacije, jer je izražen proces velikih deformacija materijala, odnosno pomjeranja tačaka (elementarnih djelića). Kod zavarivanja postupkom FSW razlikuju se dva karakteristična perioda procesa deformisanja materijala:

- ◆ kada alat ulazi (prodire) u materijal i
- ◆ kada se alat uzdužno pomjera duž linije spoja.

Početak prvog perioda je praćen deformisanjem materijala pod uticajem alata. Materijal počinje da se zagrijava usled trenja nastalog između alata i radnih komada. Kako alat prodire u materijal radnih komada, zbog uslova konstantnosti zapremine, višak materijala izlazi na površinu i gomila se po obodu sa suprotnosmjerne strane. Period ukopavanja alata u materijal je praćen malim deformacijama.

Drugi period se odnosi na deformisanje materijala kada alat počne uzdužno da se kreće. Alat u ovom slučaju nailazi na već zagrijan materijal, a djelići materijala se kreću oko rotirajućeg alata. Ovaj period je praćen velikim deformacijama materijala.

Izučavanje naponsko deformacionog stanja kod procesa FSW je jedino moguće uz korišćenje različitih metodoloških pristupa. Složenost problematike procesa FSW je uslovila da ne postoji opšte važeća metoda. Pojedine metode imaju veću ili manju pogodnost u rješavanju konkretnih zadataka, odnosno omogućavaju lakše i brže određivanje i analizu naponsko deformacionog stanja. Postavlja se pitanje sa kojim stepenom tačnosti je moguće odrediti napone i deformacije.

U ovom poglavlju će se dati osnovi metoda, koje su korišćene kod istraživanja procesa FSW, a to su: metoda optimizacije i numerička metoda (metoda konačnih elemenata - MKE).

4.2.1. METODA OPTIMIZACIJE

Teorija optimizacije obradnih i tehnoloških procesa predstavlja naučnu disciplinu koja proučava metode optimizacije raznovrsnih objekata u nauci i tehnici. Pojam optimizacije podrazumijeva u najopštijem slučaju metodologiju definisanja najpovoljnijeg rezultata ili rješenja za određene uslove.

Cilj optimizacije se iskazuje preko kriterijuma optimizacije (funkcije cilja), a ostvaruje se metodom optimizacije na objektu optimizacije. Objekata optimizacije ima

mnogo, a mogu biti neki procesi, tehnički sistemi i inženjerska ili uopšte ljudska djelatnost [150, 152].

Metodi optimizacije mogu se koristiti za optimizaciju svih navedenih objekata, ali su najčešće u primjeni kod obradnih ili tehnoloških procesa.

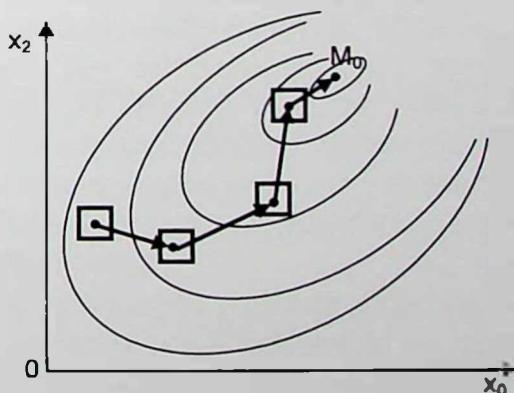
Nezavisno od tipa ili cilja (objekta) optimizacije, danas se svi poznati metodi optimizacije mogu podijeliti u dvije osnovne grupe. U prvu spadaju analitički, a u drugu eksperimentalni (ili adaptivni) metodi optimizacije [151].

Analitičke metode karakteriše postojanje funkcije cilja, dok su eksperimentalni metodi optimizacije posebno značajni, jer za njihovu primjenu nije potrebno poznavati matematički model funkcije cilja, što je prepreka kod analitičkih metoda, jer najčešće funkcija cilja nije poznata. Ovih metoda ima više, a najpoznatiji metod koji se najčešće koristi jeste: Boks-Vilsonov gradijentni metod [152].

4.2.1.1. Boks-Vilsonov gradijentni metod

Suština metoda je u razvijenom algoritmu sukcesivnih koraka, pomoću kojih se na brz način i sa relativno malo troškova vrši kretanje po gradijentnoj liniji ka optimalnoj oblasti i optimumu obradnog procesa. On predstavlja sintezu ortogonalnih plan-matrica prvog reda, kojima se matematički opisuje jedan mali dio površine reagovanja (Boks-Vilsonov metod) i klasičnog gradijentnog metoda [151, 152].

Operativni postupak po Boks-Vilsonovom gradijentnom metodu, tj. kretanje po gradijentnoj liniji do optimuma (M_0) procesa, sastoji se iz određenog broja sukcesivnih ciklusa (Slika 4.19).



Slika 4.19. Boks-Vilsonov gradijentni metod

Pojedini ciklusi imaju sledeću zajedničku strukturu:

1. Matematičko opisivanje jednog manjeg dijela površine reagovanja vrši se polinomnom funkcijom prvog stepena na osnovu realizovane plan matrice prvog reda:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i . \quad (4.4)$$

Koeficijenti regresije određeni su matricom:

$$B = (x' x)^{-1} x' y . \quad (4.5)$$

4. TEORIJSKE POSTAVKE

Broj ponavljanja eksperimenta zavisi od velicine polja šuma. Ako je ova greška mala, tj. ako su rezultati dovoljno stabilni i pouzdani, ponavljanje se izvodi u jednoj tački (centralnoj ili u tački sa najpovoljnijim rezultatom). U suprotnom ponavljanje treba izvesti u svim tačkama plana.

2. Definisanje gradijenata funkcije:

$$\Delta \hat{y} = \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} \right) = (b_1, b_2, \dots, b_k), \quad (4.6)$$

ili jediničnog vektora gradijenta:

$$\frac{\Delta \hat{y}}{|\Delta \hat{y}|} = \frac{\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} \delta_1 + \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \delta_2 + \dots + \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} \delta_k}{\left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.7)$$

a zatim jednačine prave linije (nosača vektora-gradijenta):

$$\begin{aligned} x_1 &= \lambda b_1 \\ x_2 &= \lambda b_2 \\ &\vdots \\ x_k &= \lambda b_k \end{aligned} \quad (4.8)$$

u odnosu na centralnu tačku ortogonalnog plana, pri čemu vrijednost parametra λ određuje korak uzastopnih tačaka na gradijentnoj liniji u okviru jednog ciklusa. Kako je jednačina koda faktora x_i :

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{w_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (4.9)$$

gdje je w_i - interval varijacije faktora x_i , a X_i - prirodna vrijednost faktora, to se dobija:

$$X_i - X_{0i} = \lambda b_i w_i, \quad (4.10)$$

odakle slijede koordinate prve tačke:

$$X_i^{(1)} = X_{0i} + \lambda b_i w_i, \quad (4.11)$$

odnosno h -te tačke:

$$X_i^{(h)} = X_{0i} + h \lambda b_i w_i, \quad (4.12)$$

u pravcu gradijentne linije ciklusa.

3. Veličina koraka $\lambda b_i w_i$ utiče na broj eksperimenata u ciklusu. Pri manjem koraku biće veći broj eksperimenata, ali pri suviše velikom koraku može da se preskoči optimum procesa. Imajući ovo u vidu, parametar λ se izračunava iz odnosa:

$$\lambda = \frac{\mu}{|b_\delta|}, \quad (4.13)$$

u kome je: $0 < \lambda < 1$ i b_δ - vrijednost onog koeficijenta regresije za koji proizvod $b_i w_i$ ima najveću vrijednost. Zatim slijedi eksperimentalno ispitivanje procesa u tačkama, sve dotle, dok se ne postigne najbolji rezultat. Tačkom sa najboljim rezultatom završava se posmatrani ciklus. Ova tačka se uzima za centralnu tačku ortogonalnog plana u narednom ciklusu, čija je struktura i postupak ispitivanja identičan prethodnom ciklusu.

Ciklusi se nastavljaju sve do onog trenutka kada svi koeficijenti regresije linearog modela postanu nesignifikantni, tj. kada se uđe u optimalno područje obradnog procesa, za koje je linearni model najčešće neadekvatan, pa se dalje preciznije utvrđivanje položaja optimuma u ovoj oblasti izvodi preko planova i modela drugog ili višeg reda [93, 150, 151, 152].

Može se dogoditi da na gradijentnoj trasi jedan ili nekoliko efekata modela prime vrlo male vrijednosti u odnosu na druge efekte. Mogući razlozi za to su:

a) Dotični faktori nijesu signifikantni, pa se poslije testiranja mogu isključiti iz dalje analize procesa, što pojednostavljuje i ubrzava analizu.

b) Vrijednosti faktora nalaze se u blizini svojih optimuma, pa se gradijentna trasa usmjerava u pravcu ostalih faktora.

c) Uzak interval varijacije faktora, pa je neophodna korekcija šeme kodiranja, odnosno intervala varijacije.

Optimizacija obradnih procesa može se vršiti i ako model sadrži ograničenja u obliku jednačina ili nejednačina. Neka ova ograničenja definišu oblast D. Mogu se razlikovati dva slučaja [150, 151, 152]:

1. Ako je položaj optimuma M_0 unutar oblasti D, tada se optimizacija vrši kao da nema ograničenja.
2. Ako je optimalni položaj M_0 van oblasti D tada se uslovni optimum nalazi na granici oblasti.

4.2.2. METODA KONAČNIH ELEMENATA - MKE

Numerički metod konačnih elemenata MKE (*Finite Element Method - FEM*) počinje da se pojavljuje 60-ih godina. Cilj primjene MKE u procesima zapreminskog deformisanja je predviđanje sile deformisanja kao i naponsko deformacione analize unutar deformacionog tijela i po njegovoj površini. Primjenom MKE, takođe može biti riješen i složen problem određivanja izmjene geometrije slobodne površine. MKE se može prilagoditi na komplikovanu geometriju deformisanih uzoraka kao i na razne granične uslove [161]. Odnosno, moguće je doći do informacija, koje su se ranije mogle dobiti samo eksperimentalnim putem.

Za razliku od ostalih numeričkih metoda koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina, metoda konačnih elemenata se zasniva na fizičkoj diskretizaciji objekta [79, 84, 138]. Umjesto elemenata beskonačno malih dimenzija, posmatraju se djelovi objekta konačnih dimenzija - konačni elementi. Sa stanovišta fizičke interpretacije, to znači da se posmatrani objekat kao kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode, zamjenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata, sa konačnim brojem stepeni slobode.

Suština aproksimacije kontinuum po metodu konačnih elemenata se sastoji u sledećem:

- ◆ Posmatrani objekat se dijeli na određeni broj elemenata konačnih dimenzija koji čine mrežu konačnih elemenata.
- ◆ Konačni elementi su međusobno povezani u konačnom broju tačaka koje se nazivaju čvorovi.

- Stanje u svakom konačnom elementu (npr. polje pomjeranja, deformacija, napona) opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima, koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine.
- Za analizu i proračun sistema konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe za klasične diskretne sisteme.

Prema načinu na koji se formulišu osnovne jednačine metoda konačnih elemenata postoje četiri osnovna vida MKE:

1. Direktni metod (*Direct Finite Element Method*) je analogan metodu deformacije u proračunu linijskih nosača i koristi se samo za jednostavnije probleme.
2. Varijacioni metod (*Variational Finite Element Method*) se zasniva na principu stacionarnosti funkcionala. Ovaj metod može se primijeniti i na složene objekte.
3. Metod reziduuma (*Residual Finite Element Method*) je opšti vid aproksimacije koji se zasniva na diferencijalnim jednačinama stanja posmatranog objekta.
4. Metod energetskog balansa (*Energy Balance Finite Element Method*) se zasniva na balansu različitih vidova energije i ima primjenu u termostatičkoj i termodinamičkoj analizi kontinuuma.

Od navedenih metoda u mehanici deformabilnog tijela, najveći značaj ima varijacioni metod i metoda reziduuma [79, 138].

Metodom konačnih elemenata se može rješavati veći broj problema iz različitih oblasti. Poslednjih godina naročito je karakterističan po razvoju i primjeni u različitim oblastima nelinearne mehanike kontinuuma, kao što su geometrijska i materijalna nelinearnost, dinamika konstrukcija, termodinamika, mehanika fluida, propagacije talasa, termičke obrade i dr. Svakako, najinteresantnija primjena ove metode je u oblasti obrade deformisanjem kod koje je izražena velika geometrijska i materijalna nelinearnost. U zavisnosti od modela materijalne nelinearnosti razlikuju se četiri vida metoda konačnih elemenata [65]:

1. Kruto-plastični MKE (*Rigid-plastic FEM*),
2. Kruto-viskoplastični MKE (*Rigid-viscoplastic FEM*),
3. Elasto-plastični MKE (*Elastic-plastic FEM*) i
4. Elasto-viskoplastični MKE (*Elastic-viscoplastic FEM*).

S druge strane, sa aspekta ponašanja materijala pri deformisanju postoje dvije formulacije metode konačnih elemenata, a to su:

1. Strukturna formulacija (*Structural Formulation*) koja analizira čvrsto deformabilno tijelo.
2. Formulacija tečenja (*Flow Formulation*).

MKE koristi matematičku postavku preko gotovog softverskog paketa DEFORM-3D, a u radu biće prikazan samo osnovni dio.

4.2.2.1. Teorijske osnove MKE u obradi deformisanjem

Za znatan dio procesa obrade deformisanjem koji su praćeni velikim deformacijama elastični dio je veoma mali u odnosu na plastični. U tim slučajevima je opravdano koristiti kruto-plastični model i time zanemariti elastični dio u matematičkoj formulaciji [176, 177].

Problem rješenja sistema jednačina teorije plastičnosti može biti postavljen kao problem ispitivanja na ekstremum funkcionala Φ_1 :

$$\Phi_1 = \int_V \sigma_u \dot{\varepsilon}_u dV + \lambda \int_V \dot{\varepsilon}_{kk}^2 dV - \int_S F_k v_k dS \quad (4.14)$$

gdje su:

σ_u - intezitet napona,

$\dot{\varepsilon}_u$ - intezitet brzine deformacije,

λ - Lagranžova konstanta,

F_k, v_k - polje napona i brzina koje djeluju na granici tijela.

Moguć je i drugi sa gledišta numeričke realizacije povoljniji postupak: umjesto funkcionala Φ_1 može se razmatrati drugi funkcional:

$$\Phi_2 = \int_V \sigma_u \dot{\varepsilon}_u dV - \frac{\xi}{2} \int_V \dot{\varepsilon}_{kk}^2 dV - \int_S F_k v_k dS \quad (4.15)$$

u kojem je u odnosu na (4.14) izmijenjen srednji član. Ovaj član sadrži veliki pozitivni parametar ξ koji automatski obezbeđuje izjednačavanje veličine $\dot{\varepsilon}_{kk}^2$ sa nulom (penalty method, metod štrafa).

Da bi se problem numerički riješio potrebno je predloženi funkcional Φ_2 (4.15) zapisati u vidu sume:

$$\Phi_2 = \sum_{m=1}^M [\pi_1^{(m)} + \pi_2^{(m)} - \pi_F^{(m)}] \quad (4.16)$$

gdje je:

M - broj konačnih elemenata.

Odvojene komponente funkcionala su integrali sračunati za svaku zapreminu $V^{(m)}$ konačnih elemenata $m = 1, 2, \dots, M$ na koje je razloženo, tijelo: $V = \sum_{m=1}^M V^{(m)}$; $S^{(m)}$ označava površinu na koju djeluju površinske sile:

$$\pi_1^{(m)} = \int_{V^{(m)}} \sigma_u \dot{\varepsilon}_u dV; \quad \pi_2^{(m)} = \frac{\xi}{2} \int_{V^{(m)}} \dot{\varepsilon}_{kk}^2 dV; \quad \pi_F^{(m)} = \int_{S^{(m)}} F_k v_k dS \quad (4.17)$$

Za funkcional Φ_2 (4.16) za veličine Δv_α kao tražene promjenljive iteraciona procedura Njutn-Rafsona daje sledeći sistem običnih algebarskih jednačina:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial^2}{\partial v_\alpha \partial v_\beta} (\pi_1^{(m)} + \pi_2^{(m)} - \pi_F^{(m)}) \right\}_{(n-1)} \Delta v_{\beta(n)} = - \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial}{\partial v_\alpha} (\pi_1^{(m)} + \pi_2^{(m)} - \pi_F^{(m)}) \right\}_{(n-1)} \quad (4.18)$$

koji se rješava nekim od standardnih numeričkih postupaka.

Elasto-plastična analiza primjenom MKE u obradi deformisanjem je prvi put urađena od strane Marcala i Kinga. Nakon toga, a pogotovo u poslednje vrijeme, uloženo je puno napora u cilju što boljeg prilagođavanja elasto-plastične formulacije MKE problemima zapreminskega deformisanja.

Elasto-plastični metod konačnih elemenata može biti formulisan u različitim oblicima, korišćenjem Ojlerove ili Lagranžove formulacije. U nekim ciljevima dobija se matrica krutosti u eksplisitnom obliku a u drugim inkrementalne izmjene parametara se računaju implicitno [65, 177].

4. TEORIJSKE POSTAVKE

Dalje se daju teoretski osnovi implicitne konačno deformacione Lagranžove formulacije na osnovu koje je napravljen program DEFORM.

Neka je Δf_i , i-ta Dekartova komponenta izmjene sile u i-tom čvoru posmatranog elementa, u toku analiziranog inkrementa a Δd_{ij} i-ta Dekartova komponenta odgovarajućeg pomjeranja čvora od referentnog položaja. Jednačine krutosti elementa mogu se napisati u obliku:

$$\Delta f_{im} = (K_{im,jn}^{\epsilon} + K_{im,jn}^{\sigma} + K_{im,jn}^{\phi}) \Delta d_{jn} \quad (4.19)$$

gdje je izvršeno sumiranje po svim čvorovima, elementu i sve tri Dekartove komponente. Tri člana unutar zagrade se nazivaju:

$K_{im,jn}^{\epsilon}$ - deformaciona matrica krutosti,

$K_{im,jn}^{\sigma}$ - korekciona matrica naponskog inkrementa i

$K_{im,jn}^{\phi}$ - korekciona matrica konstantne zapremine.

Na osnovu minimizacije potencijalne energije u početku i na kraju inkrementa, matrica krutosti može biti prikazana u obliku:

$$K_{im,jn} = \int B_{y,im} D_{ijkl} B_{kj,jn} dV \quad (4.20)$$

gdje je integracija izvršena preko zapremine V elementa na početku inkrementa.

Matrica $B_{y,im}$ izražava inkrement linearizovane rotacione deformacije u tački unutar elementa preko vrijednosti inkrementalnih čvornih pomjeranja a D_{ijkl} je konstitutivna matrica elastično-plastičnog materijala.

Komponente napona unutar elementa mogu se mijenjati ne samo kao rezultat deformacije materijala, već i zbog izmjene u geometriji i orijentaciji elementa. Ovo dovodi do korekcione matrice naponskog inkrementa koja može biti napisana u obliku:

$$K_{im,jn}^{\sigma} = \int (N_{i,j} \delta_{mn} \sigma_{ik} N_{j,k} - 2 B_{y,im} \delta_{jl} \sigma_{ik} B_{kl,jn}) dV \quad (4.21)$$

gdje je:

N_i - interpolaciona funkcija. Određuje doprinos vrijednosti parametra u čvoru i , na vrijednost u proizvoljnoj tački unutar elementa,

σ_y - Košijev napon,

δ_{ij} - simbol Kronekera.

Da bi se osiguralo da plastično deformisani element ima konstantnu zapreminu vrijednost Poasonovog odnosa u konstrukciji matrice krutosti se uzima bliska 0.5. Ovo dovodi do nametanja uslova nestišljivosti u svakoj tački takvih elemenata. U određenim okolnostima, može doći do preodređenosti deformacije. U cilju izbjegavanja tog problema zahtijeva se da samo ukupna zapremina elementa bude konstantna što rezultira korekcionom matricom:

$$K_{im,jn}^{\phi} = k \left(\frac{1}{V} \left(\int B_{ii,im} dV \right) \left(\int B_{jj,jn} dV \right) - \int B_{ii,im} B_{jj,jn} dV \right) \quad (4.22)$$

gdje je:

k - zapreminska modul materijala.

Zapreminske integralne u inkrementalnim matricama krutosti su računati Gausovim kvadraturama, a globalna matrica krutosti je riješena metodom Gausove eliminacije [65, 177].

Kod elastično-plastične formulacije MKE mogu se javiti problemi vezani prije svega za veličinu deformacionog inkrementa. Relativno mali inkrement deformacije uslovjava suviše veliko kompjutersko vrijeme. S druge strane može se postaviti pitanje valjanosti elasto-plastične formulacije kada se primjenjuje u situacijama koje povlače korišćenje konačnih deformacija.

U cilju prevazilaženja ovih problema izvedena je iz teorije konačno-deformaciona elastično-plastična formulacija, koja uključuje niz postavki. Korišćeni su: generalizovani naponi (4.23), generalizovane deformacije (4.24), Mises kriterijum plastičnog tečenja (4.25) i Prandtl-Reuss jednačine (4.26) [65, 176].

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^* \right)^{1/2} \quad (4.23)$$

$$d\bar{\varepsilon}^P = \left(\frac{3}{2} d\bar{\varepsilon}_{ij}^P d\bar{\varepsilon}_{ij}^P \right)^{1/2}, \bar{\varepsilon}^P = \int d\bar{\varepsilon}^P \quad (4.24)$$

$$\frac{3}{2} \sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^* = R_{eH}^2 \quad (4.25)$$

$$d\varepsilon_{ij}^* = \frac{1}{2G} d\sigma_{ij}^* + \sigma_{ij}^* d\lambda, d\varepsilon_{ii}^* = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma_{ii} \quad (4.26)$$

gdje su:

$\bar{\sigma}$ - generalizovani naponi,

σ_{ii} - komponente devijatora napona,

$d\bar{\varepsilon}^P$ - generalizovani inkrement plastične deformacije,

$d\bar{\varepsilon}$ - generalizovana plastična deformacija,

R_{eH} - napon tečenja pri prostom istezanju u funkciji od deformacije, brzine deformacije i temperature,

ε_{ij}^* - komponente devijatora deformacija,

G - modul smicanja,

$d\lambda$ - faktor proporcionalnosti,

$\sigma_{ii}, \varepsilon_{ii}$ - normalni naponi i linjske deformacije,

E - Youngov modul elastičnosti,

ν - Poisson odnos.

S obzirom da je većina procesa zapreminskog deformisanja praćena izraženom nelinearnošću, proces je redukovani na niz linearizovanih koraka. Korišćen je pristup Lagranža, pa je pomjeranje tačke elementa izraženo preko referentnih koordinata elemenata na početku deformisanja. Ovo dovodi do mogućnosti izražavanja konačnih deformacija, gdje su inkrementalne jednačine izvedene na osnovu elasto-plastičnih konstitutivnih relacija (4.23-4.26). Jednačine krutosti elemenata mogu biti napisane u obliku:

$$\Delta f_{lm} = (K_{lm,jn}^{\varepsilon} + K_{lm,jn}^{\sigma} + K_{lm,jn}^{\lambda}) \Delta d_{jn} \quad (4.27)$$

4. TEORIJSKE POSTAVKE

Veličine Δf i Δd se odnose na izmjenu sile i pomjeranje u toku posmatranog inkrementa. Sa velikim slovima se označavaju čvorovi, a malim Dekartove koordinate posmatrane veličine.

Materijal se specificira preko krivih koje mogu biti date na tri načina:

- ◆ kao složena funkcija napona tečenja i plastičnih deformacija koja je poznata iz ranijih istraživanja,
- ◆ neposredno na osnovu empirijski dobijenih zavisnosti napona tečenja i plastičnih deformacija i
- ◆ kao složena funkcija napona tečenja od plastičnih deformacija, brzine deformacije i temperature.

Ovdje se posmatra prvi slučaj elastično-plastične ojačavajuće sredine.

Granični uslovi se definišu preko faktora trenja m koji je određen relacijom:

$$T_s = m \cdot T_{sH} \quad (4.28)$$

gdje je:

T_s - napon smicanja,

$$T_{sH} = \frac{1}{\sqrt{3}} R_{eH} \quad \text{- napon tečenja pri smicanju}$$

Faktor trenja može imati tri vrijednosti:

$m = 0$ - nulto trenje kada čvor klizi po površini,

$m = 1$ - trenje lijepljenja kada je kretanje čvora po površini u odnosu na površinu nula,

$0 < m < 1$ - međuvrijednosti.

Kulonovo trenje nije najpogodniji način modeliranja graničnih uslova u obradi deformisanjem zbog pojave velikih normalnih napona. U najvećem broju slučajeva utvrđeno je da važi zakonitost (4.28), te je faktor m posebno pogodan.

Koriste se 3D, linearni izoparametarski elementi. Funkcija oblika za neku tačku unutar ovog elementa je data relacijom:

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i) \quad (4.29)$$

gdje su:

ξ, η i ζ - lokalne koordinate.

Matrice krutosti i vektori sile pojedinih konačnih elemenata se uklapaju u globalne matrice krutosti i vektor sile, pri čemu se uvažava princip minimalne širine matrice krutosti, a zatim rješavaju po nepoznatim pomjeranjima metodom Gausove eliminacije [65, 176, 177].

4.3. NUMERIČKA SIMULACIJA

Numerička simulacija, odnosno kompjuterska simulacija procesa FSW, predstavlja tehniku koja omogućava određivanje tečenja materijala pri plastičnom deformisanju, distribuciju deformacija, brzina deformacija i napona u deformisanom materijalu, definisanje uslova u međukontaktu alata i materijala, koji se odnose na transfer toplotne i kontaktno trenje, procjenu habanja i elastičnih deformacija alata, a time i vijeka trajanja alata [105]. U praktičnom smislu, numeričkom simulacijom procesa FSW mogu se, osim

same vizuelizacije procesa, odrediti deformacione sile i energija za pojedine operacije procesa, otkriti nastanak defekata u materijalu i otkaz alata itd.

Numeričkom simulacijom je moguće izvršiti kompletну analizu procesa FSW, na osnovu sledećih ulaznih podataka:

- ◆ geometrijskih parametara alata i radnog komada,
- ◆ kontaktnih uslova definisanih preko faktora trenja,
- ◆ karakteristika materijala definisanih preko krivih ojačavanja,
- ◆ termodynamičkih parametara kod tople obrade,
- ◆ brzinskih parametara izraženih preko brzine kretanja pokretnih djelova alatnih mašina,

Najvažniji izlazni parametri koji se mogu dobiti numeričkom simulacijom su:

- ◆ promjena geometrije i dobra vizuelizacija samog procesa FSW,
- ◆ distribucija topote.

Najšire primjenjivani i najmoćniji alat za numeričku simulaciju procesa FSW je svakako, metoda konačnih elemenata - MKE. Poslednjih deset godina, zahvaljujući rapidnom razvoju kompjuterske tehnike, razvijeno je dosta komercijalnih softverskih paketa, na bazi metode konačnih elemenata, za rješavanje problema u procesima zavarivanja trenjem.

Jedan od najboljih programskih paketa za numeričku FEM simulaciju procesa FSW je DEFORM paket, koji se sastoji iz više djelova [30]: DEFORM-2D, DEFORM-3D, DEFORM-PC, DEFORM-PC Pro i DEFORM-HT. U ovom radu koristiće se DEFORM-3D (Ver 5.0) za koji Mašinski fakultet u Podgorici posjeduje licencu i koji će biti detaljnije obrađen. Sva geometrija: izgled alata, radni komadi, oslona ploča generisani su u programu Pro/ENGINEER za koji Mašinski fakultet takođe posjeduje licencu.

4.3.1. DEFORM-3D SOFTVERSKI PAKET

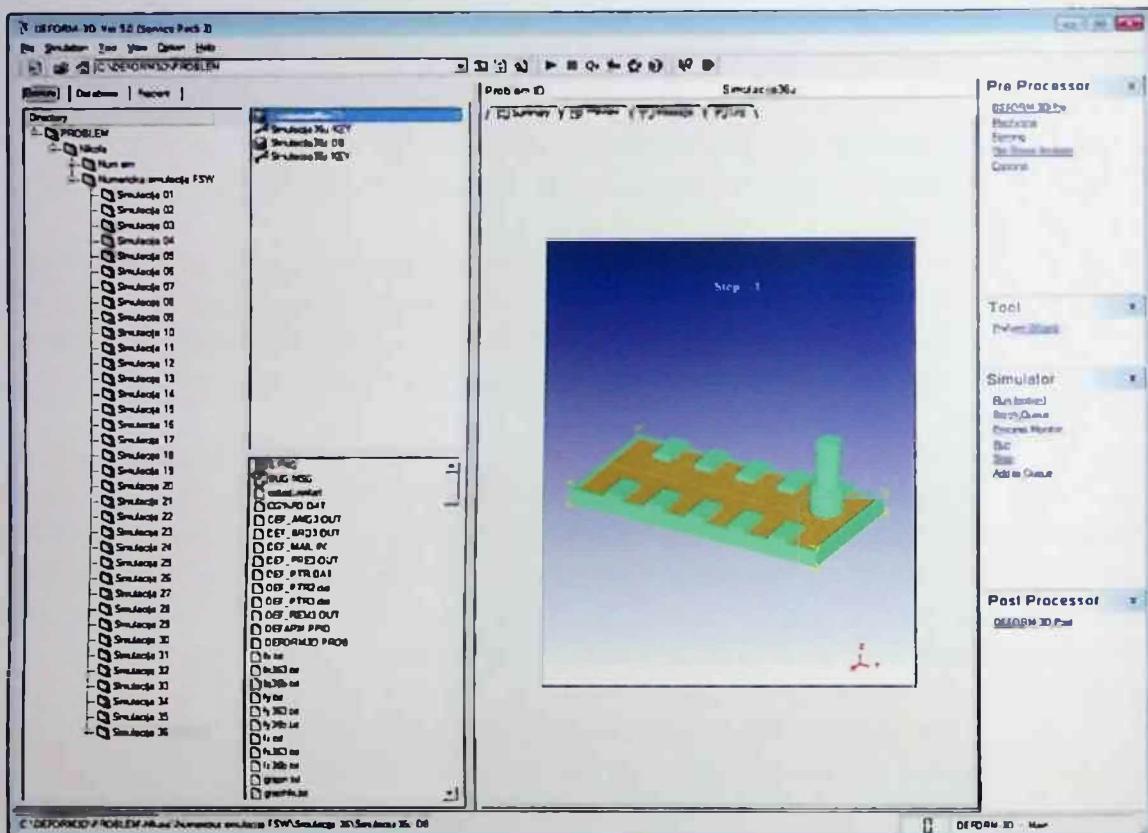
DEFORM-3D je proizvod američke korporacije (*Scientific Formating Technology Corporation*). DEFORM-3D može se koristiti na personalnim kompjuterima sa *Windows* i *Unix/Linux* operativnim sistemom, gdje je moguće modelirati 3D probleme. Sadrži najnovije inovacije u modeliranju metodom konačnih elemenata koji se podjednako dobro mogu primijeniti u proizvodnoj ili istraživačkoj okolini. DEFORM-3D je sistem baziran na parametarskom modeliranju, koji ima velike mogućnosti [30]:

- ◆ Posjeduje široku bazu podataka karakteristika materijala i legura uključujući legure čelika, aluminijuma, titanijuma i super legure.
- ◆ Dozvoljava unošenje podataka o materijalu koji nijesu u bazi podataka.
- ◆ Korišćenje krutih, elastičnih i termo viskoplastičnih modela, koji su pogodni za modeliranje velikih deformacija.
- ◆ Posjeduje integrisane modele za opremu - hidraulične prese, čekiće, prese sa zavojnim vretenom i mehaničke prese.
- ◆ Konturni (linijski i osjenčeni) prikaz temperature, deformacija, napona, oštećenja i drugih promjenljivih.
- ◆ Definisanje kontaktnih graničnih uslova i automatski *remeshing*, što omogućava nastavak simulacije do kompletiranja.

4. TEORIJSKE POSTAVKE

DEFORM-3D glavni interfejs je prikazan na Slici 4.20 i sastoji se od četiri glavna modula [30]:

- ◆ *Pre-Processor*,
- ◆ *Tool*,
- ◆ *Simulator* i
- ◆ *Post-Processor*.



Slika 4.20. Glavni interfejs DEFORM-3D sistema

Pre-Processor koristi grafički korisnički *interface* za sastavljanje baze podataka neophodnih za odvijanje numeričke simulacije. Ovaj modul se sastoji iz više podmodula: *Simulation Control*, *Materijal*, *Object*, *Object Positioning*, *Inter-Objects*, *Database Generation* itd.

- ◆ *Simulation Controls* - sastoji se od osam podmodula: *Main*, *Step*, *Stop*, *Remeshing criteria*, *Iteration*, *Process Condition*, *Advanced* i *Control File*. Podmoduli *Step* i *Stop* uključuju instrukcije kada treba zaustaviti simulaciju, šta treba biti modelirano, koliko koraka treba napraviti prilikom diskretizacije procesa i koji će se koraci sačuvati i dr.
- ◆ *Material Properties* - sastoji se od sedam podmodula: *Elastic*, *Plastic*, *Thermal*, *Diffusion*, *Grain*, *Hardness* i *Advanced*. Uključuje podatke koji opisuju ponašanje materijala tokom procesa. Za elastični su: Jungov modul elastičnosti, Poasonov odnos i koeficijent termičkog širenja. Za plastični su izraženi preko krive ojačavanja koja može biti zadata u jednom od pet oblika, od kojih se dva najviše primjenjuju:

1. Unošenjem na osnovu eksperimentalnih podataka:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T). \quad (4.30)$$

2. Eksponencijalni zakon:

$$\bar{\sigma} = c \bar{\varepsilon}^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m + y, \quad (4.31)$$

gdje su: c - konstanta materijala, n - eksponent deformacije i
 m - eksponent brzine deformacije.

- ◆ *Objects* - uključuju sve podatke vezane za objekte koji učestvuju u procesu, a to su:
 - geometrija radnog komada i alata,
 - mreža radnog komada,
 - pomjeranje pokretnih objekata (djelova alata),
 - temperatura,
 - definisanje čvorova mreže na koje će se primijeniti granični uslovi.
- ◆ *Inter-Objects* - sastoji se od četiri podmodula: *Volume Calculations*, *Inter Object Interface*, *Object Position* i *Contact Boundary Conditions*. U ovom podmodulu definišu se uslovi među objektima koji su u interakciji jedan sa drugim, u prvom redu preko kontaktnog trenja i toplotnog transfera između objekata. Ovdje se unose i vrijednosti faktora trenja.
- ◆ *Database Generation* - vrši provjeru ispravnosti postavljene simulacije i generiše inicijalnu bazu podataka.

Simulator - jeste modul u kome se vrše matematički proračuni koji se zahtijevaju u numeričkoj simulaciji na osnovu inicijalne baze podataka. Ovaj modul automatski aktivira AMG modul *Remeshing* kada se za to ukaže potreba i kompletira baza podataka [30].

Post-Processor omogućuje grafički pregled i „izvlačenje“ numeričkih podataka dobijenih iz prethodnog modula. Svi rezultati sačuvanih koraka u bazi podataka su dostupni u ovom modulu. Ovi rezultati uključuju:

- ◆ deformisani geometriju, pomjeranje alata i deformisane mreže,
- ◆ konturne dijagrame - linijske ili osjenčene, koji prikazuju distribuciju neke promjenljive stanja kao što su naponi, deformacije, brzine deformacija, oštećenja i dr.,
- ◆ vektorsko crtanje pomjeranja, brzina pomjeranja, koja pokazuju intenzitet, pravac i smjer pomjeranja za svaki čvor mreže,
- ◆ grafike ključnih promjenljivih kao što su opterećenje prese ili praćenje promjene neke veličine u dатoj tački,
- ◆ praćenje promjene mreže koja dobro predstavlja tečenje materijala za uniformnu mrežu.

Stanje promjenljivih i slike se mogu sačuvati u digitalnom ili neutralnom formatu koji se mogu koristiti u drugim programima [30].

4.4. PRO/ENGINEER

Pro/ENGINEER je od kraja osamdesetih godina postao vodeći CAD sistem, za projektovanje, proizvodne i inženjerske analize. Ono što Pro/ENGINEER izdvaja od drugih oblika CAD paketa, jeste to da je ovaj program 3D solid (zapreminske) modelar. Za razliku od 2D programske alata, Pro/ENGINEER dozvoljava korisniku da svoj dizajn sagleda u trodimenzionalnom svijetu. Njegova velika prednost je i tzv. „inteligentna“ geometrija, ili geometrija koja je parametarska (kontrolisana dimenzijama).

Pro/ENGINEER se koristi u raznim granama industrije, od proizvodnje raketa do proizvodnje štampača. Firma koja je razvila ovaj paket *Parametric Technology Corporation - PTC* kombinuje različite programske module koji se nazivaju ekstenzijama, sa osnovnim modulom koji se naziva *Fundation*, tako da je Pro/ENGINEER osnovni modul [61].

Pro/ENGINEER je sistem za 3D parametarsko modeliranje, bazirano na tzv. tehničkim elementima ili formama (*Features*), namijenjen modeliranju djelova i sklopova, izradi tehničke dokumentacije, definisanju postupka izrade djelova na numerički upravljivim mašinama i inženjerskim analizama. Čak i na nivou modula *Fundation*, on predstavlja veoma moćan solid modelar sa funkcijama koje se mogu naći samo u vrhunskim CAD sistemima. Pro/ENGINEER je jedinstven u odnosu na ostale CAD sisteme.

Pro/ENGINEER posjeduje jedinstvenu bazu podataka. Ona se naziva solid modelom, a kreira se i modifikuje za vrijeme rada u radnom režimu Pro/ENGINEER-a (*Part Mode*). Ostali radni režimi, kao što je režim za izradu crteža ili režim za izradu sklopova, pozivaju se na ovaj model u okviru svojih datoteka, tako što kreiraju link (vezu) prema modelu. Na taj način, svaki put kada se u programu otvorí crtež ili model sklopa, vezana datoteka se učitava u program i prikazuje u svojoj najnovijoj konfiguraciji. Datoteka crteža kompletno opisuje crtež, uključujući format dimenzije crteža, koji model je prikazan na crtežu i koji pogledi su prikazani [61].

Pro/ENGINEER se sastoji od *Core Design* - Jezgro programa. Sledeći nivo je *Foundation*. Ovaj paket modula omogućava kreiranje detaljnih zapreminskih modela i modela koji se izrađuju od lima, izradu sklopova i tehničkih crteža. U ovaj modul spadaju: *Feature* - parametarsko projektovanje pomoću "tehničkih elemenata", *Sheetmetal* - izrada djelova od lima pomoću specifičnih elemenata, *Weld* - parametarski elementi za prikaz zavarenih spojeva i odgovarajućih simbola, *Assembly* - kreiranje sklopova, *Detail* - izrada 2D tehničke dokumentacije, *Report* - izrada izvještaja, *Web Publish* - kreiranje VRML/HTML dokumenata, *Photorender* - kreiranje fotorealističkih slika, *J-link* - proširivanje, prilagođavanje i automatizovanje Pro/ENGINEER-a, *Interface* - direktna razmjena modela sa programima Pro/DESKTOP, CADSS i CDRS, uvoz i izvoz formata, *Plot* - štampanje pomoću programa Windows sistema i *ECED* - razmjena podataka sa programima drugih proizvođača [61].

Advanced Assembly Extension - proširuje mogućnosti paketa *Foundation* u pogledu kreiranja i ažuriranja srednje do veoma velikih sklopova. Tu spadaju: *Assembly* - kreiranje sklopova (pojednostavljeni prikazi skeletni modeli, obvojnici itd.), *Notebook* - zapis 2D šeme za kontrolu projekta preko parametara, *Process for Assemblies* -

dokumentovanje procesa izrade sklopa i *Fly-Trough* - kreiranje putanje kretanja kroz sklop [61].

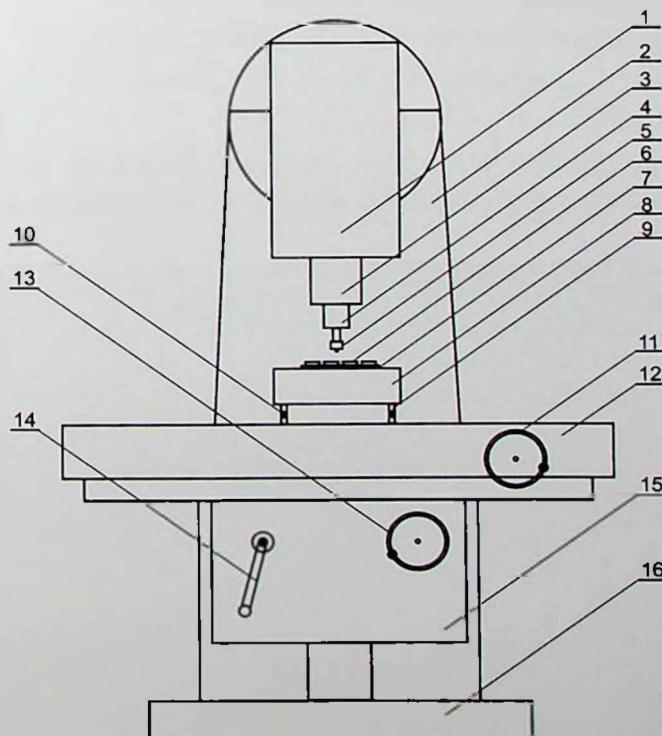
Pro/ENGINEER ima mogućnost izvoza geometrije u formate STL, IGES itd. To su formati preko kojih se geometrije uvoze u programe koji su bazirani na MKE, kao što je DEFORM-3D.



5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

5.1. EKSPERIMENTALNA OPREMA

Kod procesa FSW, za izvođenje eksperimentalnih istraživanja neophodna je mašina velike krutosti, sa radnim stolom koji ima mogućnost pomjeranja u prostoru u tri normalna pravca, ili sa „automatskom pokretnom glavom“ na kojoj se nalazi alat za zavarivanje, a radni komadi miruju. Usled specifičnosti procesa FSW i da bi se izvršila predviđena ispitivanja u ovom rada, zbog pogodnosti mjerjenja komponenti sila (vertikalne sile F_z , uzdužne sile F_x , bočne sile F_y , kao i postavljanja aparature za mjerjenje temperature) u eksperimentu je korišćena mašina za obradu metala rezanjem poznatija pod imenom horizontalna glodalica. Horizontalna glodalica koja se koristi u eksperimentalnim istraživanjima i na kojoj je moguće vršiti pomenuta ispitivanja je „МОДЕЛЬ 6Р13“, proizvođača „ЗАВОД ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ - ГОРЬКИЙ“ 1973. godine iz bivšeg Sovjetskog Savez (Slika P.7.1 u Prilogu 7), u daljem tekstu „glodalica“. Na Slici 5.1 dat je šematski prikaz korišćene glodalice.



Slika 5.1. Horizontalna glodalica: 1 - nosač glavnog vretena, 2 - kućište glodalice, 3 - glavno vreteno, 4 - stezna glava, 5 - alat za FSW, 6 - stezač radnih komada, 7 - radni komadi, 8 - pomoćni pribor (osnovna ploča), 9 - specijalni nosači osnovne ploče, 10 - otpornički davači za mjerjenje sila, 11 - za uzdužno pomjeranje, 12 - radni sto glodalice, 13 - za bočno pomjeranje, 14 - za vertikalno pomjeranje, 15 - nosač radnog stola, 16 - postolje glodalice

5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

Glodalica posjeduje pokretni radni sto, sa mogućnošću podešavanja brzine pomjeranja mm/min, kao i brzine okretanja glavnog vretena o/min u vrijednostima koje odgovaraju za izvođenje eksperimenta. Glodalicu je moguće prilagoditi i uslovima automatskog upravljanja, postavljanjem koračnih motora na zavojna vretena za pozicioniranje stola.

Tehnički podaci horizontalne glodalice su:

- motor snage: 10 kW,
- brzina okretanja glavnog vretena: $\omega = (31.5 \div 1600)$ o/min,
- brzina kretanja radnog stola: $v = (25 \div 1250)$ mm/min,
- dimenzije radnog stola: 1500 mm x 300 mm,
- težina mašine 3500 kg,
- gabaritne dimenzije mašine: (širina:dužina:visina = 2000:2600:2200 mm).

Za izradu pomoćnog pribora, alata za zavarivanje, radnih komada, držača mjerne opreme, držača za baždarenje mjerne opreme i mnogih drugih pomoćnih pribora, korišćene su sledeće mašine:

- ◆ Univerzalni strug tipa: US 400 - Alatne mašine, Skoplje (Slika P.7.3 u Prilogu 7).
- ◆ Tračna testera tipa: UD 210 - Pobeda, Novi Sad (Slika P.7.4 u Prilogu 7).
- ◆ Univerzalna brusilica tipa: 40LN - Majevica (Slika P.7.5 u Prilogu 7).
- ◆ Univerzalna glodalica tipa: UG 1000 (Slika P.7.6 u Prilogu 7).

Sve nabrojane korišćene mašine, kao i istraživačko mjesto nalaze se u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Podgorici.

Prilikom izvođenja eksperimentalnih ispitivanja korišćene su:

- ◆ Mašina za istezanje - „kidalica”: R100 - SSSR (Slika P.7.2 u Prilogu 7).
- ◆ Šarpijevo klatno (Slika 6.41 u Poglavlju 6.7.2).
- ◆ Oprema za metalografska ispitivanja o kojoj će više riječi biti u Poglavlju 6.8.

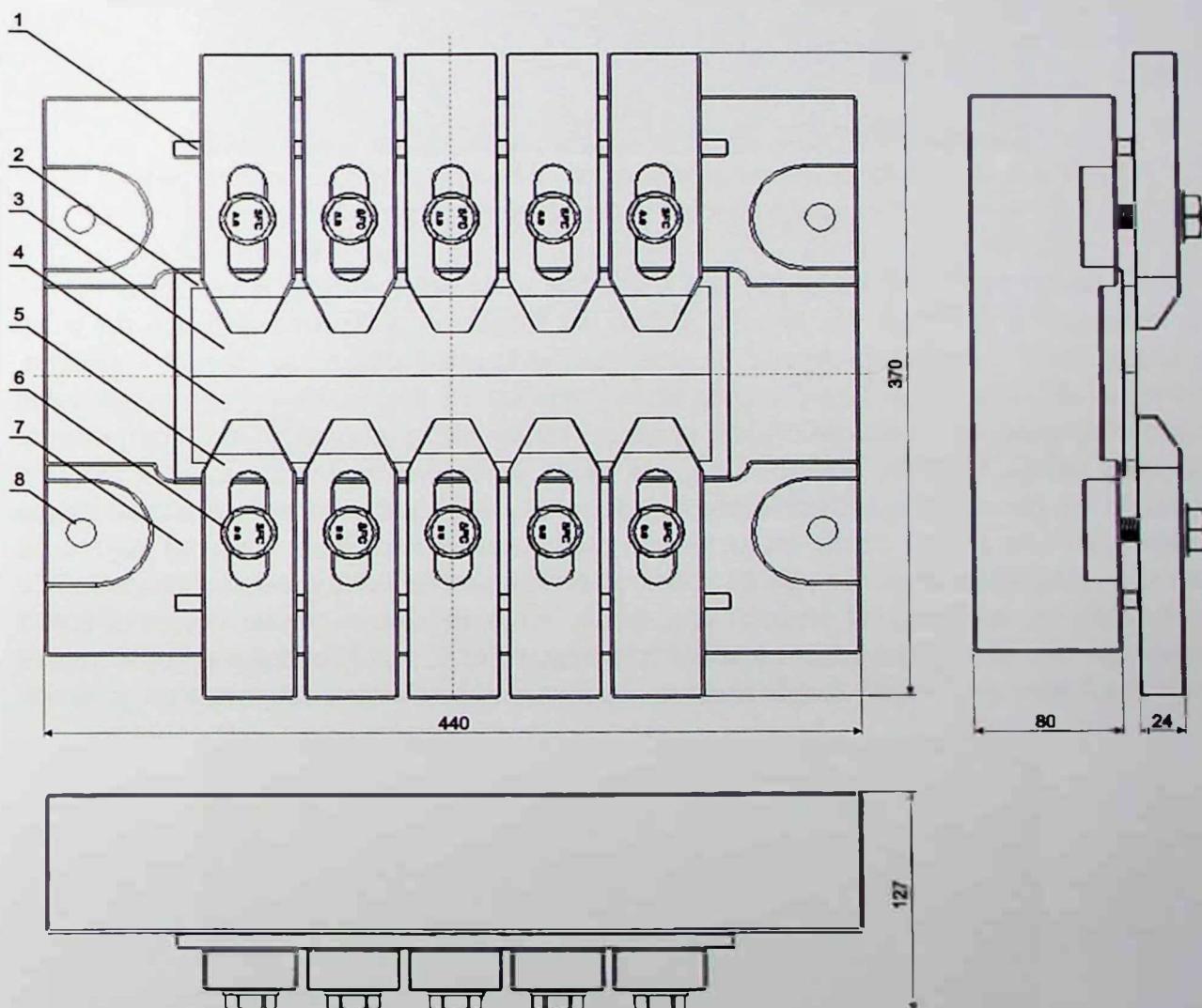
Na Slici 5.2 dat je prikaz istraživačkog mjesta sa postavljenom opremom.



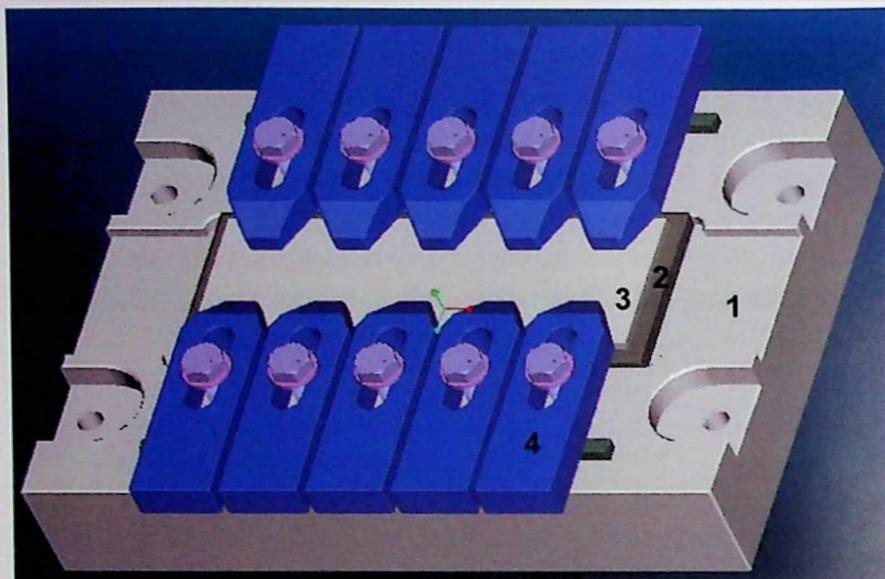
Slika 5.2. Istraživačko mjesto: 1 - osnovna ploča, 2 - oslona ploča, 3 - stezač, 4 - radni komadi od legure 6082-T6, 5 - alat za FSW, 6 - stezna glava glodalice, 7 - specijalni nosač sa nalijepljenim mjerim trakama, 8 - mjeri most, 9 - BAS, 10 - PC računar sa A/D karticom i programom GLOBAL LAB, 11 - radni sto glodalice

5.2. IZRADA POMOĆNOG PRIBORA

Za izvođenje procesa FSW, kao i za mjerjenje traženih parametara, bilo je neophodno napraviti pomoćni pribor, na koji će se montirati mjerna oprema kao i sprovoditi sam proces zavarivanja. Na radni sto vertikalne glodalice postavljen je, pomoćni pribor koji se sastoji od osnovne ploče, oslone ploče i stezača radnih komada. Kompletan sklop pomoćnog pribora dizajniran je u programu Pro/ENGINEER. Šematski prikaz pomoćnog pribora sa gabaritnim dimenzijama dat je na Slici 5.3, a njegov 3D prikaz na Slici 5.4.

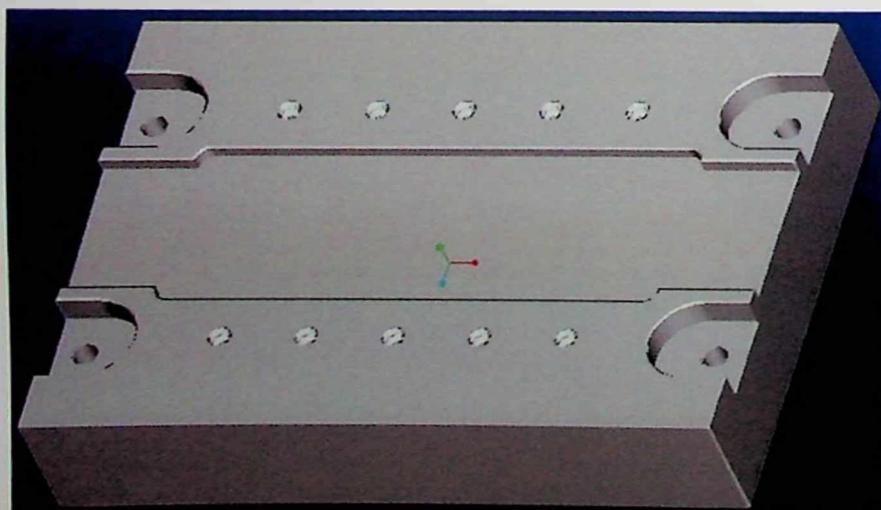


Slika 5.3. Pomoćni pribor za FSW: 1 - odsjtojnjk, 2 - oslona ploča, 3 - radni komad, 4 - radni komad, 5 - stezač radnih komada, 6 - šaraf sa podloškom, 7 - osnovna ploča, 8 - mesta za specijalne nosače osnovne ploče

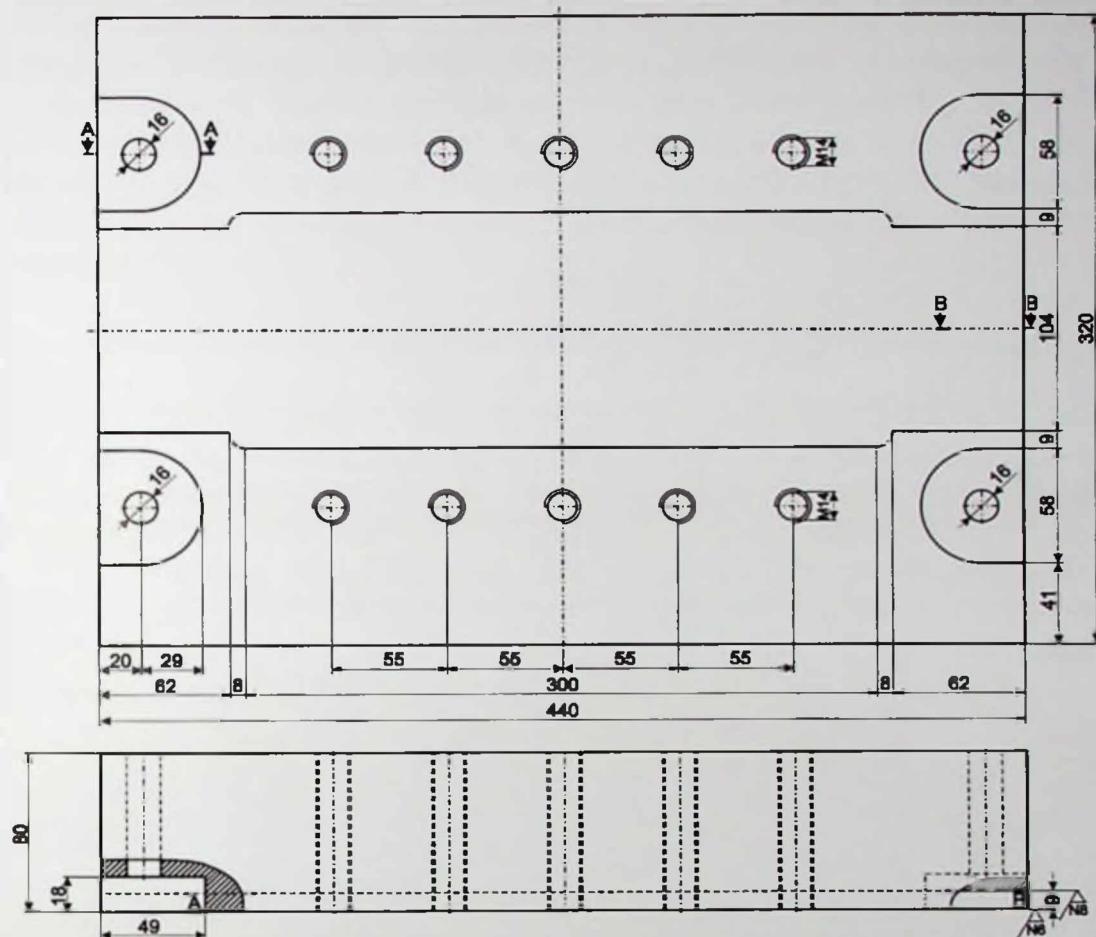


Slika 5.4. 3D prikaz pomoćnog pribora: 1 - osnovna ploča, 2 - oslona ploča,
3 - radni komad, 4 - stezač radnog komada

Osnovna ploča dimenzija $320 \text{ mm} \times 440 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, urađena je od čelika Č.1940 na univerzalnoj glodalici. Na osnovnoj ploči su izbušene četiri rupe $\varnothing 16 \text{ mm}$ da bi se smjestila četiri specijalna nosača na koje se postavljaju otpornički davači - senzori. Osnovna ploča je izdignuta od radnog stola glodalice za 60 mm, kako bi se mogli dobiti efekti elastičnog savijanja specijalnih nosača i na taj način mogle izmjeriti komponente sila koje djeluju na radni komad. Osnovna ploča je isprojektovana tako da je moguće postaviti do pet stezača radnih komada, odnosno pet sa jedne strane, a pet sa druge strane osnovne ploče. Dakle, na osnovnoj ploči je izbušeno deset rupa na kojima su urezani navoji M14 mm koji služe za stezanje radnih komada. Na sredini osnovne ploče napravljen je upušteni dio kako bi se mogla smjestiti oslona ploča, koja sprečava oštećenja osnovne ploče tokom izvođenja procesa FSW. Na Slici 5.5 dat je 3D izgled osnovne ploče, a na Slici 5.6 data je šema osnovne ploče sa dimenzijama.

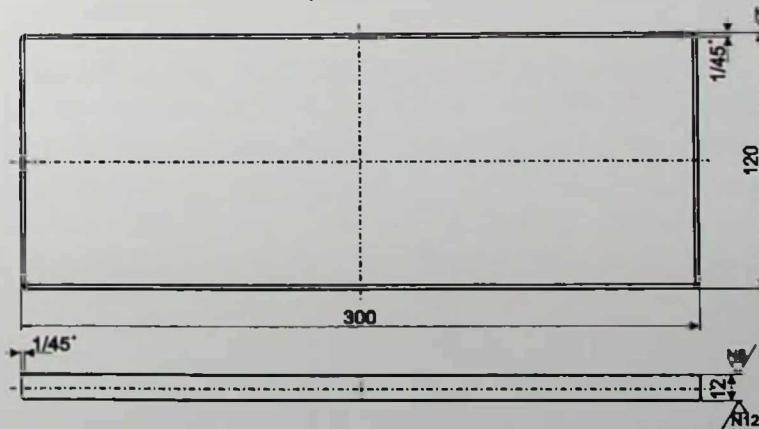


Slika 5.5. 3D prikaz osnovne ploče



Slika 5.6. Osnovna ploča

Oslona ploča dimenzija $300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ urađena je od čelika Č.5432. Ploča je termički obrađena (kaljena) na 47 HRc , a zatim fino brušena i služi kao podloga za zavarene spojeve (Slika 5.7). Kakav će biti spoj (šav) sa donje strane radnih komada, uglavnom zavisi od kvaliteta površine oslone ploče, kao i njene tvrdoće.

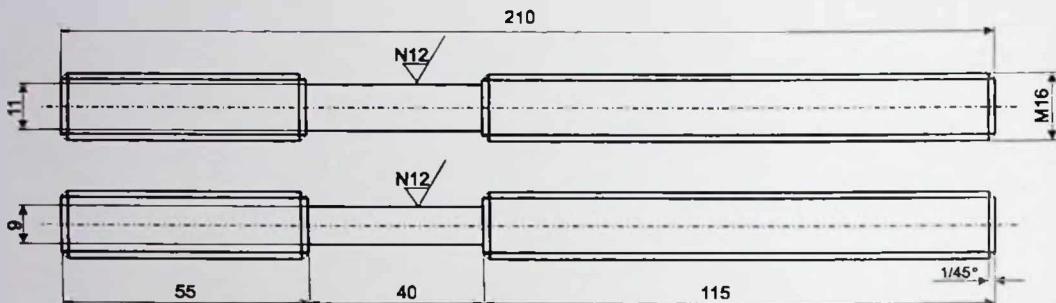


Slika 5.7. Oslona ploča

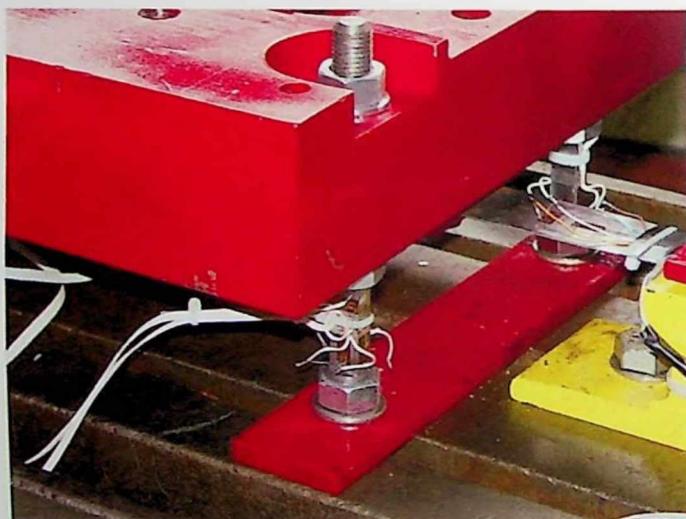
Da bi se moglo izvršiti mjerjenje komponenti sila, napravljena su četiri specijalna nosača osnovne ploče, na koje su nalijepljene mjerne trake. Na mjestu lijepljena mjernih traka specijalni nosač osnovne ploče je pravougaonog poprečnog presjeka. To

5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

omogućava mjerjenje savijanja specijalnih nosača u x - uzdužnom pravcu i y - bočnom pravcu. Za mjerjenje sile u z - vertikalnom pravcu, takođe se koriste mjerne trake koje su opterećene na pritisak. Dimenzionisanje specijalnog nosača je vršeno na osnovu očekivanih opterećenja u x , y i z pravcu. Više detalja biće dato u Poglavlju 5.3.1. Izgled specijalnog nosača, osnovne ploče dat je na Slici 5.8, a njegova implementacija sa nalijepljenim mjernim trakama na Slici 5.9.



Slika 5.8. Specijalni nosač pomoćnog pribora



Slika 5.9. Specijalni nosači osnovne ploče pravougaonog poprečnog presjeka na kojima su postavljeni davači (mjerne trake)

Za stezanje radnih komada korišćeni su stezači standardnih dimenzija koji su sastavni dio opreme horizontalne glodalice. Stezač radnih komada je dat na Slici 5.10 u 3D obliku.



Slika 5.10. 3D prikaz stezača radnih komada

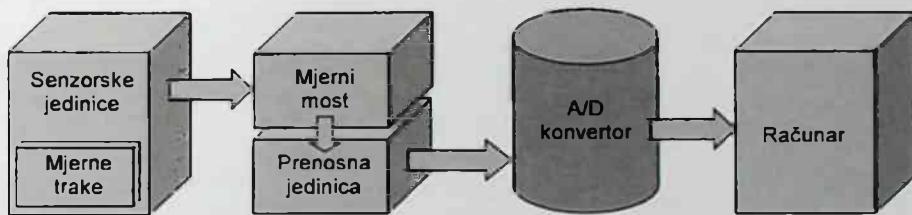
5.3. MJERNA OPREMA

Na osnovu definisanog plana istraživanja u radu je potrebno izvršiti mjerjenja sila zavarivanja i mjerjenja temperature. Sva mjerena eksperimentalnih istraživanja izvršena su pomoću, precizne analogno-digitalne mjerne opreme povezane u informacione mjerne sisteme.

5.3.1. OPREMA ZA MJERENJE SILA

Kod mjerjenja sila analogni signal sa senzorskih jedinica - mjernih traka (Slika 5.2 poz. 7), se preko digitalnog šestokanalnog pojačivača - mjernog mosta (Slika 5.2 poz. 8) i prenosne jedinice (Slika 5.2 poz. 9), dovodi do AD/DA kartice, gdje se konvertuje u digitalni i memoriše na računaru sa instalisanim softverskim paketom za akviziciju podataka GLOBAL-LAB (Slika 5.2 poz. 10). Dijagrami dobijeni na ovaj način su u funkciji napona struje (V) i vremena (s), od kojih se na osnovu poznatih relacija i vrijednosti baždarenja mjerne opreme dobijaju dijagrami sila (N) u funkciji vremena (s).

Na Slici 5.11 dat je blok dijagram informacionog mjernog sistema.



Slika 5.11. Blok dijagram informacionog mjernog sistema za mjerjenje sila

Prilikom mjerjenja sila koriste se otpornički davači i specijalni davač tipa KMR koji se postavlja ispod osnovne ploče, a služi za provjeru dobijenih rezultata mjerjenja.

Otpornički davači za mjerjenja sila procesa FSW su mjerne trake povezane u pune Vitstonove mostove, koje daju promjenu električnog signala na osnovu elastične deformacije specijalnih nosača koji su opterećeni na pritisak i savijanje. Sve korištene mjerne trake su tipa: HBN 6/120LY11, otpornosti $120 \Omega \pm 0.2\%$ i k -faktora $2.05 \pm 1\%$.

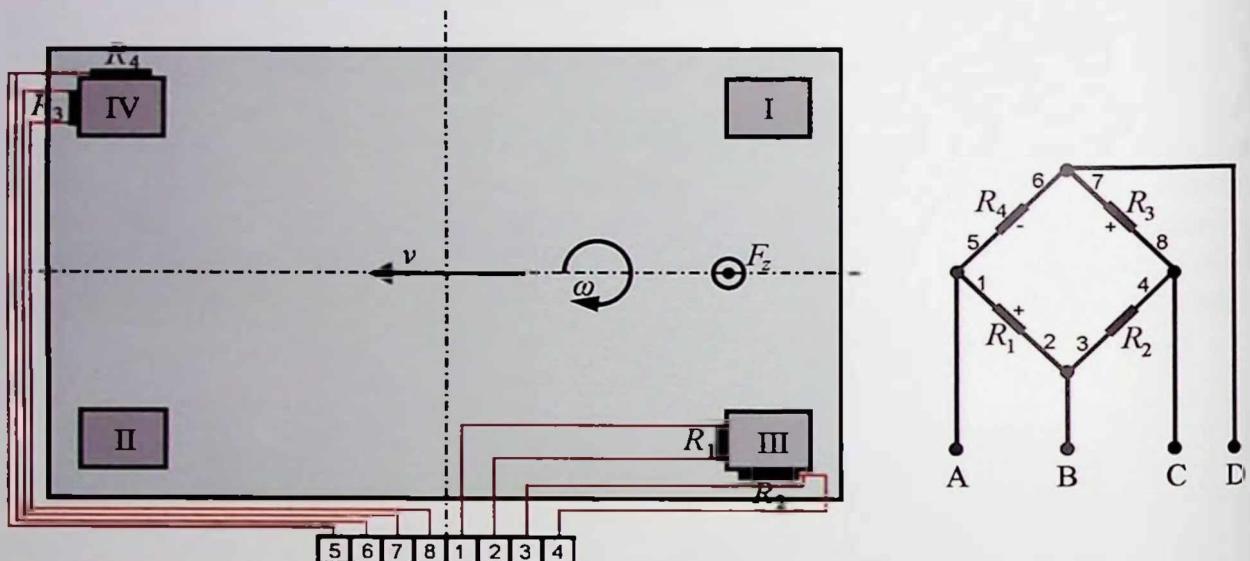
Kod procesa FSW javljaju se sve tri komponente sile u z , x i y pravcu. Specijalni nosači su opterećeni na savijanje i pritisak. Za uspješno mjerjenje komponenata sile bilo je potrebno razdvijiti komponente sile koje se dobijaju savijanjem specijalnih nosača od onih koje se dobijaju pritiskom.

5.3.1.1. Otpornički davači za mjerjenje komponente vertikalne sile

Kada je u pitanju mjerjenje komponente sile F_z , specijalni nosači su opterećeni na pritisak. Pošto je osnovna ploča simetrična u odnosu na liniju spajanja radnih komada, mjerne trake su raspoređene tako da daju osrednjenu vrijednost komponente sile F_z .

5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

Mjerne trake su nalijepljene na specijalne nosače broj III i IV. Otpornički davači R_1 i R_4 su postavljeni uzdužno, a R_2 i R_3 poprečno u odnosu na pravac dejstva sile. Poprečno postavljeni davači (mjerne trake) registruju samo 30% izduženja odnosno skraćenja jer su nosači opterećeni na pritisak, u odnosu na uzdužno postavljenе. Broj aktivnih mernih traka u mostu je $n = 4$, a koeficijent korekcije u ovom slučaju je $\mu = 0.3$, pa je $n = 2 + 2 \times 0.3 = 2.6$. Na Slici 5.12 data je šema rasporeda mernih traka na specijalnim nosačima sa šemom mosta i njihovog povezivanja sa standardnim portom na mernom mostu preko kanala A, B, C i D.



Slika 5.12. Šema rasporeda i povezivanja mernih traka za mjerjenje komponente sile F_z

Izraz za promjenu otpora na otporničkom davaču u obliku punog mosta je [2]:

$$\frac{U_d}{U_e} = \frac{n}{4} k \cdot \varepsilon, \quad (5.1)$$

gdje su:

U_d mV - promjena napona davača usled deformacije mernih traka,

U_e V - napon napajanja davača,

ε - deformacija,

$n = 2.6$ - broj aktivnih mernih traka.

Na osnovu poznatog obrasca [2]:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (5.2)$$

Napon se pri linijskoj elastičnoj deformaciji može izraziti:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{F}{A}, \quad (5.3)$$

gdje su:

$E = 2.1 \cdot 10^4$ kN/cm² - modul elastičnosti,

A - poprečni presjek specijalnog nosača.

Na osnovu jednačine (5.3) deformacija se može izraziti kao:

$$\varepsilon = \frac{F}{E \cdot A}. \quad (5.4)$$

Uvrštavanjem (5.4) u (5.1) dobija se izraz:

$$F = \frac{U_d}{U_e} \frac{E \cdot 4 \cdot A}{n \cdot k}. \quad (5.5)$$

pomoću kojeg se određuje vrijednost sile u funkciji promjene napona na davaču, pravougaonog presjeka specijalnog nosača osnovne ploče i k - faktora mjernih traka povezanih u puni most.

Baždarenje davača za mjerjenje sile F_z je urađeno opterećivanjem ploče u aksijalnom (vertikalnom) pravcu poznatim težinama, gdje je dobijena linearna zavisnost između opterećenja (N) i vrijednosti napona (V) sa mjernog mosta. Provjera postavljenog mjernog sistema je vršena pomoću davača KMR/200kN proizvođača HBN. Ovaj davač je postavljen ispod matice sa šajbnom, za stezanje osnovne ploče i specijalnog nosača. Pomoćni pribor je pomoću komparatora iznivelišan i kruto stegnut sa specijalnim nosačima. Davač KMR/200kN je u ovom slučaju prednapregnut. Poništavanjem prethodnog opterećenja na mjernom mostu davač je spremjan za upotrebu. Prikaz korišćenog davača KMR/200kN koji radi takođe na principu mjernih traka dat je na Slici 5.13.



Slika 5.13. Davač tipa KMR/200kN

Tačnost mjerjenja zavisi prvenstveno od greške k - faktora koja iznosi 1% i od tačnosti mjernog mosta. Vrijednosti sile nakon baždarenja su pokazale visok stepen saglasnosti ($100\% \pm 1\%$) sa vrijednostima dobijenim elastičnim deformisanjem KMR/200kN davača koji je montiran na specijalni nosač osnovne ploče.

5.3.1.2. Otpornički davači za mjerjenje komponente uzdužne sile

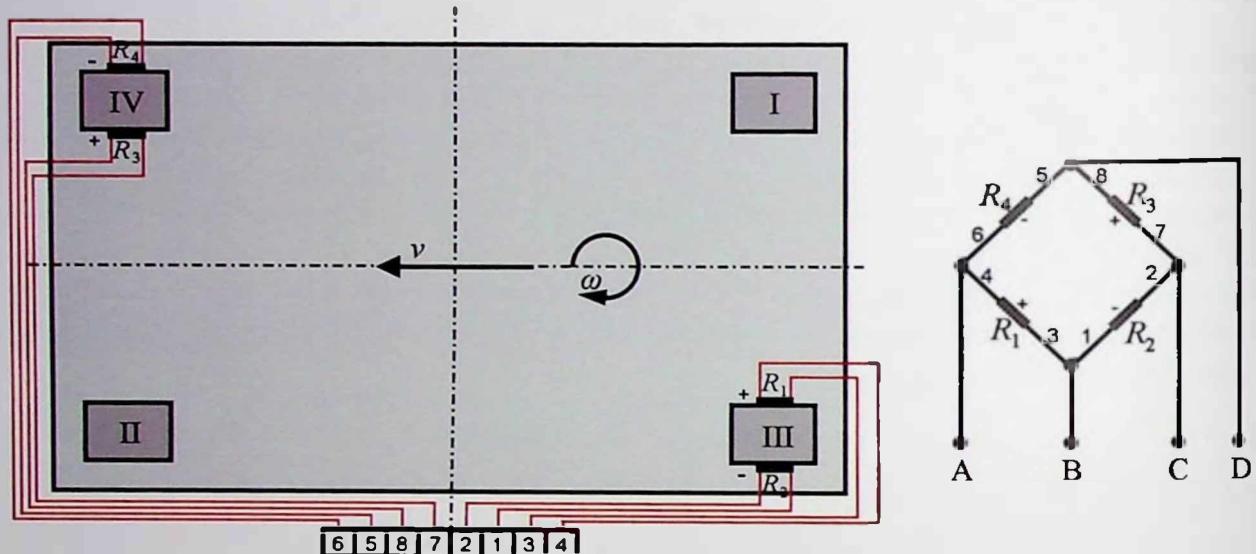
Kada je u pitanju mjerjenje komponente sile F_x , specijalni nosači su opterećeni na savijanje. Pošto je osnovna ploča simetrična u odnosu na liniju spajanja radnih komada, mjerne trake su raspoređene tako da daju osrednjenu vrijednost sile komponente F_x .

Mjerne trake su nalijepljene na specijalne nosače broj III i IV. Svi otpornički davači R_1 , R_2 , R_3 i R_4 su postavljeni uzdužno i normalni su na pravac dejstva sile. Davači su povezani u puni most sa četiri aktivne trake. Kako je dominantan x - pravac dejstva sile zbog uzdužnog kretanja radnog stola i očekivana vrijednost sile u x - pravcu veća je od

5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

sile u y -pravcu. Tako su i odnosi dimenzija specijalnih nosača prilagođeni istraživanom procesu. Trake su postavljene na stranama specijalnog nosača čija je dimenzija poprečnog presjeka $h = 9$ mm, na visini 10 mm od pozicije krutog stezanja specijalnog nosača. Da bi se moglo izmjeriti savijanje ostaje 30 mm slobodne površine specijalnog nosača do pozicije krutog stezanja.

Na Slici 5.14 data je šema rasporeda mjernih traka na specijalnim nosačima za mjerjenje komponente sile F_x , sa šemom mosta i njihovog povezivanja sa standardnim portom na mjernom mostu preko kanala A, B, C i D.



Slika 5.14. Šema rasporeda i povezivanja mjernih traka za mjerjenje komponente sile F_x

Komponenta uzdužne sile F_x je određena korišćenjem poznatog obrasca [2]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot x}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \quad (5.6)$$

gdje su:

W - otporni moment,

$x = 30$ mm - rastojanje kraka sile do sredine mjerne trake,

b - širina poprečnog presjeka specijalnog nosača,

h - debljina poprečnog presjeka specijalnog nosača,

$n = 4$ - broj aktivnih mjernih traka.

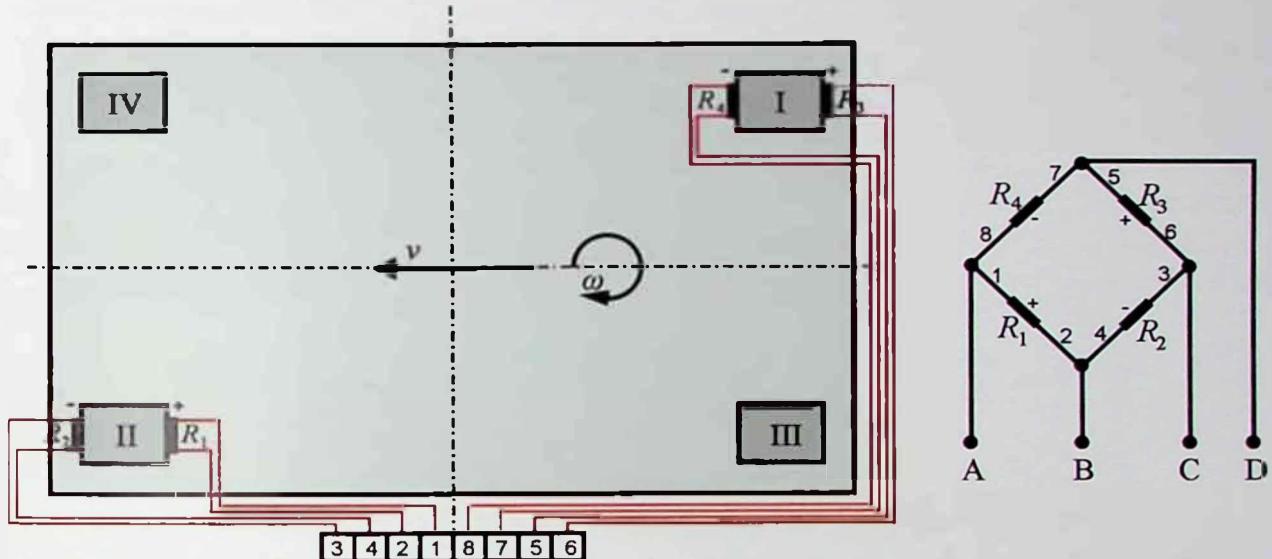
Na osnovu jednačina (5.1), (5.3) i (5.6) određuje se komponenta uzdužne sile F_x .

5.3.1.3. Otpornički davači za mjerjenje komponente bočne sile

Za mjerjenje komponente sile F_y , specijalni nosači su takođe opterećeni na savijanje. Pošto je osnovna ploča simetrična u odnosu na liniju spajanja radnih komada, mjerne trake su raspoređene tako da daju osrednjenu vrijednost komponente sile F_y .

Mjerne trake su nalijepljene na specijalne nosače broj I i II. Svi otpornički davači R_1 , R_2 , R_3 i R_4 su postavljeni uzdužno i normalni su na pravac dejstva sile. Davači su povezani u puni most sa četiri aktivne trake. Trake su postavljene po široj strani poprečnog presjeka specijalnog nosača $b = 11$ mm, na iste visine kao kod slučaja

mjerenja komponente sile F_x . Na Slici 5.15 data je šema rasporeda mjernih traka na specijalnim nosačima za mjerjenje komponente sile F_y , sa šemom mosta i njihovog povezivanja sa standardnim portom na mjernom mostu preko kanala A, B, C i D.



Slika 5.15. Šema rasporeda i povezivanja mjernih traka za mjerjenje komponente sile F_y

Vrijednosti komponente bočne sile F_y , određene su korišćenjem jednačina (5.1), (5.3) i (5.6).

Baždarenje davača za mjerjenje sile F_x i F_y je urađeno opterećivanjem ploče u uzdužnom i bočnom pravcu poznatim težinama, gdje je dobijena linearna zavisnost između opterećenja (N) i vrijednosti napona (V) sa mjernog mostu. Za slučaj baždarenja komponenti sila F_x i F_y napravljen je pomoćni pribor na koji su postavljeni točkići sa ležajevima (trenje u ležajevima se može zanemariti). Preko točkića su postavljene sajle koje su paralelne pravcima dejstva sile. Sajla je prečnika 5 mm, tako da se izduženje sajle u ovom slučaju takođe može zanemariti. Na Slici 5.16 prikazan je specijalni nosač broj III sa nalijepljenim mjernim trakama, a na Slici 5.17 prikazan je postupak baždarenja mjerne opreme za komponentu x. Vrijednosti sile F_x i F_y nakon baždarenja, pokazale su visok stepen tačnosti ($100\% \pm 1\%$) za obje komponente.



Slika 5.16. Specijalni nosač sa nalijepljenim mjerim trakama



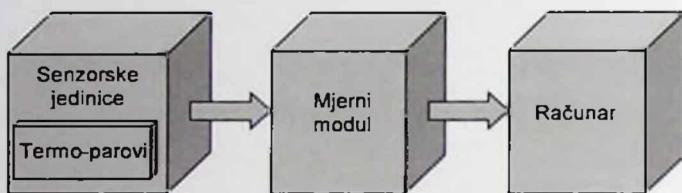
Slika 5.17. Postupak baždarenja u x - pravcu

5.3.2. OPREMA ZA MJERENJE TEMPERATURE

Kod mjerena temperature analogni signal sa senzorskih jedinica (termo-parova) se preko osmokanalnog mjernog modula, konvertuje u digitalni i memoriše se na računaru, sa instalisanim softverskim paketom za akviziciju podataka LabVIEW.

Informacioni mjerni sistem se sastoji od: senzora (termo-parova), mjernog modula i PC računara sa softverom *Measurment & Automation Explorer* i LabVIEW gdje se vrši obrada mjernog signala, a podaci se dobijaju u grafičkom i data obliku [75, 77].

Dijagrami dobijeni na ovaj način su u funkciji temperature ($^{\circ}\text{C}$) i vremena (s). Na Slici 5.18 dat je blok dijagram informacionog mjernog sistema za mjerjenje temperature.



Slika 5.18. Blok dijagram informacionog mjernog sistema za mjerjenje temperature

Mjerni modul se sastoji od: mrežnog modula marke „National Instruments“ FP-1000, osmokanalnog ulaznog modula za termo-parove marke „National Instruments“ FP-TC-120 i priključnog terminala sa vijcima marke „National Instruments“ FP-TB-1 (Slika 5.19).



Slika 5.19. Mjerni modul (oprema za mjerjenje temperature koja radi na principu termo-parova)

Mrežni modul se povezuje sa osmokanalnim ulaznim modulom pomoću paralelnog četrdesete-pinskog porta i ima mogućnost rednog dodavanja ulaznih modula tipa FP-TC-120, za onoliko kanala koliko imamo termo-parova. Mrežni modul je priključen na jednosmjerni izvor struje 24 V, a preko devete-pinskog standardnog porta za računar. Na Slici 5.20 prikazano je istraživačko mjesto za mjerjenje temperature sa povezanim mernom opremom u informacioni mjeri sistem. Dakle, radni komad sa postavljenim

termo-parovima je povezan preko ulaznog modula sa mrežnim modulom koji je povezan sa PC računarom.



Slika 5.20. Prikaz istraživačkog mesta: 1 - stegnuti radni komadi, 2 - alat za FSW, 3 - mjerni moduli, 4 - prikačeni termo-parovi, 5 - osmokanalni ulazni modul, 6 - računar

Za akviziciju podataka koristiće se program napravljen pomoću LabVIEW softvera čiji je proizvođač takođe „National Instruments“.

5.3.2.1. Termo-parovi tipa k

Najčešće metode za mjerjenje temperature kod procesa FSW su: korišćenjem termo-parova i korišćenjem infrared kamera. U inženjerskoj praksi veći stepen primjene imaju termo-parovi jer su dosta jeftiniji i mogu da mjere temperaturu unutrašnjosti materijala, dok su kamere desetinu puta skuplje i uglavnom se koriste za mjerjenje temperature površine alata za zavarivanje. Prilikom mjerjenja temperature u ovom radu koristiće se termoparovi tipa *k*. Termo-par se sastoji od dvije žice: chromel i alumel. Ovim termo-parovima je moguće mjeriti temperature u opsegu od -200°C do $+1350^{\circ}\text{C}$. Osjetljivost termo-para je $41 \mu\Omega/\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prečnik poprečnog presjeka chromel-a i alumel-a je $\varnothing 0.2 \text{ mm}$.

Chromel se sastoji od 90%Ni i 19%Cr. Električna otpornost chromel-a je $0.706 \mu\Omega\text{m}$, a tačka topljenja 1420°C .

Alumel se sastoji od 95%Ni, 2%Mn, 2%Al i 1%Si. Električna otpornost alumel-a je $0.294 \mu\Omega\text{m}$.

Po ANSI standardu chromel je žica žute boje i priključuje se na pozitivni pol mjernog modula, dok je alumel žica crvene boje i priključuje se na negativni pol mjernog modula.

k - faktor za prvu klasu tolerancija je:

± 1.5 temperatura između -40°C i $+375^{\circ}\text{C}$,

± 0.004 temperatura između $+375^{\circ}\text{C}$ i $+750^{\circ}\text{C}$.

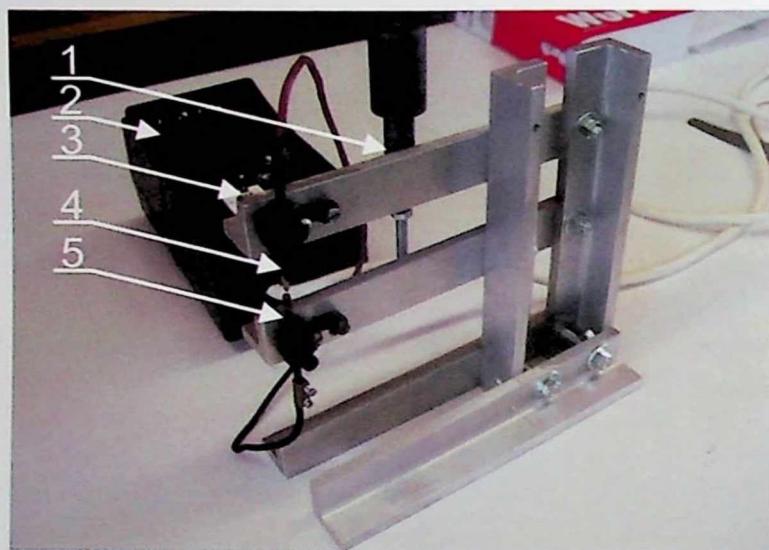
k - faktor za drugu klasu tolerancija je:

5. EKSPERIMENTALNA, POMOĆNA I MJERNA OPREMA

± 2.5 temperatura između -40 °C i +333 °C,
± 0.0075 temperatura između +333 °C i +1200 °C.

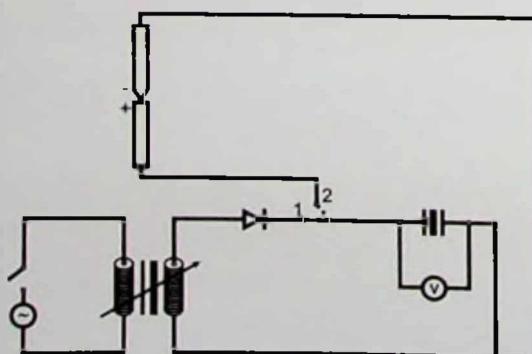
5.3.2.2. Uredaj za tačkasto zavarivanje termo-parova

Termo-parovi tipa k spajače se uređajem koji je napravljen specijalno za ovu namjenu. Tačnost mjerena uveliko zavisi od kvaliteta zavarenog spoja termo-par. Da bi se smanjila zona zavarivanja i izbjeglo unošenje trećeg materijala u sam spoj žica termo-par, za zavarivanje je korišćena metoda spajanja žica postupkom tačkastog elektro-otpornog zavarivanja. Uredaj za zavarivanje termo-parova je napravljen u laboratoriji Mašinskog fakulteta i njegov prikaz je dat na Slici 5.21.



Slika 5.21. Uredaj za zavarivanje termo-parova: 1 - mehanizam za fino podešavanje zazora između elektroda, 2 - kutija sa elektronskim komponentama, 3 - prekidač za punjenje i pražnjenje kondenzatora, 4 - gomja elektroda, 5 - donja elektroda

Uredaj je relativno jednostavne konstrukcije. Njegov rad je zasnovan na osobini kondenzatora da u vrlo kratkom vremenu emituje relativno jaku struju. Elektronska šema uređaja prikazana je na Slici 5.22.



Slika 5.22. Elektronska šema uređaja za zavarivanje termo-parova

Sa šeme se može pratiti proces punjenja i pražnjenja kondenzatora. Kapacitet kondenzatora je $c = 300 \mu\text{F}$, a nazivni napon $U = 24 \text{ V}$. Transformator se napaja strujom 220 V od 50 Hz, a na izlazu daje jačinu struje 16 V, koja se poluprovodničkom diodom pretvara u jednosmjernu struju, kojom se puni kondenzator kada je prekidač u položaju 1, (Slika 5.22). Kada se na voltmetu očita 16 V tada je kondenzator napunjen. Punjenje kondenzatora traje oko pet sekundi, posle čega se prekidač dovodi u položaj 2, (Slika 5.22). Nakon skidanja izolacije sa krajeva žica termo-paru i pozicioniranja između elektroda, dolazi do eksponencijalnog pražnjenja kondenzatora i zagrijavanja žica termo-paru. Pošto je električni otpor u zoni dodira dvije žice termo-paru najveći, u toj zoni će doći do topljenja materijala žica termo-paru. U trenutku topljenja žica termo-paru, spuštanjem gornjeg nosača elektrode vrši se presovanje rastopljenog materijala u zavarivanjo tački i tako se dobija bolja struktura šava nakon očvršćavanja.

Konstrukcija uređaja za zavarivanje termo-parova napravljena je od aluminijumskih L - profila na koje su pričvršćene elektrode pomoću izolovanih elemenata za spajanje da ne bi došlo do kontakta provodnih djelova sa konstrukcijom.

Podešavanje zazora između elektroda vrši se pomoću plastične navrtke i opruge (Slika 5.21 poz. 1) koja omogućava pomjeranje nosača gornje elektrode. Elektrode su izrađene od izmjenljivih bakarnih profila.



6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

6.1. POSTAVKE ISTRAŽIVANJA

Za realizaciju eksperimenta potrebno je izvršiti definiciju eksperimenta, usvojiti plan kao i sve relevantne ulazne podatke koji će se koristiti u eksperimentalnim istraživanjima.

Kako je za uspješno izvođenje procesa FSW, od velikog značaja poznavanje sile zavarivanja kao i topote koja se javlja prilikom odvijanja procesa, u eksperimentalnim istraživanjima će se vršiti njihovo mjerjenje. Da bi parametri sile i temperature bili u dozvoljenim granicama zavisi od izbora geometrijskih parametara alata, kao i režima zavarivanja (ugaone brzine okretanja alata i brzine zavarivanja). Zbog toga se danas posvećuje velika pažnja pravilnom izboru ovih parametara, pa je osnovni zadatak eksperimentalnih istraživanja dobiti podatke na osnovu kojih se može izvršiti optimizacija procesa FSW. Određivanje odnosno pravilan izbor ulaznih parametara zavisi od više faktora. Osnovni faktori su debljina materijala (lima) koji se zavaruje i vrsta materijala koji se zavaruje, da li su u pitanju istorodni ili raznorodni materijali. U ovom radu ispitivaće se zavarivanje postupkom FSW legure aluminijuma.

Nakon izvršenih mjerena sile zavarivanja i temperature, potrebno je izvršiti mehanička i metalografska ispitivanja, kako bi se utvrdio kvalitet zavarenog spoja, kao i defekti koji se javljaju tokom odvijanja procesa FSW. Potrebno je pripremiti radne komade i alate koji će se koristiti u pomenutim istraživanjima.

6.2. DEFINICIJA EKSPERIMENTA

Proces spajanja materijala deformisanjem - FSW, je jedan od najsloženijih procesa koji je praćen velikim deformacijama. Modeliranje tečenja metala, odnosno određivanja veličina koje determinišu proces deformisanja, kao što su: pomjeranja, deformacije, naponi, brzine pomjeranja, brzine deformacije u procesima FSW, vrlo je teško odrediti. Istraživanje procesa FSW, ima za cilj istraživanje zavisnosti svih relevantnih parametara u funkciji ulaznih faktora. Sa stanovišta istraživanja procesa zavarivanja postupkom FSW, postoji velika raznovrsnost u pogledu korišćenih materijala, ali i izvesna ograničenost u obliku materijala. Koriste se uglavnom limovi raznih debljin, koji mogu biti ravni ili sa radijusom. Istraživanja se odnose na leguru aluminijuma i određenu debljinu ravnog lima. Za zavarivanje lima legure aluminijuma usvojena je familija alata kod koje su varirani geometrijski parametri. Alat je osno simetričan i sastoji se iz radnog dijela i tijela alata. Tijelo alata služi za njegovo stezanje u čeljustima mašine koja izvodi proces spajanja. Radni dio alata sastoji se od trna prečnika d i čela alata prečnika D . Ostali djelovi alata kao i radne karakteristike mašine usvojeni su tako da zadovolje proces FSW. Usvojena familija alata za proces FSW je data na Slici 6.1.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 6.1. Familija alata za proces FSW: D - prečnik čela alata,
 d - prečnik tma alata i α - ugao nagiba tma alata

Istraživanja se izvode u laboratorijskim uslovima na sobnoj temperaturi, koja su slična proizvodnim uslovima u industrijskom okruženju. Za izvođenje eksperimenta, procesa spajanja materijala deformisanjem, odnosno zavarivanja postupkom FSW, usvojeno je sledeće:

1. Materijal koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima je legura aluminijuma 6082-T6 (AlSi1MgMn), koja se dosta često zavaruje postupkom FSW, a u industriji ima veliku primjenu.
2. Debljina materijala koji se zavaruje je 7.8 mm.
3. Proces zavarivanja odnosno proces deformisanja materijala se izvodi u čvrstom stanju (beztopljenja materijala).
4. Proces zavarivanja se ostvaruje konstantnom brzinom zavarivanja.

Eksperimentalna istraživanja su koncipirana tako da se izvode u četiri faze. U prvoj fazi vrši se zavarivanje radnih komada (limova od legure aluminijuma 6082-T6) i mjerjenja komponenti sila zavarivanja (F_x - uzdužne sile, F_y - bočne sile i F_z - vertikalne sile). U drugoj fazi eksperimentalnih istraživanja vršeno je mjerjenje temperature zavarivanog materijala na šest mesta. Mjerjenje temperature je vršeno odvojeno od mjerjenja sila, jer su radni komadi obrađivani tako da bi se mogli postaviti termo-parovi. Ovako dobijeni zavareni komadi sa termo-parovima u radnom komadu uticali bi na sledeće faze eksperimentalnih istraživanja. Treća faza se odnosi na mehanička ispitivanja zavarenog spoja, a četvrta na metalografska ispitivanja.

6.3. PLAN EKSPERIMENTA

Na osnovu izvršenih obimnih preliminarnih istraživanja, usvojen je plan eksperimenta i ulazni faktori na osnovu kojih će se pratiti izlazne veličine. Za plan eksperimenta usvojen je potpuni višefaktorni ortogonalni plan sa variranjem faktora na

dva nivoa, sa ponavljanjem u centralnoj tački plana $n_0 = 4$ puta [151]. Broj eksperimentalnih tačaka N , za broj faktora k i brojem ponavljanja u centralnoj tački plana n_0 je:

$$N = 2^k + n_0. \quad (6.1)$$

6.3.1. MATRICA PLANA EKSPERIMENTA

Da bi se moglo izvršiti mjerjenje izlazne veličine (Y), moraju se usvojiti granice intervala varijacije tako da bude zadovoljen uslov:

$$X_{0i}^2 = X_{gi} \cdot X_{di}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (6.2)$$

gdje su:

X_{gi} - vrijednost i-tog faktora na gornjem nivou,

X_{di} - vrijednost i-tog faktora na donjem nivou i

X_{0i} - vrijednost i-tog faktora na osnovnom nivou.

Ovaj uslov važi za ortogonalne planove. Nivoi i-tog faktora kodiraju se preko jednačine transformacije [151]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{w_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (6.3)$$

gdje su:

X_i - prirodna vrijednost i-tog faktora i

w_i - Interval varijacije faktora X_i , čija je brojna vrijednost jednak razlici gornjeg i osnovnog nivoa, odnosno osnovnog i donjeg nivoa.

6.3.2. ULAZNI FAKTORI

Kao ulazne veličine (nezavisno promjenjive - faktori) usvajaju se geometrijski faktori alata za zavarivanje i režimi zavarivanja.

Ulagani faktori režima zavarivanja (kinematski faktori) su:

$$X_1 = v \text{ mm/min}, \quad (6.4)$$

$$X_2 = \omega \text{ o/min}, \quad (6.5)$$

gdje su:

v - brzina zavarivanja,

ω - ugaona brzina okretanja alata.

Ulagani geometrijski faktori alata su:

$$X_3 = \alpha^0, \quad (6.6)$$

$$X_4 = d \text{ mm}, \quad (6.7)$$

$$X_5 = D \text{ mm}, \quad (6.8)$$

gdje su:

α - ugao nagiba trna alata,

d - prečnik trna alata,

D - prečnik čela alata.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Uzimajući u obzir izraz (6.2), usvojeni su nivoi varijacije ulaznih faktora i dati su u Tabeli 6.1, a u Tabeli 6.2 je dat usvojeni ortogonalni plan po kome će se izvoditi eksperimentalna istraživanja i dobiti izlazne veličine.

Tabela 6.1. Nivoi varijacije ulaznih faktora plana eksperimenta

Ulazni faktori:	Gornji nivo:	Donji nivo:	Osnovni nivo:
X_1	200	80	125
X_2	1000	630	800
X_3	5	3	3.87
X_4	7	5	5.92
X_5	28	25	26.46

Tabela 6.2. Plan matrica višefaktomog eksperimentalnog plana

PLAN - MATRICA										
Br.	Brzina zavarivanja mm/min	Ugaona brzina okretanja alata o/min	Ugao nagiba trna alata °	Prečnik trna alata mm	Prečnik čela alata mm	Vektori izlaza				
	$X_1 = v$	$X_2 = \omega$	$X_3 = \alpha$	$X_4 = d$	$X_5 = D$	$F_x, F_y, F_z, T_1, T_2,$ $T_3, T_4, T_5, T_6, Rm_x,$ Rm_y i ρ				
x_{gi}	200	1000	5	7	28					
x_{di}	80	630	3	5	25					
x_{0i}	125	800	3.87	5.92	26.46					
1.	+	200	+	1000	+	5	+	7	+	28
2.	-	80	+	1000	+	5	+	7	+	28
3.	+	200	-	630	+	5	+	7	+	28
4.	-	80	-	630	+	5	+	7	+	28
5.	+	200	+	1000	-	3	+	7	+	28
6.	-	80	+	1000	-	3	+	7	+	28
7.	+	200	-	630	-	3	+	7	+	28
8.	-	80	-	630	-	3	+	7	+	28
9.	+	200	+	1000	+	5	-	5	+	28
10.	-	80	+	1000	+	5	-	5	+	28
11.	+	200	-	630	+	5	-	5	+	28
12.	-	80	-	630	+	5	-	5	+	28
13.	+	200	+	1000	-	3	-	5	+	28
14.	-	80	+	1000	-	3	-	5	+	28
15.	+	200	-	630	-	3	-	5	+	28
16.	-	80	-	630	-	3	-	5	+	28
17.	+	200	+	1000	+	5	+	7	-	25
18.	-	80	+	1000	+	5	+	7	-	25
19.	+	200	-	630	+	5	+	7	-	25
20.	-	80	-	630	+	5	+	7	-	25

Tabela 6.2. Plan matrica višefaktornog eksperimentalnog plana (nastavak)

21.	+	200	+	1000	-	3	+	7	-	25	
22.	-	80	+	1000	-	3	+	7	-	25	
23.	+	200	-	630	-	3	+	7	-	25	
24.	-	80	-	630	-	3	+	7	-	25	
25.	+	200	+	1000	+	5	-	5	-	25	
26.	-	80	+	1000	+	5	-	5	-	25	
27.	+	200	-	630	+	5	-	5	-	25	
28.	-	80	-	630	+	5	-	5	-	25	
29.	+	200	+	1000	-	3	-	5	-	25	
30.	-	80	+	1000	-	3	-	5	-	25	
31.	+	200	-	630	-	3	-	5	-	25	
32.	-	80	-	630	-	3	-	5	-	25	
33.	0	125	0	800	0	3.87	0	5.92	0	26.46	
34.	0	125	0	800	0	3.87	0	5.92	0	26.46	
35.	0	125	0	800	0	3.87	0	5.92	0	26.46	
36.	0	125	0	800	0	3.87	0	5.92	0	26.46	

6.4. ALATI ZA ZAVARIVANJE POSTUPKOM FSW

Familija alata koja se koristi u eksperimentalnim istraživanjima, napravljena je od čelika Č.4751. Nakon mašinske obrade alati su termički obrađeni. Familija alata za proces FSW dizajnirana je u kompjuterskom programu Pro/ENGINEER-u. Na osnovu usvojenog eksperimentalnog plana, bilo je potrebno napraviti set od devet alata čije su varirane vrijednosti prečnika čela alata, prečnika trna alata i ugla nagiba trna alata date u Tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Set od devet alata za FSW, potreban za eksperimentalna istraživanja

Broj alata	Ugao nagiba trna alata	Prečnik trna alata	Prečnik čela alata
	$X_3 = \alpha^{\circ}$	$X_4 = d \text{ mm}$	$X_5 = D \text{ mm}$
x_{gi}	5	7	28
x_{di}	3	5	25
x_{0i}	3.87	5.92	26.46
Alat 1.	5	7	28
Alat 2.	3	7	28
Alat 3.	5	5	28
Alat 4.	3	5	28
Alat 5.	5	7	25
Alat 6.	3	7	25
Alat 7.	5	5	25
Alat 8.	3	5	25
Alat 9.	3.87	5.92	26.46

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Ostale vrijednosti alata su usvojene tako da zadovoljavaju uslove mašine i debljine materijala. Prikaz alata sa dimenzijama dat je na Slici 6.2 (a).

$D_{tijela} = 19 \text{ mm}$, prečnik tijela alata (uslovjen veličinom čaure za pritezanje alata),

$H_{tijela} = 40 \text{ mm}$, visina tijela alata (uslovljena veličinom stezne glave mašine),

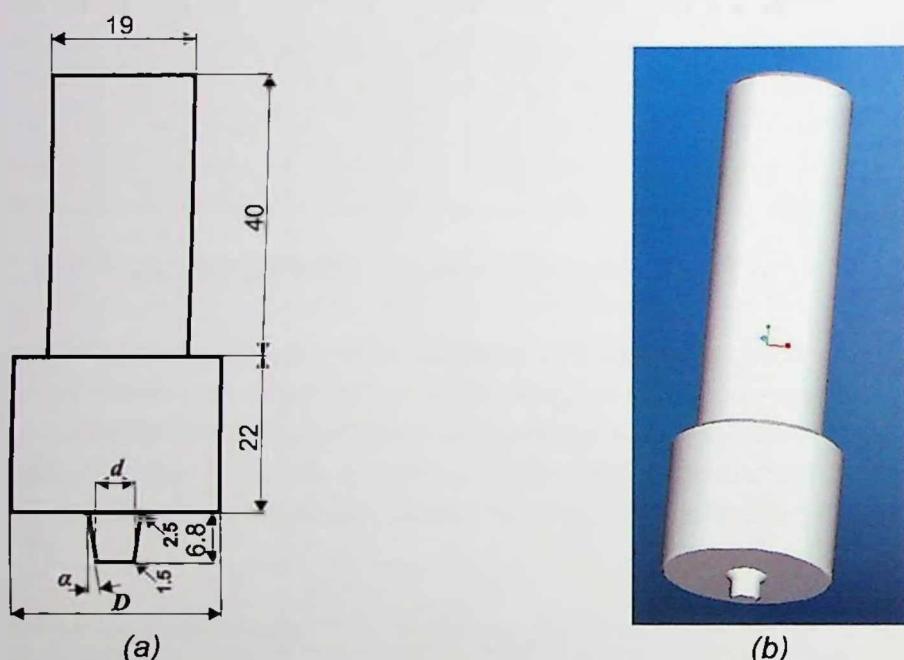
$H_{čela alata} = 22 \text{ mm}$, visina čela alata (uslovljena vrstom materijala koji se zavaruje),

$H_{trna alata} = 6.8 \text{ mm}$, visina trna alata (uslovljena debljinom lima koji se zavaruje),

$r_{trna alata} = 1.5 \text{ mm}$, radijus trna (uslovjen vrstom materijala koji se zavaruje),

$R_{trna alata} = 2.5 \text{ mm}$, radijus površine prelaza trna i čela alata (uslovjen vrstom materijala koji se zavaruje).

Na Slici 6.2 (b) dat je dizajniran alat u Pro/ENGINEER-u, za centralne tačke plana broj 33, 34, 35 i 36. Set alata za FSW izrađen je na strugu u laboratoriji Mašinskog fakulteta (Slika 6.3). Ovako dobijeni set alata za FSW, podvrнут je termičkoj obradi.



Slika 6.2. Alat za FSW: (a) alat sa usvojenim dimenzijama, (b) alat broj 9 dizajniran u Pro/ENGINEER-u, za centralne tačke plana broj 33, 34, 35 i 36.

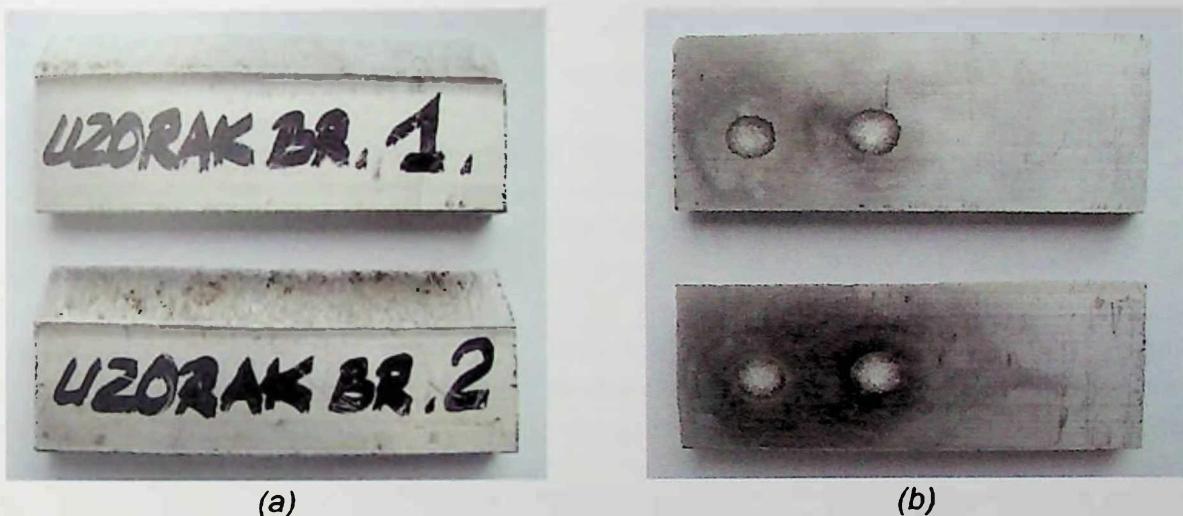


Slika 6.3. Izrađeni set alata po planu eksperimenta

6.5. EKSPERIMENTALNI MATERIJAL I NJEGOVA PRIPREMA

Na osnovu definicije eksperimenta, materijal koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima je lim legure aluminijuma po evropskom standardu EN-573-3 numeričke oznake 6082-T6 ili alfanumeričke AlSi1MgMn [149]. Pošto se na našim prostorima do nedavno koristio JUS standard, nekadašnja oznaka legure po JUS C.C2.100/1986 standardu bila je AlMgSi1. Oznaka po JUS-u se navodi jer je korišćena legura aluminijuma proizvedena po ovom standardu. Ova legura ima veliku industrijsku primjenu i proizvedena je u Kombinatu aluminijuma Podgorica - „KAP”, gdje je u sektoru Kontrole kvaliteta i ispitani hemijski sastav pomoću kvantometra. Analiza je izvršena na dva uzorka (Slika 6.4), a hemijski sastav je dat u Tabeli 6.4.

Legura 6082-T6 se uglavnom koristi tamo gdje su potrebne poboljšane mehaničke osobine: šipke, veliki djelovi za transportnu industriju, za razne konstrukcije, za podove i platforme, kao i za opštu upotrebu.



Slika 6.4. Uzorci izvršene hemijske analize: (a) pogled sa prednje strane, (b) pogled sa zadnje strane

Tabela 6.4. Hemijski sastav korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)

Šarža	Kvalitet %	Hemijski sastav u %									
		% Al	% Fe	% Si	% Ti	% Cu	% Zn	% V	% Cr	% Mn	% Mg
Uzorak 1.	98.25	0.22	0.85	0.01	0.002	0.062	0.006	0.001	0.16	0.43	0.002
Uzorak 2.	98.29	0.21	0.83	0.01	0.002	0.060	0.006	0.001	0.15	0.43	0.001

Materijal je dobijen presovanjem na presi za ekstruziju $F_n = 27 \text{ MN}$, u obliku L - profila dimenzija $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 6000 \text{ mm}$, debljine 7.8 mm (Slika 6.5). Temperatura homogenizacije je $580 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a presovanja $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Oznaka T6 znači da je legura rastvarajuće žarena, vještački starena, držana u peći šesnaest časova na temperaturi $165 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Hlađenje je vršeno na vazduhu. Vrijeme između presovanja i kaljenja nije prešlo pet dana.

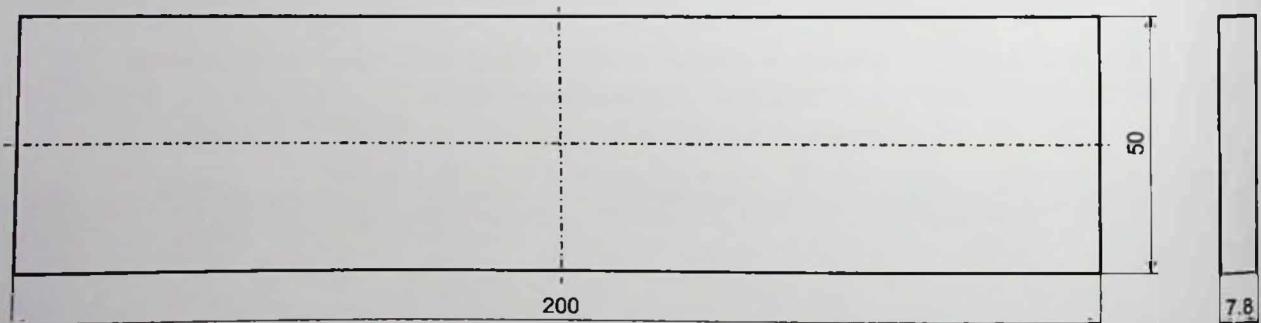
6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Komercijalna primjena ovog materijala je bila za izradu stubova rešetkaste konstrukcije, za dalekovode visokog napona. Zbog svojih mehaničkih karakteristika, male specifične težine i brze montaže, lako može da potisne primjenu čeličnih stubova rešetkaste konstrukcije.



Slika 6.5. Legura 6082-T6 dobijena ekstruzijom u obliku L-profila

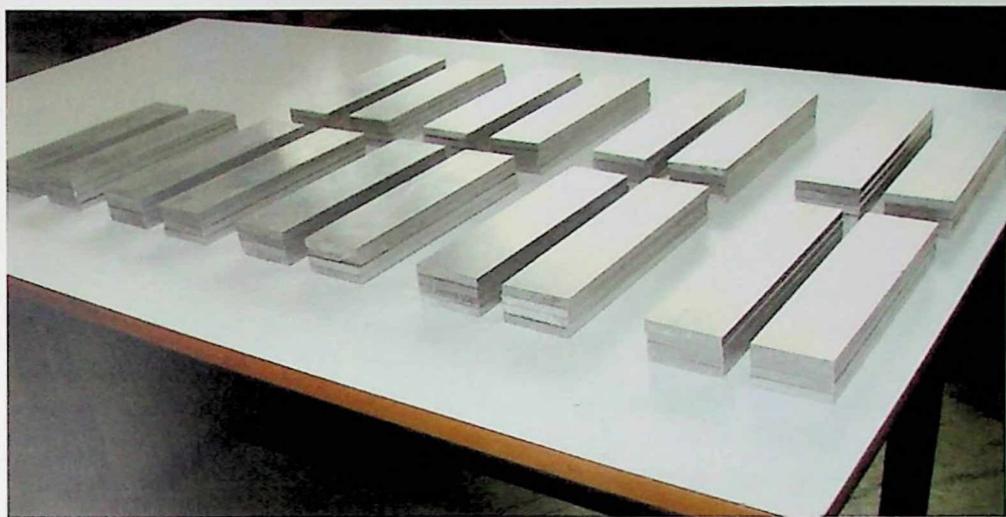
Radni komadi koji su bili potrebni za izvođenje eksperimentalnih istraživanja, dobijeni su rezanjem iz L - profila na tračnoj testeri UD 210, a zatim obrađivani na tražene dimenzije na univerzalnoj glodalici. Prilikom rezanja radnih komada iz L - profila vršeno je hlađenje emulzijom, kako se ne bi promijenile mehaničke osobine osnovnog materijala, pod uticajem topлоте koja se stvara od testere ili od cirkulara. Dimenzije radnog komada su $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, debljine 7.8 mm (Slika 6.6), a pripremljeni radni komad, je dat na Slici 6.7. Pošto u eksperimentalnom planu ima 36 eksperimentalnih tačaka bilo je potrebno dobiti 72 radna komada (Slika 6.8).



Slika 6.6. Crtež radnog komada sa dimenzijama



Slika 6.7. Radni komad koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima



Slika 6.8. Radni komadi potrebni za izvođenje eksperimenta (72 komada)

Mehaničke osobine osnovnog materijala radnog komada date su u Tabeli 6.5, a fizičke osobine u Tabeli 6.6.

Tabela 6.5. Mehaničke osobine korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)

Granica razvlačenja 0.2 % MPa	Zatezna čvrstoća MPa	Granica kidanja MPa	Izduženje A5 %	Tvrdoća po Vickersu HV
310	340	210	11	100

Tabela 6.6. Fizičke osobine korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)

Gustina g/cm ³	Tačka topljenja °C	Modul elastičnosti GPa	Električna otpornost Ω.m	Toplotna provodljivost W/m.K	Toplotno širenje /K
2.70	555	70	0.038x10 ⁻⁶	180	24x10 ⁻⁶

6.5.1. PRIPREMA RADNIH KOMADA ZA MJERENJE TEMPERATURE

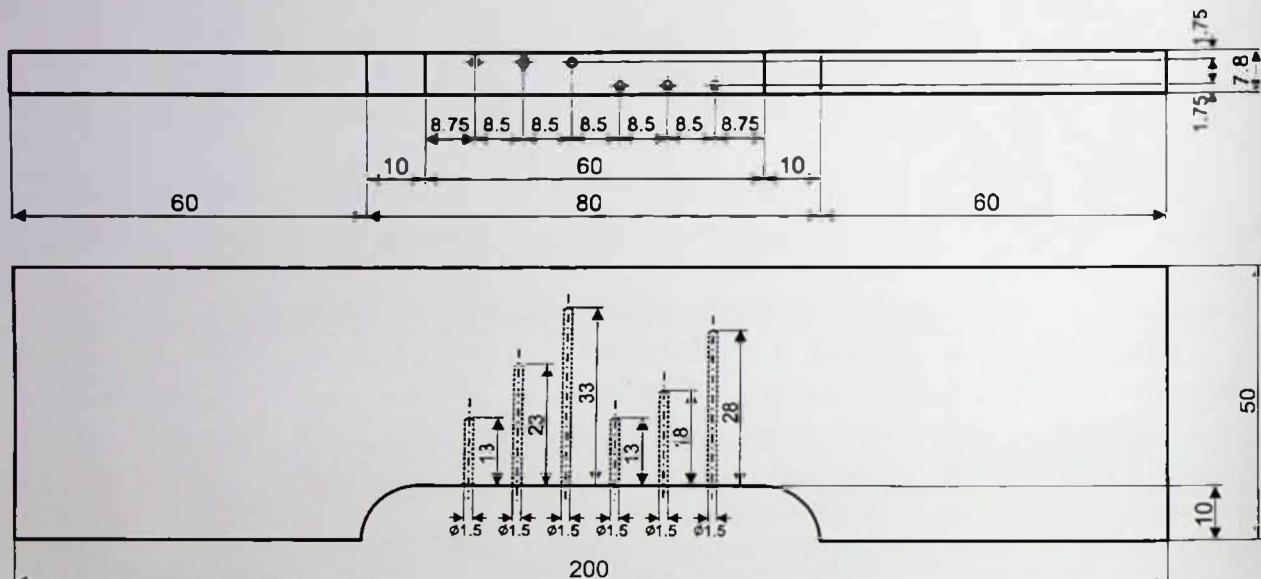
Da bi se mogla izmjeriti temperatura materijala u toku odvijanja procesa FSW bilo je potrebno obraditi radne komade i izbušiti rupe za termo-parove. Na radnom komadu se u jednom prolazu izrađuje upust, kako bi se mogle izbušiti rupe do željene dubine (Slika 6.9). Rupe su bušene burgijom prečnika 1.5 mm od upusta do određene pozicije na dubini od 13 mm, 18 mm, 23 mm, 28 mm i 33 mm. Rupe su udaljene jedna od druge u uzdužnom pravcu po 8.5 mm, a po visini 1.75 mm od radne (gornje) površine i 1.75 mm od donje površine. Crtež rasporeda rupa u koje se smještaju termo-parovi po visini i dubini, dat je na Slici 6.10. U ovako pripremljene radne komade uvlači se šest termo-parova (Slika 6.11), koji se lijepe dvokomponentnim ljepilom koje je otporno na visoke temperature do 1600 °C (Slika 6.12). Ljepilo popunjava zapreminu napravljenog upusta i radni komad ima oblik dat na Slici 6.13. Za potrebe eksperimentalnih istraživanja bilo je

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

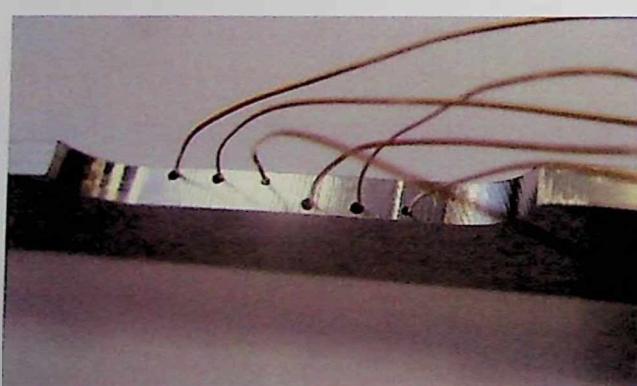
potrebno napraviti 36 ovakvih radnih komada, jer je mjerjenje temperature u materijalu vršeno samo sa istosmjerne strane zavarivanja.



Slika 6.9. Izbušene rupe u radnom komadu, sa napravljenim upustom



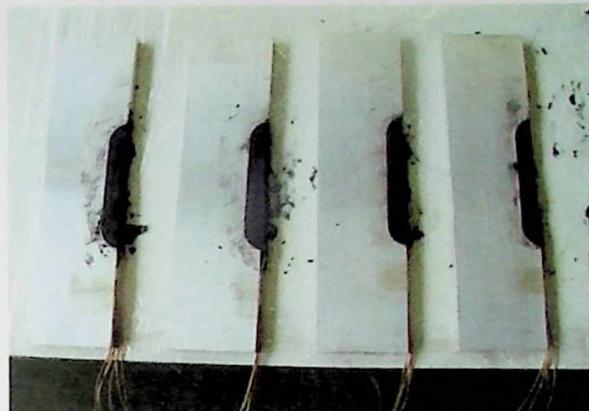
Slika 6.10. Crtanje rasporeda rupa u koje se smještaju termo-parovi



Slika 6.11. Postavljanje termo-parova na mjerne pozicije



Slika 6.12. Lijepljenje termo-parova dvokomponentnim ljepilom



Slika 6.13. Postavljeni termo-parovi u radnim komadima

6.6. IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

6.6.1. MJERENJE SILA KOD PROCESA FSW

U okviru prve faze eksperimentalnih istraživanja izvršena su mjerjenja komponenti sila zavarivanja: vertikalne ili aksijalne sile F_z , uzdužne ili longitudinalne sile F_x i bočne sile F_y . Istraživanja su izvedena saglasno eksperimentalnom planu. Izvođenje eksperimentalnih tačaka uzimano je redosledom iz plan matrice.

Mjerjenje sila je izvršeno korišćenjem precizne analogno-digitalne mjerne opreme, povezane u informacioni mjerni sistem, kao što je objašnjeno u Poglavlju 5.3.1.

Nakon postavljanja radnih komada na pomoći pribor i njihovog pozicioniranja i stezanja i nakon startovanja informacionog mjernog sistema za mjerjenje sila u funkciji vremena, glodalica je puštena u rad. Izvođenje procesa u odnosu na kretanje alata se može podijeliti u tri etape. U prvoj etapi rotirajući alat brzim hodom dolazi do linije spajanja, nakon čega se alat sa svojim trnom ukopava u materijal. Kada je čelo alata dohvatio radni komad, započinje proces zavarivanja trenjem, odnosno proces deformisanja materijala u čvrstom stanju. Druga etapa počinje puštanjem u rad uzdužnog kretanja radnog stola glodalice, gdje u stvari počinje spajanje materijala radnih komada. Dužina zavarenog spoja iznosi 166 mm. Treća etapa počinje kada se započne izvlačenje alata iz radnog komada, gdje se i završava proces FSW. U tom trenutku se zaustavlja i proces mjerjenja sa informacionim mjernim sistemom. Signali otporničkih davača sa specijalnih nosača osnovne ploče pomoćnog pribora se memorišu na hard disku računara. Dijagrami dobijeni na ovaj način su u funkciji napona struje (V) i vremena (s), iz kojih se na osnovu poznatih relacija i vrijednosti baždarenja mjerne opreme dobijaju dijagrami sila (N) u funkciji vremena (s). Zavarivanje radnih komada je vršeno u jednom prolazu.

Na Slici 6.14 prikazan je početak procesa FSW kada je alat prišao liniji spajanja, dok je na Slici 6.15 prikazan završetak procesa FSW kada je alat izašao iz materijala zavarenih radnih komada. Sa slike se jasno vidi otisak od alata i zavareni spoj dobijen postupkom FSW, kao i rupa „keyhole“ koju ostavlja otisak trna alata. Na Slici 6.16 su dati dobijeni dijagrami komponenti sila u funkciji vremena procesa FSW u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Zbog obimnosti ovog rada, dijagrami sila u funkciji vremena za ostale tačke eksperimentalnog plana biće dati u Prilogu 2.

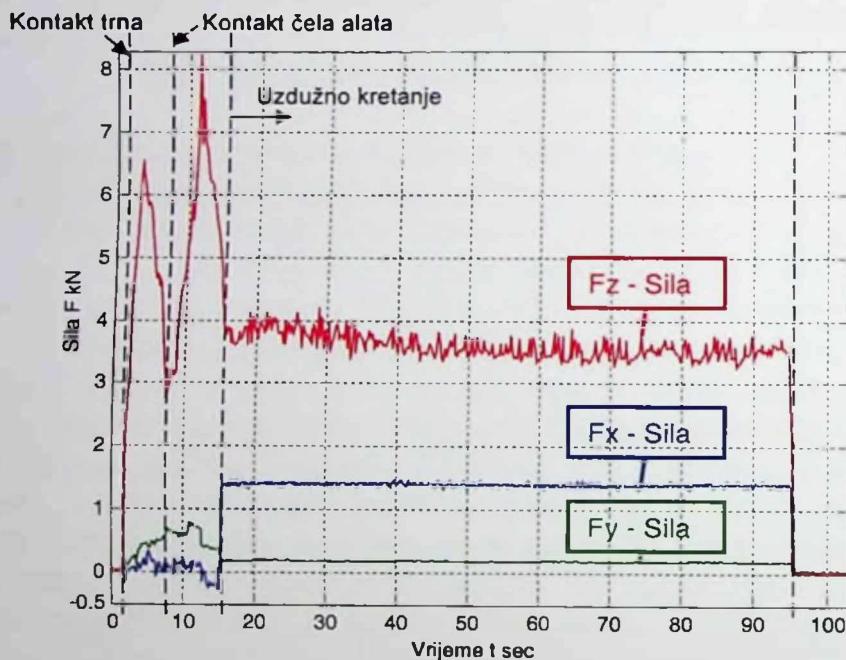
6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 6.14. Prikaz početka procesa FSW



Slika 6.15. Prikaz završetka procesa FSW



Slika 6.16. Dijagram sila dobijen korišćenjem otporničkih davača (mjernih traka), u centralnoj tački plana broj 36

Sa Slike 6.16 se vidi da vertikalna sila zavarivanja F_z ima najveće vrijednosti kada se rotirajući alat sa svojim trnom ukopava u materijal. Tom prilikom materijal se zagrijeva usled dejstva trenja trna alata i materijala. Tada sila F_z opada do momenta kontakta većeg dijela čela alata i površine radnih komada, kada sila F_z dostiže svoju najveću vrijednost, jer velika površina čela alata započinje ukopavanje u materijal. Radni komadi se još više zagrijevaju usled dejstva trenja nastalog od čela alata i trna alata istovremeno, pa sila F_z počinje da opada. Kada se na glodalici zada uzdužno kretanje radnog stola odnosno izabrana brzina zavarivanja, sile F_x , F_y i F_z zadržavaju konstantne vrijednosti, sve do trenutka kada alat izade iz materijala. Kada se zavareni radni komadi ohlade, vršeno je njihovo skidanje sa radnog stola glodalice. Na Slici 6.17 je dat prikaz zavarenih radnih komada sa gornje strane, odnosno strane sa koje se vrši zavarivanje za centralnu tačku plana broj 36.



Slika 6.17. Izgled zavarenog spoja sa gornje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana broj 36

Izgled vara sa donje strane zavarenih radnih komada zavisi od oslone ploče. Pošto je oslona ploča kaljena i fino brušena zavareni spoj će imati glatku površinu, tako da se pod dodirom ruke ne može osjetiti spoj radnih komada. Izgled zavarenog spoja sa donje strane radnih komada je dat na Slici 6.18.



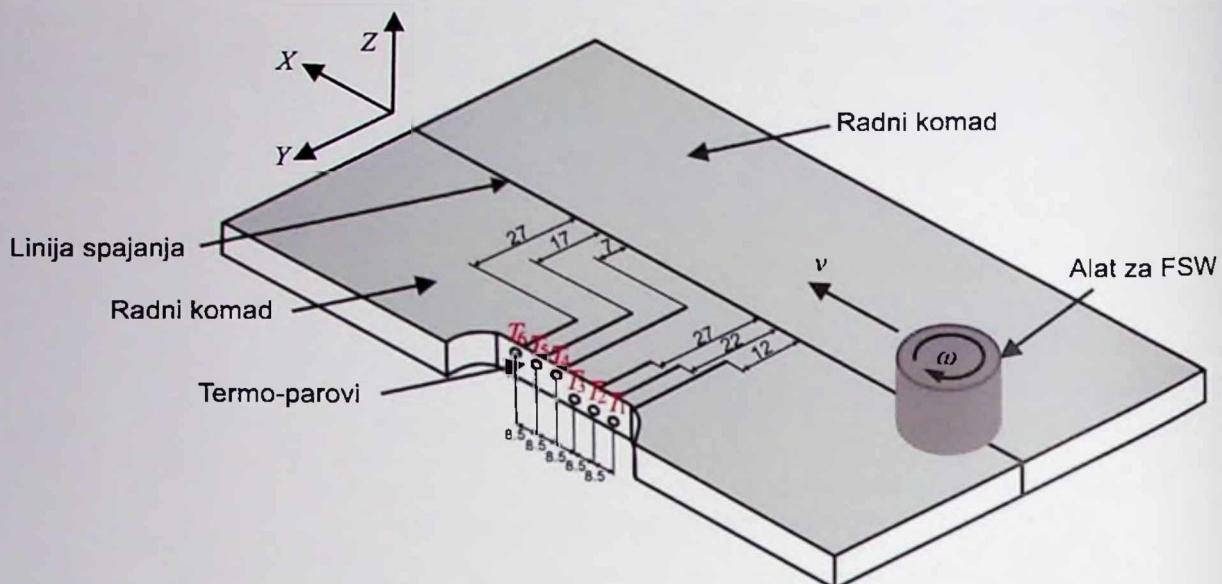
Slika 6.18. Izgled zavarenog spoja sa donje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana broj 36

6.6.2. MJERENJE TEMPERATURE KOD PROCESA FSW

U okviru druge faze eksperimentalnih istraživanja izvršeno je mjerjenje temperature kod procesa FSW legure aluminijuma 6082-T6, pomoću precizne analogno-digitalne mjerne opreme povezane u informacioni mjerni sistem, kao što je objašnjeno u Poglavlju 5.3.2.

Za mjerjenja temperature napravljeni su radni komadi sa postavljenim termo-parovima od Al-Cr žice, koji su zavareni uređajem za zavarivanje termo-parova, kao što je objašnjeno u Poglavlju 6.5.1. Šema postavljanja termo-parova u odnosu na liniju spajanja data je na Slici 6.19.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 6.19. Šema mjernih pozicija temperaturre u radnom komadu koji se zavaruje

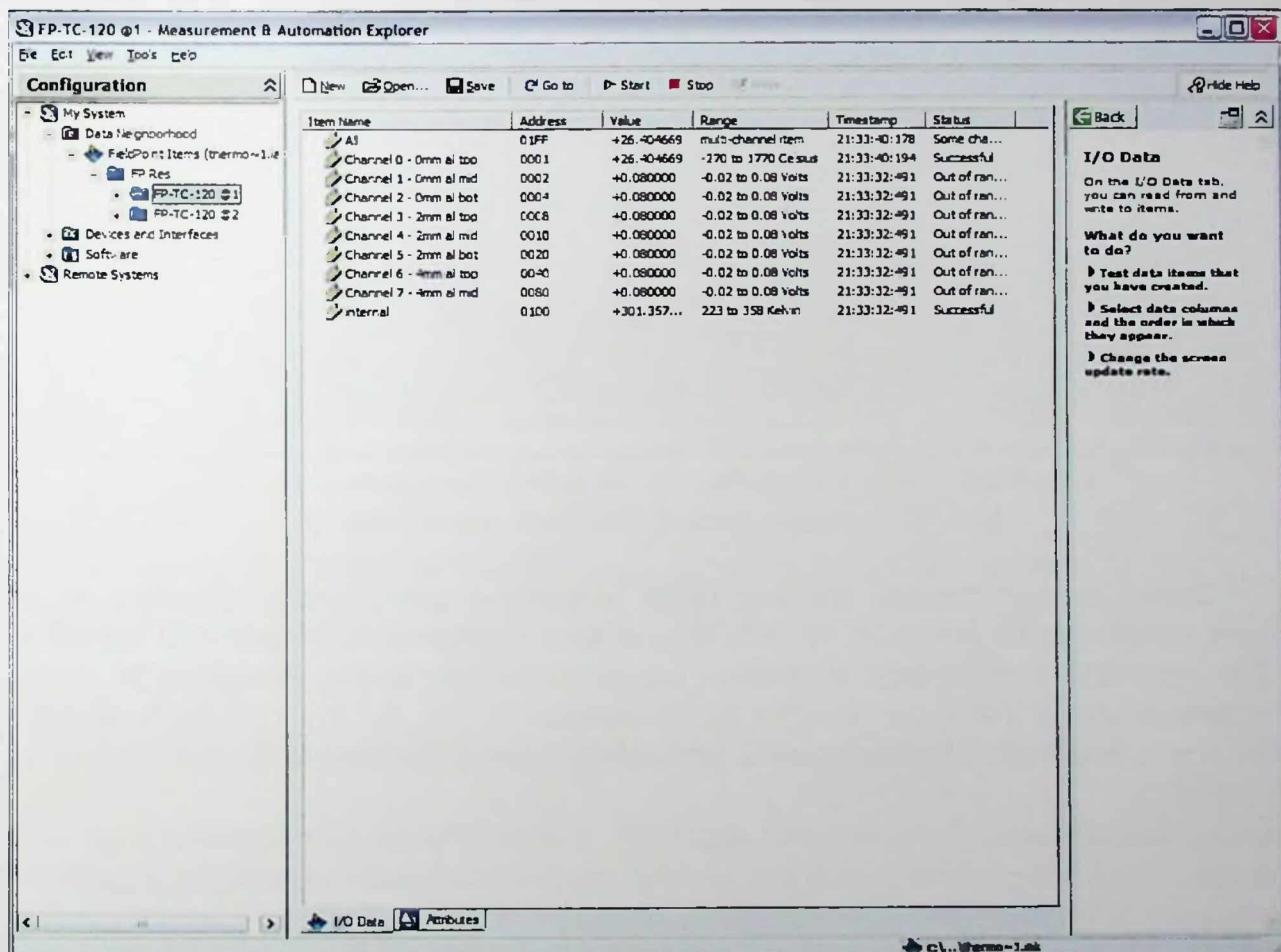
Najveća dimenzija poluprečnika trna, na osnovu plana eksperimenta iznosi 3.5 mm. Šema mjernih pozicija temperature je izabrana tako da je najbliži termo-par udaljen od trna alata svega 3.06 mm. Na taj način možemo da izmjerimo temperaturu same „grumen” zone, neposredno ispod čela alata. Usvojeno je mjerjenje temperature u šest pozicija. Tri se nalaze 1.75 mm od gornje površine radnog komada, a udaljene su od linije spajanja 7 mm (termo-par T_4), 17 mm (termo-par T_5) i 27 mm (termo-par T_6). Ostale tri mjerne pozicije udaljene su 1.75 mm od donje površine radnog komada, a od linije spajanja 12 mm (termo-par T_1), 22 mm (termo-par T_2) i 27 mm (termo-par T_3), kao što je prikazano na Slici 6.19. Svih šest termo-parova udaljeni su jedan od drugog 8.5 mm. Ovaj raspored termo-parova nam omogućava da izmjerimo temperaturu u svim mikrostrukturnim zonama i da imamo potpunu sliku generisanja i distribucije toplote kroz materijal. Na Slici 6.20 prikazani su zavareni radni komadi sa postavljenim termo-parovima, koji su povezani u informacioni sistem za mjerjenje temperature.



Slika 6.20. Prikaz mjerjenja temperature kod procesa FSW

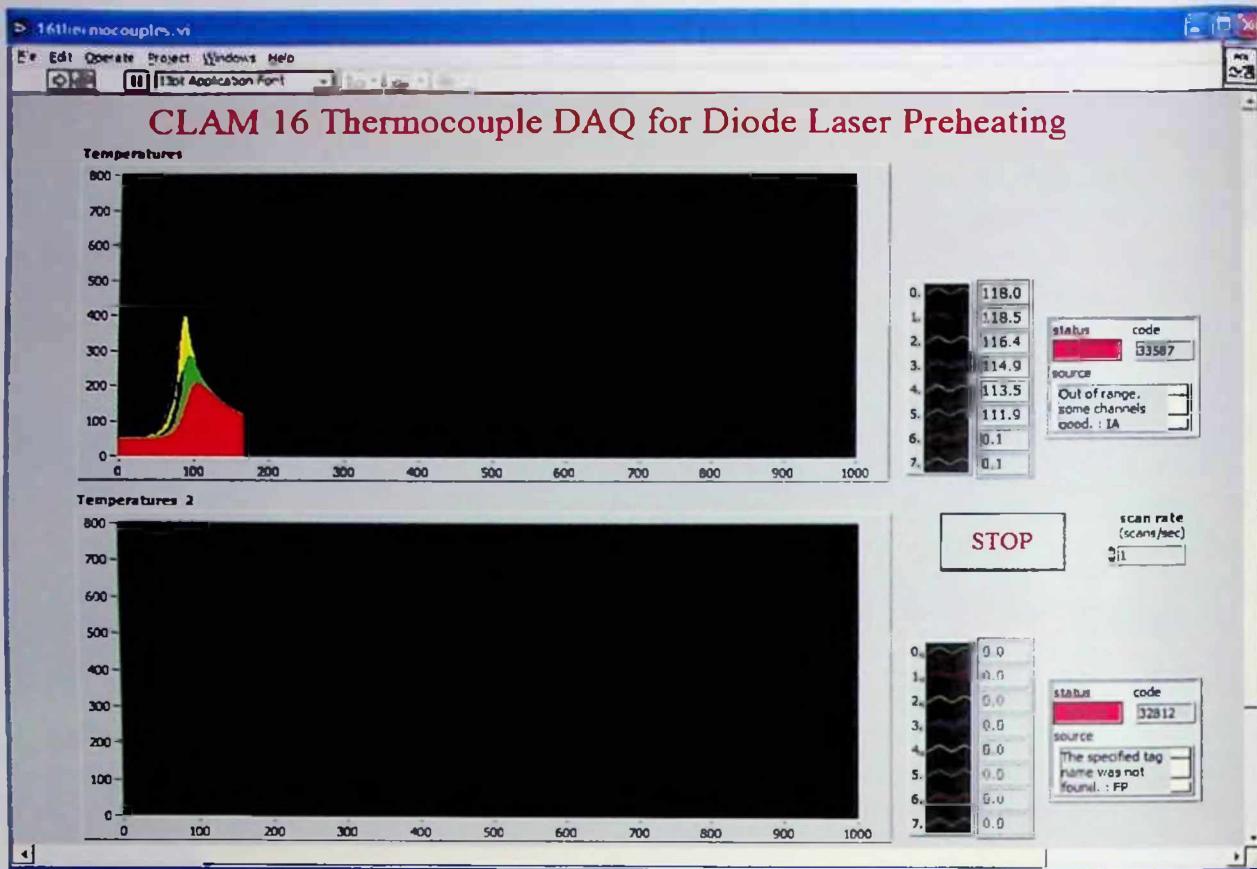
Radni program koji se koristi prilikom mjerjenja temperature je softver „*Measurment & Automation Explorer version 3.1.0.3021*”, čiji je interfejs prikazan na Slici 6.21. U ovom softveru je napravljen fajl „*thermocouples16.iak*”, koji je prilagođen korišćenom mjernom modulu FP-1000 i podešeni su parametri kao što su broj kanala koji se koriste (u našem slučaju šest), kao i izbor jedinica u kojima će se vršiti mjerjenje temperature (u našem slučaju stepeni Celzijusove skale). Za akviziciju podataka koristi se program napravljen pomoću LabVIEW softvera „*16thermocouples.vi*”, u kojem su izmjerene temperature u svim tačkama eksperimentalnog plana i dobijene vrijednosti u grafičkom i „*data*“ obliku.

Na Slici 6.22 date su dobijene vrijednosti temperature za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36.



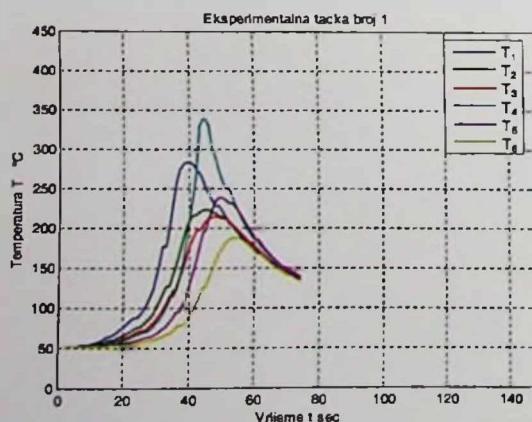
Slika 6.21. Softver Measurment & Automation Explorer

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

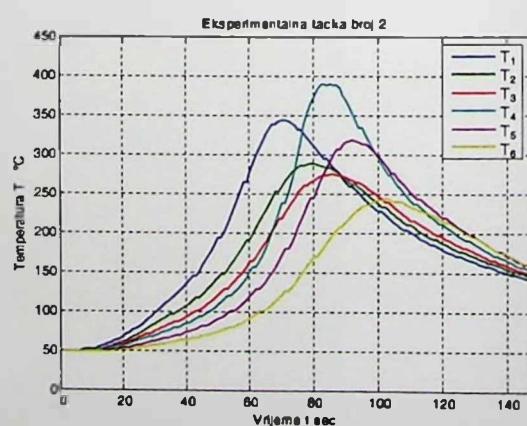


Slika 6.22. Eksperimentalno dobijena promjena temperature u funkciji vremena, u centralnoj tački plana broj 36

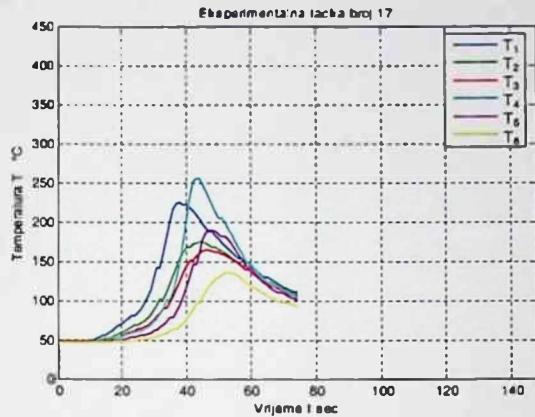
Ovako dobijeni podaci za sve tačke eksperimentalnog plana obrađeni su u programskom jeziku MATLAB (v. 7.0). Na sledećim slikama (od Slike 6.23 do Slike 6.28) prikazani su dijagrami izmjerene temperature u 1, 2, 17, 20, 29. i 34. tački eksperimentalnog plana za pozicije termo-parova T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 i T_6 , u funkciji vremena t . Ostali dijagrami izmjerene temperature eksperimentalnim putem dati su u Prilogu 2.



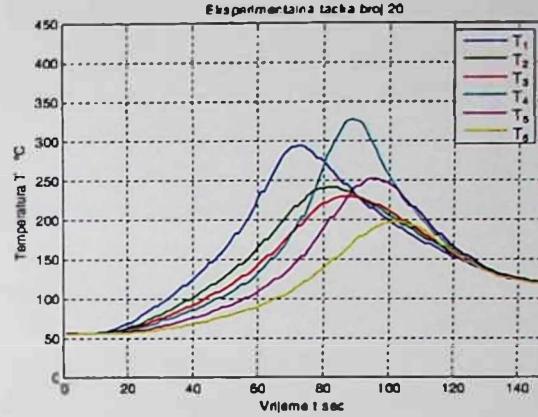
Slika 6.23. Dijagram temperature u 1. tački eksperimentalnog plana



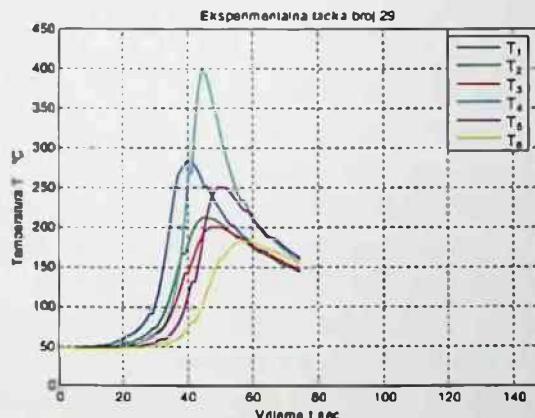
Slika 6.24. Dijagram temperature u 2. tački eksperimentalnog plana



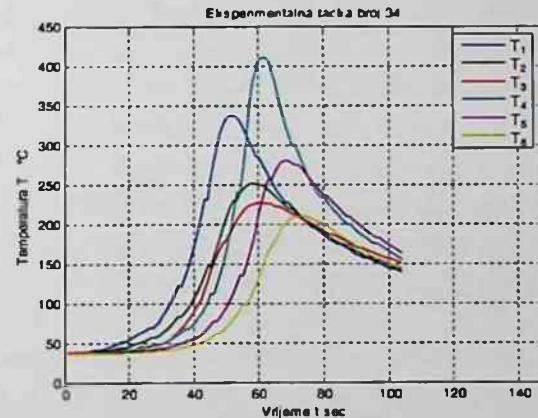
Slika 6.25. Dijagram temperature u 17. tački eksperimentalnog plana



Slika 6.26. Dijagram temperature u 20. tački eksperimentalnog plana



Slika 6.27. Dijagram temperature u 29. tački eksperimentalnog plana



Slika 6.28. Dijagram temperature u 34. tački eksperimentalnog plana

6.7. MEHANIČKA ISPITIVANJA ZAVARENOG SPOJA

Spoj zavaren primjenom postupka FSW kao kompleksna i heterogena struktura, predstavlja kritično mjesto u zavarenom radnom komadu, odnosno kada je u pitanju industrijska primjena u zavarenoj konstrukciji. Zbog toga se u najvećem broju slučajeva, sigurnost zavarenog spoja odnosno zavarene konstrukcije procjenjuje na osnovu mehaničkih osobina zavarenog spoja.

Ispitivanje mehaničkih osobina vezanih za zavarivanje sprovode se u cilju određivanja čvrstoće i drugih osobina. Ova ispitivanja sa razaranjem su pouzdan način za ocjenu kvaliteta zavarenih spojeva. Sva mehanička ispitivanja dijelimo na statička i dinamička u zavisnosti od načina djelovanja opterećenja u toku ispitivanja. U zavisnosti od vrste naprezanja koje izaziva opterećenje statička ispitivanja mogu biti: ispitivanje na zatezanje, ispitivanje na pritisak, ispitivanje na smicanje, ispitivanje na savijanje, ispitivanje na torziju, kao i metode ispitivanja tvrdoće. Na dinamička ispitivanja utiče dejstvo sile tako da se mogu podijeliti na: promjenjiva i udarna.

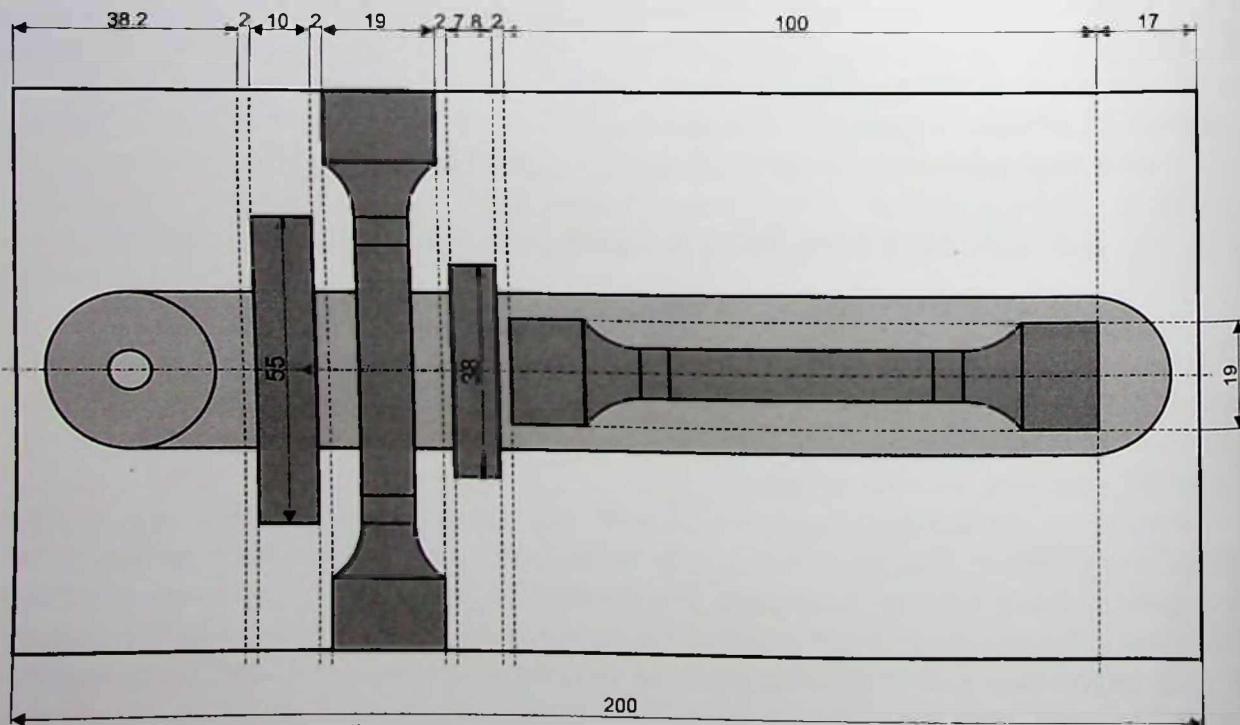
6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Od navedenih mehaničkih ispitivanja u ovom radu izvršena su ispitivanja zatezanjem i ispitivanje žilavosti materijala po Šarpiju. Kod ispitivanja zatezanjem dobija se dijagram naprezanje-izduženje, odnosno zatezna čvrstoća R_m , a kod ispitivanja žilavosti materijala udarna žilavost ρ .

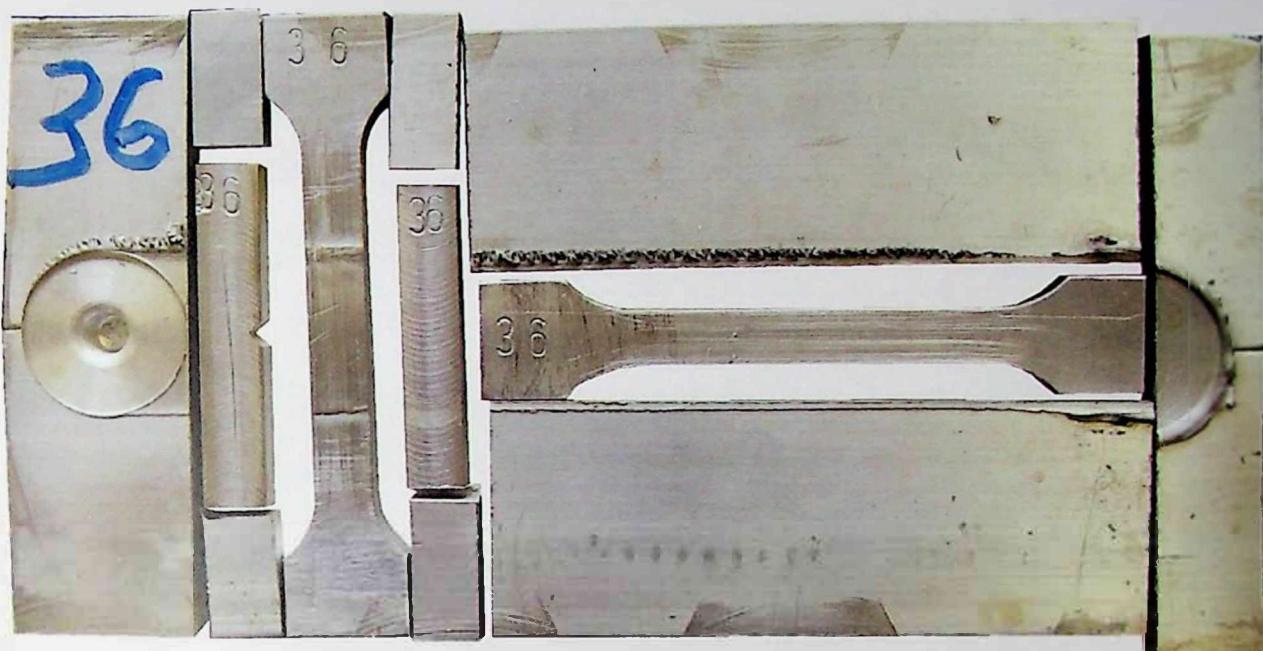
Kod ispitivanja zatezanjem usvojeno je da se iz zavarenih radnih komada uzimaju dva uzorka za epruvete. Jedan uzorak epruvete isijeca se iz pravca normalnog na pravac zavarivanja y - pravac (poprečni ili bočni pravac), dok se drugi uzorak uzima iz zone zavarivanja i poklapa se sa smjerom zavarivanja x - pravac (longitudinalni ili uzdužni pravac). Kod prve epruvete sve zone koje se javljaju kod procesa FSW nalaze se na ispitnoj dužini epruvete L_c tako da u ovom slučaju provjeravamo kvalitet zavarenog spoja, a kod druge epruvete karakteristike samog zavarenog spoja jer je epruveta uzeta iz čistog metala šava (odnosno najvećim dijelom iz „grumen“ zone).

Raspored epruveta u zavarenim radnim komadima uzet je po standardu za ispitivanja zavarenih spojeva. Za ispitivanje žilavosti materijala po Šarpiju uzima se jedan uzorak koji se isijeca iz pravca normalnog na pravac zavarivanja y - pravac, gdje je pozicija V-zareza na strani suprotnoj od pravca zavarivanja (prateća strana) [148].

Sve isječene epruvete su precizno mašinski obrađene na dimenzije i oblike koji se zahtijevaju standardima [147, 148]. Za metalografska ispitivanja koja će biti obrađena u narednom poglavlju takođe je isječen uzorak iz y - pravca, tako da zadovoljava korištene standarde. Na Slici 6.29 prikazana je šema isjecanja uzorka (epruveta) za pomenuta ispitivanja, dok je na Slici 6.30 dat prikaz isječenih uzoraka iz zavarenih radnih komada u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Ostali isječeni uzorci su dati na Slici P.7.10 u Prilogu 7.



Slika 6.29. Šema isijecanja uzorka iz zavarenih radnih komada dobijenih postupkom FSW



Slika 6.30. Prikaz isječenih uzoraka iz zavarenih radnih komada za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36

6.7.1. ODREĐIVANJE ZATEZNE ČVRSTOĆE

Prilikom ispitivanja zatezanjem korišćene su standardne mašine i epruvete. Za ispitivanje zatezanjem korišćen je standard MEST EN 10002-1:2008 [147], a ispitivanje se izvodi na sobnoj temperaturi. Mašina - kidalica koja se koristi prilikom ispitivanja je sa modulima od 200 kN, 500 kN i 1000 kN (Slika P.7.2 u Prilogu 7). Na osnovu standarda MEST EN 10002-1:2008 usvojen je oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje zatezanjem.

Korišćene su pljosnate proporcionalne epruvete kod kojih je početna mjerna dužina L_0 , određena na osnovu početne površine poprečnog presjeka S_0 . Početna mjerna dužina se dobija korišćenjem izraza:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}, \quad (6.9)$$

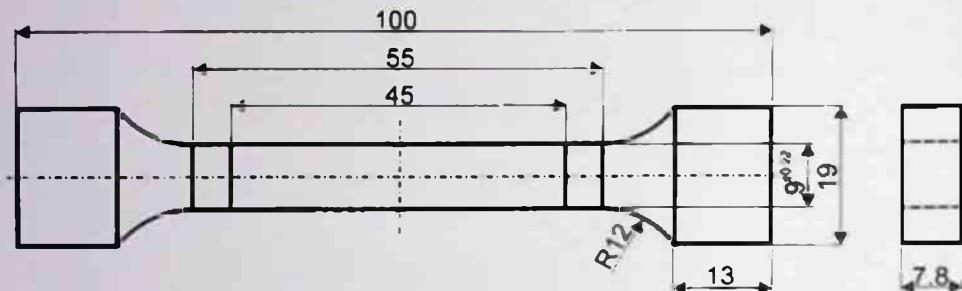
gdje je $k = 5.65$ - koeficijent koji ima međunarodno usvojenu vrijednost [147].

U našem slučaju debљina epruvete je uslovljena debљinom zavarenih radnih komada i iznosi $a = 7.8$ mm, dok je usvojena širina pljosnate epruvete na ispitnoj dužini $b = 9$ mm. Početna površina poprečnog presjeka na dijelu koji predstavlja ispitnu dužinu je $S_0 = 70.2 \text{ mm}^2$. Korišćenjem izraza (6.9) dobijamo početnu mjeru dužinu epruvete $L_0 = 45$ mm. Ispitna dužina epruvete je $L_c = 55$ mm, a ukupna dužina epruvete $L_t = 100$ mm. Prelazni radijus je $R = 12$ mm. Krajevi za pričvršćivanje epruvete odgovaraju standardnim čeljustima mašine za ispitivanje (kidalice) i njihova dužina iznosi $h = 13$ mm.

Za potrebe ispitivanja zatezanjem napravljeno je 36 epruveta isječenih iz y - pravca i 36 epruveta isječenih iz x - pravca, zavarenih radnih komada za sve tačke eksperimentalnog plana, kao i 4 epruvete isječene iz radnih komada osnovnog materijala koji nijesu zavarivani.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Na Slici 6.31 je dat šematski prikaz epruvete sa dimenzijama, a na Slici 6.32 i Slici 6.33 uzorci epruvete u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36, u y i x pravcu.



Slika 6.31. Epruveta za ispitivanje zatezanjem urađena po standardu MEST EN 10002-1:2008 [147]



Slika 6.32. Uzorak (epruveta), y - pravac normalan na pravac zavarivanja



Slika 6.33. Uzorak (epruveta), x - pravac koji se poklapa sa pravcem zavarivanja

Prilikom ispitivanja zatezanjem uzoraka iz zavarenih radnih komada, korišćena je mala brzina deformisanja 1.5 mm/min. Epruvete koje su napravljene za ispitivanje zatezanjem gabaritnih dimenzija 100 mm \times 19 mm \times 7.8 mm nijesu obrađivane po gornjoj i donjoj površini. Na gornjoj površini epruvete iz y - pravca (Slika 6.32), na mjestu kuda je prošao alat nazire se malo ulegnuće, dok se na mjestu suprotnosmjerne strane zavarivanja javlja mali brijeđ. Donja površina epruvete je ravna i glatka, gdje se na mjestu spajanja radnih komada uočava rascjep. Na uzorku iz x - pravca (Slika 6.33), na gornjoj strani primjećuju se otisci od alata, čija veličina zavisi od ugaone brzine okretanja alata. Ako je ugaona brzina okretanja alata veća onda su otisci manji, a ako je ugaona brzina okretanja alata manja onda se otisci od alata jasno vide kao paralelni rubovi u obliku kružnice. Na Slici 6.34 dat je prikaz istegnute epruvete isječene iz y - pravca za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36, dok je na Slici 6.35 dat prikaz istegnute epruvete isječene iz x - pravca za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36. Na Slici 6.36 dat je prikaz istegnute epruvete osnovnog materijala broj 4.



Slika 6.34. Isteognuta epruveta, isječena iz y - pravca, za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36



Slika 6.35. Isteognuta epruveta, isječena iz x - pravca, za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36



Slika 6.36. Isteognuta epruveta osnovnog materijala broj 4

Kako je mašina - kidalica, sa analognim pokazivačima sile i pomjeranja, za mjerjenje je korišćena precizna analogno digitalna mjerna oprema koja je povezana u informacioni mjerni sistem na identičan način kao što je bio slučaj kod mjerjenja sila procesa FSW. U ovom slučaju otpornički davači (mjerne trake) su nalijepljene na držače čeljusti sa obje strane. Na Slici 6.37 dat je prikaz istraživačkog mesta za ispitivanje epruveta istezanjem, a na Slici 6.38 prikaz čeljusti za prihvatanje epruveta sa nalijepljenim mernim trakama.



Slika 6.37. Ispitivanje epruveta zatezanjem

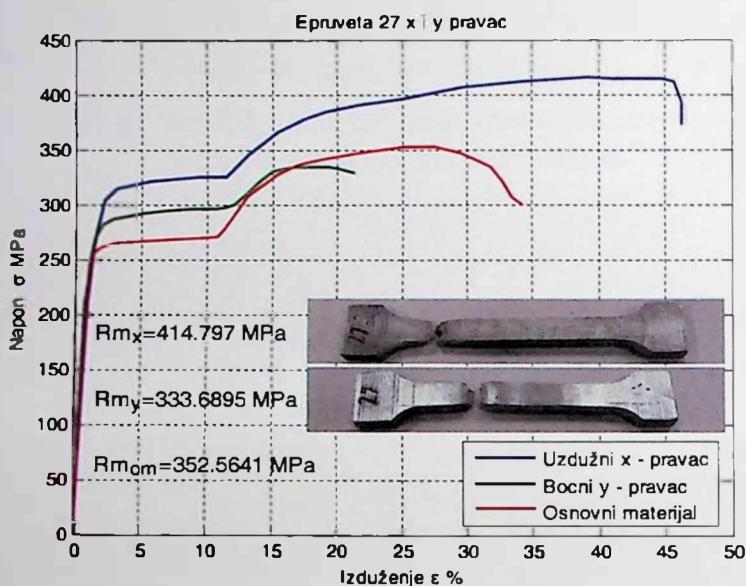


Slika 6.38. Postavljena epruveta

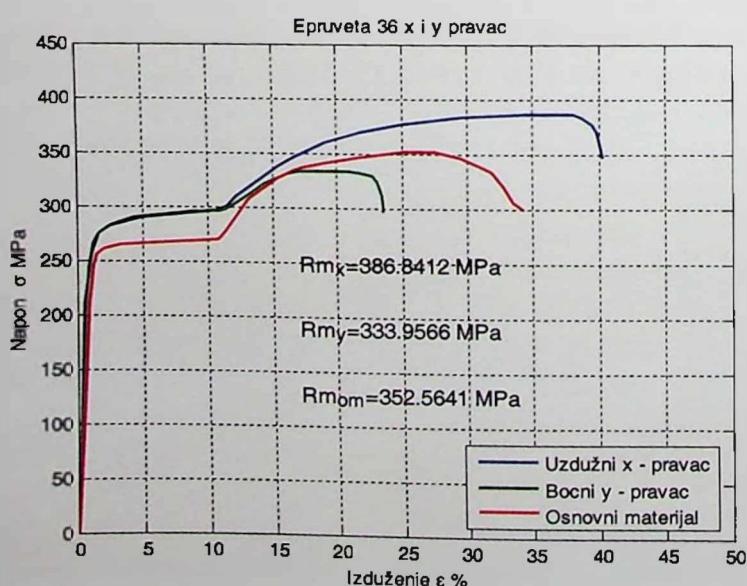
6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Držači su kružnog poprečnog presjeka prečnika 40 mm, a davači (mjerne trake) su povezani u pune Vitstonove mostove. Pošto je aparatura već opisana u Poglavlju 5.3.1 podaci koji su snimljeni na ovaj način su obrađeni u programu MATLAB i dobijeni su dijagrami naprezanje-izduženje.

Postupajući po planu eksperimenta, redosledom su istezane epruvete, gdje se, dobijaju različite vrijednosti zatezne čvrstoće R_m za x i y pravac. Na Slici 6.39 dati su dijagrami istezanja u 27. tački eksperimentalnog plana za epruvete uzete iz x i y pravca, sa vrijednostima zatezne čvrstoće R_{m_x} i R_{m_y} , kao i dijagram istezanja osnovnog materijala epruvete broj 4, a na Slici 6.40 u centralnoj tački plana broj 36. Ostali dijagrami istezanja, sa prikazima istegnitih epruveta dati su u Prilogu 3.



Slika 6.39. Dijagram istezanja za 27. tačku eksperimentalnog plana



Slika 6.40. Dijagram istezanja za 36. tačku eksperimentalnog plana

U Tabeli 6.7 date su vrijednosti dobijene zatezne čvrstoće R_m i izduženja, za sve tačke eksperimentalnog plana. Vrijednost zatezne čvrstoće osnovnog materijala je $R_m = 352.5641$ MPa, a izduženja $\epsilon = 34.2222\%$.

Tabela 6.7. Dobijene vrijednosti zatezne čvrstoće i procentualnog izduženja

T.E.P.	Rm_x MPa	Rm_y MPa	ϵ_x %	ϵ_y %
1.	349.8932	331.9979	45.2889	22.4844
2.	340.7229	325.5876	43.8889	21.0800
3.	365.8298	327.9024	48.3111	21.2844
4.	331.3746	323.8070	39.9067	24.0667
5.	361.1556	333.6895	37.7111	23.7733
6.	336.5385	320.8689	44.4889	21.0489
7.	348.9138	333.6895	38.3556	23.7733
8.	325.5876	330.8405	37.7333	21.7822
9.	322.2935	330.8405	36.0000	21.7822
10.	321.4922	329.4160	35.4578	21.6933
11.	338.3191	320.8689	40.5511	21.6933
12.	334.3127	323.1838	34.4311	21.6933
13.	362.2685	330.8405	35.3778	21.6933
14.	389.6902	323.8070	43.8311	21.0489
15.	364.0492	320.8689	33.4933	20.9067
16.	385.6838	334.8469	45.0311	23.1111
17.	401.4423	319.1773	45.0311	22.1333
18.	378.6503	318.5541	34.0489	22.1333
19.	360.5769	333.1553	43.6844	23.3333
20.	376.3355	326.1218	44.8844	22.6889
21.	358.7963	316.2393	27.5378	21.5230
22.	395.5662	326.1218	44.4756	21.5200
23.	377.4929	336.6275	29.9111	22.8089
24.	394.9430	320.5128	44.4756	21.5556
25.	382.8348	334.8469	43.3600	22.1333
26.	399.6617	319.7115	40.4933	18.3867
27.	414.7970	333.6895	46.2889	21.4044
28.	385.6838	315.6161	42.9200	18.3867
29.	400.1959	333.6895	41.5156	21.7822
30.	373.9316	338.9423	45.1200	21.4044
31.	387.3754	320.8689	33.4933	22.8089
32.	361.1111	323.8070	35.9822	22.8079

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tabela 6.7. Dobijene vrijednosti zatezne čvrstoće i procentualnog izduženja (nastavak)

T.E.P.	Rm_x MPa	Rm_y MPa	ϵ_x %	ϵ_y %
33.	388.5328	332.9772	40.4622	22.8089
34.	389.1560	331.9979	41.4578	22.6889
35.	388.1766	333.8675	41.1067	23.2489
36.	386.8412	333.9565	40.2889	23.5689

6.7.2. ODREĐIVANJE UDARNE ŽILAVOSTI

Ispitivanje žilavosti zavarenog materijala vrši se udarnim opterećenjem na Šarpijevom klatnu *HECKERT* Njemačke proizvodnje, sa maksimalnom početnom raspoloživom energijom 150 J. Šarpijevo klatno se nalazi u laboratoriji Metalurško-tehnološkog fakulteta u Podgorici. Epruveta određenog oblika i dimenzija lomi se jednim udarcem (Slika 6.41).



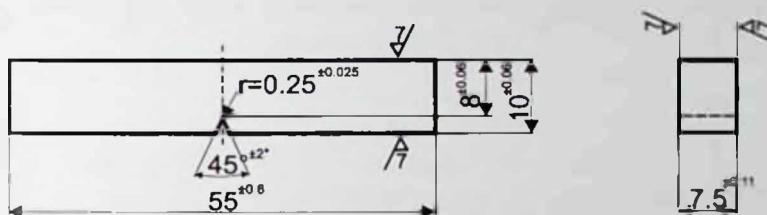
Slika 6.41. Korišćeno Šarpijevo klatno za ispitivanje udarne žilavosti

Pri udaru epruveta je izložena savijanju. Cilj ispitivanja je da se odredi udarna žilavost materijala zavarenog postupkom FSW. Žilavost zavarenog materijala ili čvrstoće na udar pri savijanju je utrošeni rad za lom epruvete sveden na jedinicu poprečnog presjeka epruvete:

$$\rho = \frac{N}{A} \text{ J/cm}^2 \quad (6.10)$$

Epruveta je urađena na osnovu standarda MEST EN 10045-1:1993 [148], (Slika 6.42), a uzorci su isječeni iz pravca normalnog na pravac zavarivanja, kao što je prikazano na Slici 6.29 i Slici 6.30. Usvojena je uska epruveta sa V-zarezom. Dužina

epruvete je 55 mm, visina 10 mm i debljina 7.5 mm. Ugao zareza je 45° . Visina ispod zareza je 8 mm. Poluprečnik zaobljenja podnožja zareza je 0.25 mm. Odstojanje ravni simetrije zareza od kraja epruvete je 27.5 mm. Ugao između ravni simetrije zareza i uzdužne ose epruvete je 90° . Ugao između susjednih uzdužnih strana epruvete je takođe 90° . Prilikom mašinske obrade epruvete vođeno je računa o hlađenju epruvete, tako da ne dolazi do promjene stanja materijala epruvete. Na Slici 6.43 dat je prikaz izrađene epruvete isječene iz y -pravca zavarenih radnih komada, u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Na Slici 6.44 dat je prikaz ispitane epruvete u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Ispitivanje je vršeno na sobnoj temperaturi.



Slika 6.42. Epruveta za ispitivanje udarne žilavosti urađena po standardu MEST EN 10045-1:1993 [148]



Slika 6.43. Epruveta za ispitivanje udarne žilavosti, y - pravac normalan na pravac zavarivanja u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36



Slika 6.44. Ispitana epruveta u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36

U Tabeli 6.8 date su vrijednosti dobijene utrošene energije u džulima (J) za sve tačke eksperimentalnog plana, kao i vrijednosti udarne žilavosti ρ . Vrijednost utrošene energije za lom epruvete osnovnog materijala je 42 J, a udarna žilavost $\rho = 70 \text{ J/cm}^2$.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tabela 6.7. Dobijene vrijednosti zatezne čvrstoće i procentualnog izduženja (nastavak)

T.E.P.	Rm_x MPa	Rm_y MPa	ε_x %	ε_y %
33.	388.5328	332.9772	40.4622	22.8089
34.	389.1560	331.9979	41.4578	22.6889
35.	388.1766	333.8675	41.1067	23.2489
36.	386.8412	333.9565	40.2889	23.5689

6.7.2. ODREĐIVANJE UDARNE ŽILAVOSTI

Ispitivanje žilavosti zavarenog materijala vrši se udarnim opterećenjem na Šarpijevom klatnu *HECKERT* Njemačke proizvodnje, sa maksimalnom početnom raspoloživom energijom 150 J. Šarpijev klatno se nalazi u laboratoriji Metalurško-tehnološkog fakulteta u Podgorici. Epruveta određenog oblika i dimenzija lomi se jednim udarcem (Slika 6.41).



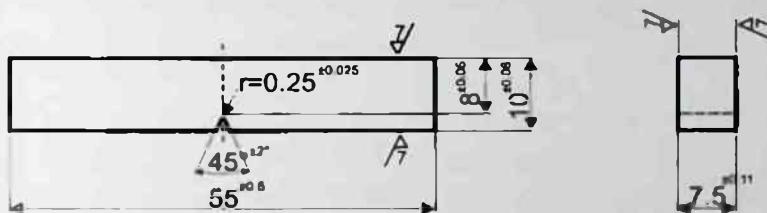
Slika 6.41. Korišćeno Šarpijev klatno za ispitivanje udarne žilavosti

Pri udaru epruveta je izložena savijanju. Cilj ispitivanja je da se odredi udarna žilavost materijala zavarenog postupkom FSW. Žilavost zavarenog materijala ili čvrstoće na udar pri savijanju je utrošeni rad za lom epruvete sveden na jedinicu poprečnog presjeka epruvete:

$$\rho = \frac{N}{A} \text{ J/cm}^2 \quad (6.10)$$

Epruveta je urađena na osnovu standarda MEST EN 10045-1:1993 [148], (Slika 6.42), a uzorci su isječeni iz pravca normalnog na pravac zavarivanja, kao što je prikazano na Slici 6.29 i Slici 6.30. Usvojena je uska epruveta sa V-zarezom. Dužina

epruvete je 55 mm, visina 10 mm i debljina 7.5 mm. Ugao zareza je 45° . Visina ispod zareza je 8 mm. Poluprečnik zaobljenja podnožja zareza je 0.25 mm. Odstojanje ravni simetrije zareza od kraja epruvete je 27.5 mm. Ugao između ravni simetrije zareza i uzdužne ose epruvete je 90° . Ugao između susjednih uzdužnih strana epruvete je takođe 90° . Prilikom mašinske obrade epruvete vođeno je računa o hlađenju epruvete, tako da ne dolazi do promjene stanja materijala epruvete. Na Slici 6.43 dat je prikaz izrađene epruvete isječene iz y -pravca zavarenih radnih komada, u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Na Slici 6.44 dat je prikaz ispitane epruvete u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36. Ispitivanje je vršeno na sobnoj temperaturi.



Slika 6.42. Epruveta za ispitivanje udarne žilavosti urađena po standardu MEST EN 10045-1:1993 [148]



Slika 6.43. Epruveta za ispitivanje udarne žilavosti, y - pravac normalan na pravac zavarivanja u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36



Slika 6.44. Ispitana epruveta u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36

U Tabeli 6.8 date su vrijednosti dobijene utrošene energije u džulima (J) za sve tačke eksperimentalnog plana, kao i vrijednosti udarne žilavosti ρ . Vrijednost utrošene energije za lom epruvete osnovnog materijala je 42 J, a udarna žilavost $\rho = 70 \text{ J/cm}^2$.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tabela 6.8. Dobijene vrijednosti udarne žilavosti

T.E.P.	Utrošena energija J	Udarna žilavost J/cm ²
1.	KV 150/7.5 = 30	50.00
2.	KV 150/7.5 = 11	18.33
3.	KV 150/7.5 = 15	25.00
4.	KV 150/7.5 = 31	51.66
5.	KV 150/7.5 = 35	58.33
6.	KV 150/7.5 = 17	28.33
7.	KV 150/7.5 = 38	63.33
8.	KV 150/7.5 = 34	56.66
9.	KV 150/7.5 = 11	18.33
10.	KV 150/7.5 = 14	23.33
11.	KV 150/7.5 = 16	26.66
12.	KV 150/7.5 = 30	50.00
13.	KV 150/7.5 = 17	28.33
14.	KV 150/7.5 = 32	53.33
15.	KV 150/7.5 = 9	15.00
16.	KV 150/7.5 = 35	58.33
17.	KV 150/7.5 = 8	13.33
18.	KV 150/7.5 = 6	10.00
19.	KV 150/7.5 = 28	46.66
20.	KV 150/7.5 = 24	40.00
21.	KV 150/7.5 = 18	30.00
22.	KV 150/7.5 = 26	43.33
23.	KV 150/7.5 = 34	56.66
24.	KV 150/7.5 = 33	55.00
25.	KV 150/7.5 = 12	20.00
26.	KV 150/7.5 = 13	21.66
27.	KV 150/7.5 = 32	53.33
28.	KV 150/7.5 = 31	51.66
29.	KV 150/7.5 = 12	20.00
30.	KV 150/7.5 = 14	23.33
31.	KV 150/7.5 = 36	60.00
32.	KV 150/7.5 = 37	61.66
33.	KV 150/7.5 = 38	63.33
34.	KV 150/7.5 = 38	63.33
35.	KV 150/7.5 = 40	66.66
36.	KV 150/7.5 = 39	65.00

6.8. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA POPREČNOG PRESJEKA ZAVARENOG SPOJA

6.8.1. MEHANIČKA PRIPREMA UZORAKA

Proces metalografske, mehaničke pripreme uzorka vrši se preko niza suksesivnih operacija: rezanje (uzimanje uzorka), gruba obrada, montiranje, brušenje i poliranje.

6.8.1.1. Uzimanje uzorka iz zavarenog spoja dobijenog postupkom FSW

U Poglavlju 6.7 na Slici 6.29 data je usvojena šema rezanja uzorka za metalografska ispitivanja. Uzorak je dimenzija $48 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$ (Slika 6.45). Rezanje je vršeno na glodalici, specijalnim alatom za rezanje aluminijuma (cirkularne debeline 1.5 mm i dubine zuba 5 mm). Tokom rezanja vršeno je hlađenje uzorka, da ne bi došlo do promjene strukture materijala pod uticajem toplote, koja se stvara od rezanja. Nakon rezanja, uzorak ima grubu i neravnu površinu (Slika 6.46). Poslije rezanja izvršena je gruba obrada korišćenjem tocila i turpije, gdje su poravnate površine i zaobljene oštре ivice da ne bi oštetile hartiju ili tkaninu za poliranje, a mogu da izazovu i povredu operatora. Poslije ove operacije uzorak je spreman za dalju obradu brušenjem.



Slika 6.45. Isječeni uzorak za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35 (pogled odozgo)



Slika 6.46. Poprečni presjek isječenog uzorka za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35

6.8.1.2. Brušenje uzorka

Brušenje se vrši na uređaju za ručno brušenje materijala tipa *METASINEX* koji je dat na Slici 6.47. Za brušenje se koriste abrazivne čestice (silicijumkarbid, šmirgl) koje su pričvršćene na podlozi, papiru za brušenje. Kvalitet površine dobijene brušenjem povećava se poliranjem.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 6.47. Uredaj za ručno brušenje materijala

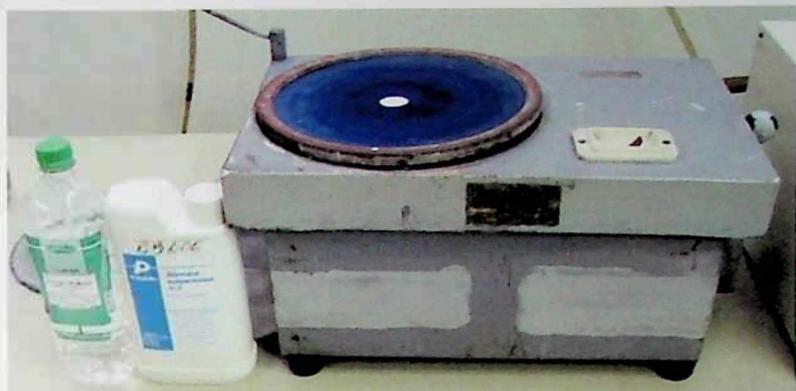
Pošto je cilj mikroskopskog ispitivanja da se odredi stvarna struktura ispitivanog materijala u ravni siječenja, a to se ne može učiniti ako ispolirana površina nije u svakom slučaju identična ovoj ravni prije sječenja. Na taj način nameću se sledeći zahtjevi.

1. Površina ne smije imati ogrebotine, mrlje i druge greške.
2. Svi nemetalni uključci na površini moraju da ostanu netaknuti.
3. Gornji slojevi metala ne smiju biti deformisani.

Da bi se ispunili ovi zahtjevi prvo je vršeno vodeno brušenje vodobrusnim silicijumkarbidnim papirom granulacije 240. Voda se koristi da ne bi došlo do zagrijavanja uzorka, kao i zbog uklanjanja nečistoća nastalih brušenjem. Na ovaj način je dobijena površina sa manjim ogrebotinama i tanjim deformisanim slojem materijala. Uzorak se naizmjenično okreće pod uglom od 90° u odnosu na pravac okretanja papira, kako bi se smanjila hrapavost površine. Uzorak se mora neprekidno čvrsto i ravnomjerno pritiskati da se ne bi stvorilo više površina. Nakon vodobrusnog papira granulacije 240 vrši se brušenje sa papirima veće finoće 400, 600 i 1200. Poslije svake promjene vodobrusnog papira vrši se pranje uzorka od čestica silicijumkarbida. Na kraju brušenja na površini se nalazi jako tanki deformisani sloj reda veličine desetih djelova mikrona, gdje se zatim vrši fino poliranje.

6.8.1.3. Metalografsko poliranje

Fino poliranje se vrši na uređaju za poliranje (Slika 6.48), do postizanja efekta ogledala. Ovaj efekat se postiže poliranjem sa tkaninom ili platnom uz korišćenje abraziva finoće $1 \mu\text{m}$, pa zatim $0.3 \mu\text{m}$ i $0.05 \mu\text{m}$. Platno za poliranje se postavi preko diska za poliranje, glatke horizontalne ravne ploče prečnika 200 mm, koja se okreće do nekoliko stotina obrtaja u minuti. Platno se prelije sa 10 ml razblažene vodene suspenzije abrazivnog sredstva odnosno glinice Al_2O_3 . Tokom poliranja dodaje se i koncentrovani alkohol 96 %. Nakon poliranja uzorak se opere, a površina mu se očisti vatom pod mlazom vode, zatim se potopi u alkohol, osuši fenom i čuva u eksikatoru da bi se spriječila oksidacija površina. Posle završenog brušenja uzorak se vizuelno pregleda, a zatim i postavlja na mikroskop pri uvećanju od 100 puta. Na mikroskopu se utvrđuje prisustvo eventualnih grešaka prilikom prethodne pripreme. Ako ima grešaka uzorak bi se vratio na dodatno poliranje. Na opisan način dobija se uzorak spreman za hemijsku obradu i analizu mikrostrukture.



Slika 6.48. Uređaj za poliranje sa sredstvima za poliranje

6.8.2. HEMIJSKA OBRADA UZORAKA

Hemijska obrada uzoraka od legura aluminijuma koji su uzeti isijecanjem iz zavarenih radnih komada dobijenih procesom FSW, vrši se odgovarajućim reagensom. Reagens se priprema tako što se u menzuri izmjeri 1.3 ml 40 % HF hlorovodončne kiseline i lagano pomiješa sa 200 ml destilovane vode u odgovarajuću staklenu posudu. Na taj način reagens je spremam za upotrebu.

Dovoljna količina pripremljenog reagensa se doda u odgovarajuću staklenu posudu i u nju se potopi polirana strana zatopljenih uzoraka u trajanju sedam minuta. Nakon toga se ispira vodom, zatim alkoholom, osuši fenom i uzorak je spremam za mikrostrukturnu analizu. Nagrizanje je izvršeno za 36 uzoraka, odnosno za sve tačke eksperimentalnog plana.

Na Slici 6.49 prikazan je uzorak za 28. tačku eksperimentalnog plana, koji je hemijski tretiran i spremam za ispitivanje.

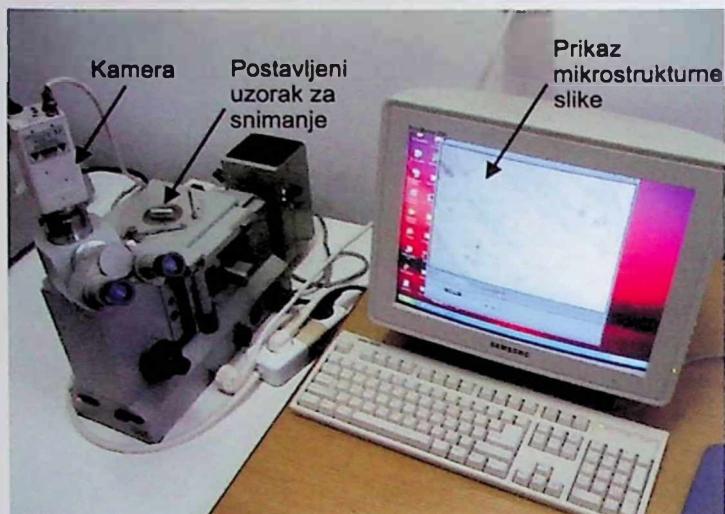


Slika 6.49. Prikaz obrađenog uzorka za tačku eksperimentalnog plana broj 28

6.8.3. SNIMANJE STRUKTURE ZAVARENOG SPOJA

Ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture vrši se putem metode svjetlosne mikroskopije. Mikrostrukturna slika uzoraka se snima na metalografskom mikroskopu inverznog tipa marke „METAVAL“ optike „CARL ZEISS JENA“ opremljenog kamerom marke „SAMSUNG“ model BW-4302. Na Slici 6.50 dat je prikaz metalografskog mikroskopa sa kamerom, kao i prikaz snimanja uzorka. Metalografski mikroskop ima mogućnost uvećanja do 500 puta, a kamera ima mogućnost snimanja uvećanja do 750 puta. Pomoću kamere slika mikrostrukture uzorka se prenosi na ekran računara u programu „PCTU VISION“, gdje se snima na hard disku. Sva metalografska ispitivanja, kao i priprema uzoraka su urađena u laboratoriji na Metalurško-tehnološkom fakultetu u Podgorici.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 6.50. Metalografski mikroskop korišćen za snimanje strukture zavarenog spoja

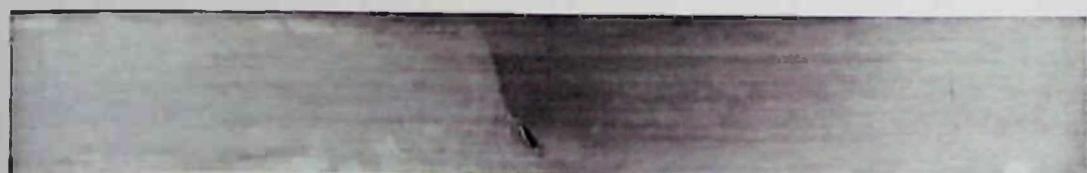
Metodom svjetlosne mikroskopije, izvršeno je snimanje na svim uzorcima, za sve tačke eksperimentalnog plana na izabranim pozicijama. Cilj metalografskog ispitivanja je identifikacija raznih defekata koji se javljaju tokom procesa FSW, kao i identifikacija strukturalnih promjena. Zbog obimnosti pomenutog ispitivanja i snimanja velikog broja uzoraka u ovom poglavlju biće prikazane slike makrostrukture pojedinih uzoraka (od Slike 6.51 do Slike 6.55).



Slika 6.51. Makrostruktura uzorka broj 5



Slika 6.52. Makrostruktura uzorka broj 8



Slika 6.53. Makrostruktura uzorka broj 14



Slika 6.54. Makrostruktura uzorka broj 21

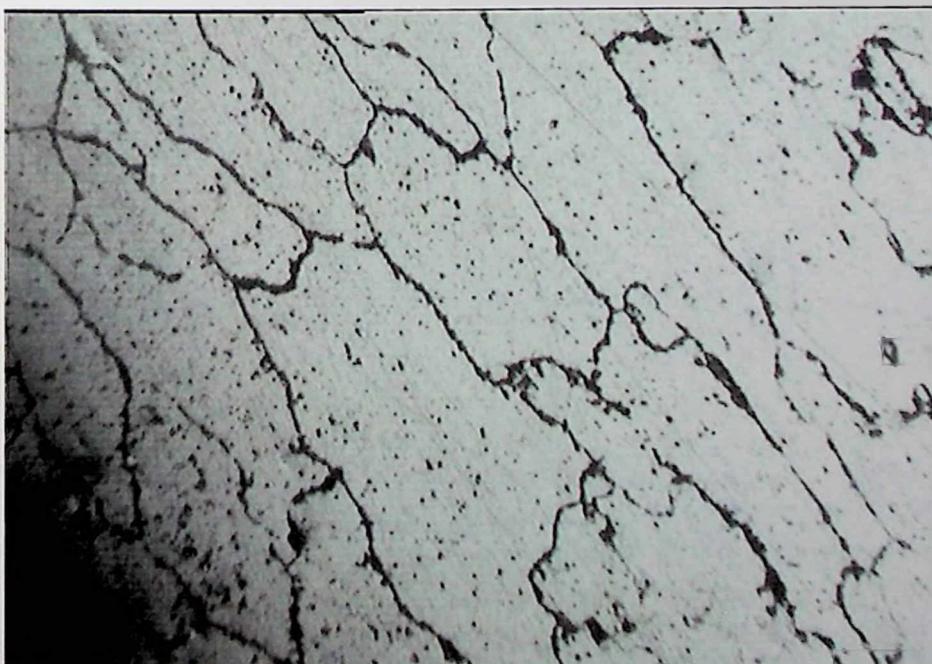


Slika 6.55. Makrostruktura uzorka broj 35

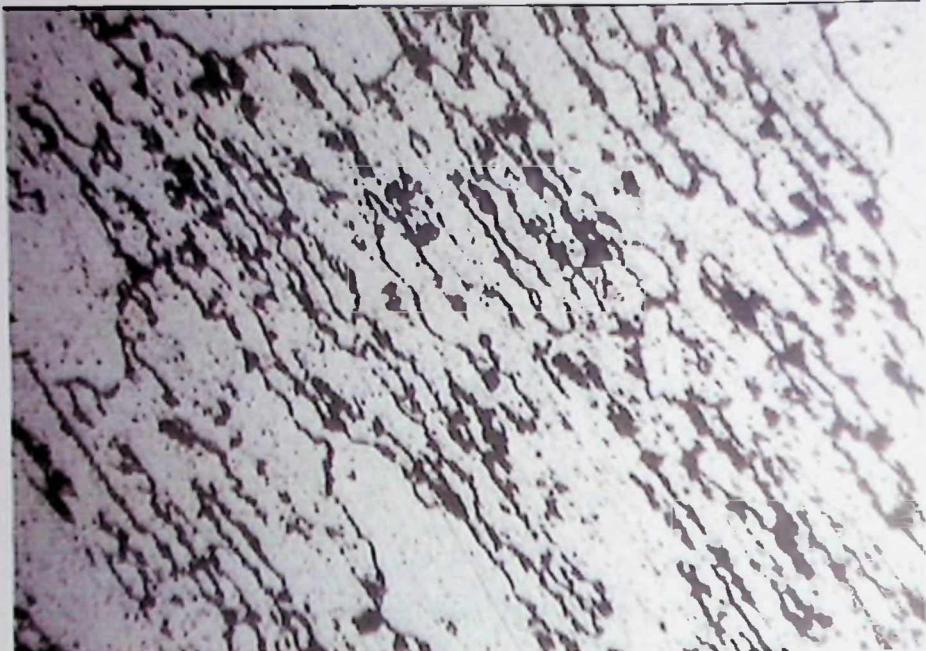
Sa snimljenih slika makrostrukture jasno se mogu identifikovati karakteristične strukturne zone procesa FSW: zona osnovnog materijala, zona uticaja topote, zona termo-mehaničkog uticaja i tzv „grumen“ zona, o čemu će biti više riječi u Poglavlju 8.5. Sa izabranih slika makrostrukture primjećuje se da su zone približno simetrične, što daje karakterističan oblik dijagrama tvrdoće koji je opisan u Poglavlju 4. Sa slika se jasno vide i defekti koji su prisutni za pojedine tačke eksperimentalnog plana. To je tzv. „tunel“ efekat na istosmjernoj strani, što je rezultat nedovoljnog transporta materijala oko trna alata. Ovaj defekat spada u zapreminske greške, koje se mogu otkriti radiografskim snimkom i on je uglavnom neprekidan. Ova greška se može izbjegći pravilnim izborom geometrijskih parametara alata i kinematskih parametara procesa.

Na osnovu slika makrostrukture za određene karakteristične pozicije snimaju se slike mikrostrukture, koje nam daju jasniji prikaz strukture posmatranih zavarenih spojeva, kao i veličinu zrna.

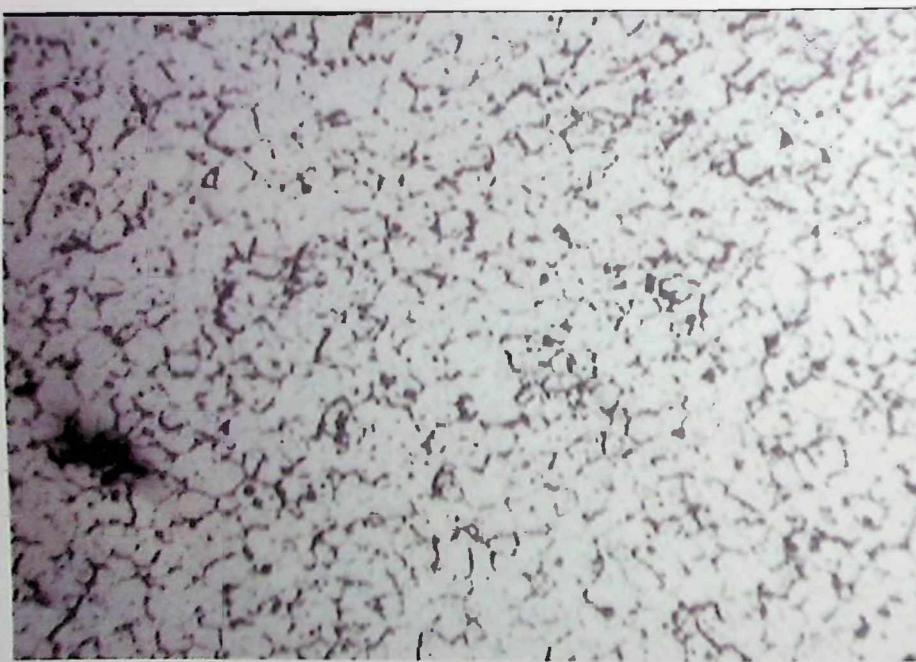
Na Slici 6.56 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala sa uvećanjem 200 puta, a na Slici 6.57 sa uvećanjem 300 puta. Na Slici 6.58 prikazana je mikrostruktura zone uticaja topote, dok je na Slici 6.59 prikazan mikrostrukturni prelaz između zone uticaja topote i zone termo-mehaničkog uticaja za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35.



Slika 6.56. Mikrostruktura osnovnog materijala, uvećanje 200 x



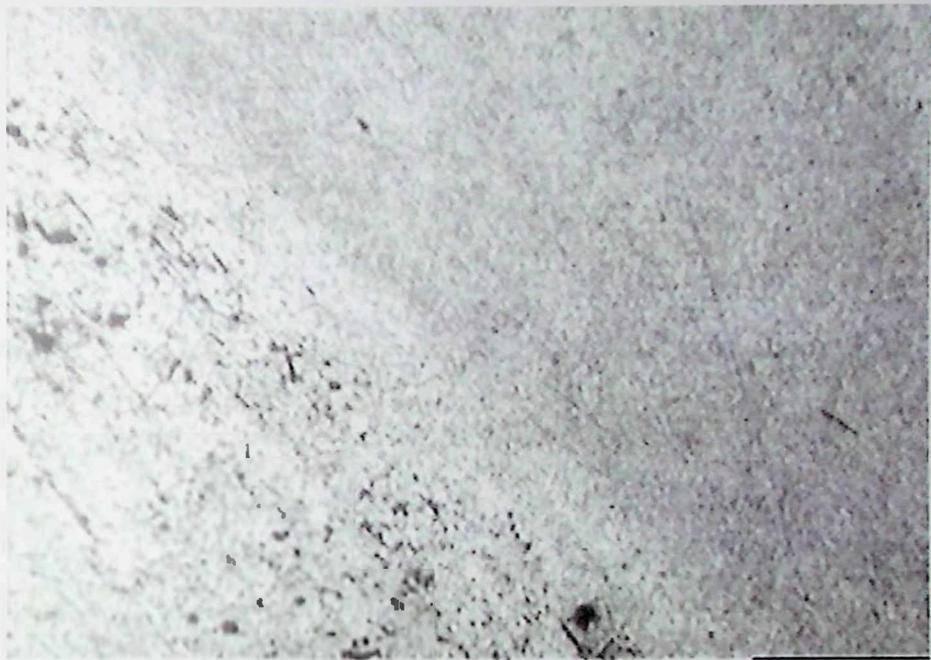
Slika 6.57. Mikrostruktura osnovnog materijala, uvećanje 300 x



Slika 6.58. Mikrostruktura HAZ, uvećanje 200 x

Prilikom ispitivanja mikrostrukture, može se jasno identifikovati prelaz između zone koja je pretrpjela deformaciju od uticaja alata i zone osnovnog materijala. Materijal koji je deformisan procesom FSW, predstavlja dobro uzburkana zrna strukture, kao i materijala u blizini zone uticaja topline - HAZ, što daje pravilan raspored zrna. U zoni miješanja su prisutna vrlo fina rekristalizovana zrna, zbog velike deformacije materijala i visoke temperature u toku procesa FSW. Mikrostruktura unutar „grumen” zone pokazuje dinamičku rekristalizaciju zrna, koja su mnogo manja nego kod osnovnog materijala, gdje su prisutna zrna veće veličine. Dinamički rekristalizovana „grumen” zona prikazana

je na Slici 6.60, za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35. Zbog velikog broja ispitivanih uzoraka ostale slike su date u Prilogu 4.



Slika 6.59. Mikrostruktura HAZ - TMAZ zone 100 x



Slika 6.60. Mikrostruktura „grumen“ zone, uvećanje 100 x



7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

7.1. ODREĐIVANJE KINEMATSKIH I GEOMETRIJSKIH FAKTORA METODOM OPTIMIZACIJE

7.1.1. MODEL OPTIMIZACIJE

Pri obradi rezultata, pogodno je koristiti normirane faktore i formirati matematički model. Kao plan eksperimenta uzima se višefaktorni potpuni ortogonalni plan sa ponavljanjem eksperimenta u centralnoj tački plana četiri puta koji je definisan u Poglavlju 6.

$$N = 2^k + n_0, \quad (7.1)$$

gdje je:

$k = 5$ - broj faktora,

$n_0 = 4$ - broj ponavljanja u centralnoj tački plana.

Matematički model optimizacionog procesa koji se koristi, opisuje se polinomnom funkcijom i uzima u obzir uticaje međudejstva faktora [93, 122, 150, 151, 152]:

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i x_i + \sum_{i < j}^5 a_{ij} x_i x_j, \quad (7.2)$$

gdje su:

x_i - kodirane koordinate:

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{w_i}, \quad (7.3)$$

a_0 , a_i i a_{ij} - koeficijenti regresije:

$$a_0 = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} y_i, \quad (7.4)$$

$$a_i = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{32} x_j y_j, \quad i = 1, \dots, 5, \quad (7.5)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{32} \sum_{k=1}^{32} x_i x_j y_k, \quad (i < j) = 1, \dots, 5. \quad (7.6)$$

Suma kvadrata greške u centralnoj tački plana jeste:

$$S_E = \sum_{i=33}^{36} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2. \quad (7.7)$$

Suma kvadrata odstupanja modelskih od eksperimentalnih podataka ili rezidualna suma je data izrazom:

$$S_R = \sum_{i=1}^{36} (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (7.8)$$

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

Suma kvadrata vezana za adekvatnost modela jeste:

$$S_{AD} = S_R - S_E . \quad (7.9)$$

Da bi se uspješno izvršila optimizacija procesa potrebno je utvrditi kriterijum po kojem će se vršiti optimizacija. Kod procesa FSW, izvršena je optimizacija ulaznih parametara: režima zavarivanja (kinematskih faktora) i geometrije alata na osnovu srednje vrijednosti vertikalne sile zavarivanja F_z . Za kompletan proces optimizacije napisan je program u programskom jeziku MATLAB (v. 7.0), koji je dat u Prilogu 5. (Program P.5.1) i koncipiran je tako, da se na početku programa nalaze ulazni podaci kao što su: varirajući faktori (brzina zavarivanja, ugaona brzina okretanja alata, ugao nagiba trna alata, prečnik trna alata i prečnik čela alata). Program zatim računa koeficijente regresije, ocjenjuje njihovu signifikantnost, daje model i provjerava njegovu adekvatnost, a takođe računa i modelske vrijednosti. Model u prirodnim koordinatama ima oblik:

$$\begin{aligned} Y_M = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + \\ & + b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + \\ & + b_{34} X_3 X_4 + b_{35} X_3 X_5 + b_{45} X_4 X_5 . \end{aligned} \quad (7.10)$$

gdje su: b_0 , b_i i b_{ij} - koeficijenti regresije kod modela u prirodnim koordinatama.

Kao tablične vrijednosti disperzionalnih odnosa prema Fišerovom kriterijumu uzete su [151, 152]:

- za ocjenu signifikantnosti koeficijenata $F_T(5\%, 1.3) = 10.13$,
- za provjeru adekvatnosti modela $F_T(5\%, 5.3) = 8.64$.

7.1.2. CIKLUSI OPTIMIZACIJE

I CIKLUS

U prvom ciklusu vrijednosti faktora su varirane na osnovu usvojenog eksperimentalnog plana (Poglavlje 6) i date su u Tabeli 7.1. Nakon izvršene regresione i disperzionale analize ustanovljeno je da koeficijenti b_{15} i b_{25} nijesu značajni, zatim su određene vrijednosti koraka po gradijentnoj liniji i eksperimentalne tačke. Izračunate su modelske vrijednosti u tačkama gradijentne linije na osnovu „računskog“ eksperimenta.

Iz Tabele 7.1 jasno se vidi da je vertikalna sila zavarivanja F_z stalno rastuća funkcija i kao najpovoljnija se uzima treća tačka sa gradijentne trase, koja predstavlja osnovni nivo za drugi ciklus.

II CIKLUS

Drugi ciklus se izvodi na način analogan prethodnom (Tabela 7.2). Nakon izvršene regresione i disperzionale analize ustanovljeno je da koeficijenti: b_{13} , b_{23} , b_{24} , b_{34} i b_{35} nijesu značajni, zatim su određene vrijednosti koraka po gradijentnoj liniji ($\omega = 20$, $v = 10$, $\alpha = 0$, $d = 0.6$ i $D = 0.4$) i eksperimentalne tačke kojih u ovom ciklusu ima četiri. Funkcija vertikalne sile zavarivanja F_z je takođe rastuća funkcija, pa se kao najpovoljnija uzima druga tačka ($\omega = 240$ mm/min, $v = 840$ o/min, $\alpha = 3.4^\circ$, $d = 6.2$ mm i $D = 26.2$ mm), koja će predstavljati osnovni nivo u sledećem ciklusu.

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tabela 7.1. Prvi ciklus optimizacije procesa FSW

I CIKLUS							
	ω	v	α	d	D		
x_0	125	800	3.87	5.92	26.46		
w_1	75	200	1.13	1.08	1.54		
x_n	200	1000	5	7	28		
x_d	80	630	3	5	25		
kod	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Fz
							\hat{Y}
1.	+1	+1	+1	+1	+1	5.1488	5.1357
2.	+1	-1	+1	+1	+1	4.7921	4.9605
3.	+1	+1	-1	+1	+1	5.4799	5.3954
4.	+1	-1	-1	+1	+1	5.2000	5.1026
5.	+1	+1	+1	-1	+1	4.9435	4.9615
6.	+1	-1	+1	-1	+1	4.6125	4.6255
7.	+1	+1	-1	-1	+1	5.1069	5.2704
8.	+1	-1	-1	-1	+1	4.8964	4.8168
9.	+1	+1	+1	+1	-1	4.2698	4.3646
10.	+1	-1	+1	+1	-1	4.0600	4.0663
11.	+1	+1	-1	+1	-1	4.4661	4.6900
12.	+1	-1	-1	+1	-1	4.3747	4.2741
13.	+1	+1	+1	-1	-1	4.1520	4.1417
14.	+1	-1	+1	-1	-1	3.4614	3.6827
15.	+1	+1	-1	-1	-1	4.9755	4.5163
16.	+1	-1	-1	-1	-1	3.1631	3.9397
17.	+1	+1	+1	+1	-1	3.9632	3.7681
18.	+1	-1	+1	+1	+1	3.4895	3.5929
19.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	4.0800
20.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	3.5315
21.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	3.5520
22.	+1	-1	+1	-1	+1	-1	3.0049
23.	+1	+1	-1	-1	+1	-1	3.8056
24.	+1	-1	-1	-1	+1	-1	3.2569
25.	+1	+1	+1	+1	-1	-1	3.2616
26.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	2.8158
27.	+1	+1	-1	+1	-1	-1	3.6161
28.	+1	-1	-1	+1	-1	-1	2.9694
29.	+1	+1	+1	-1	-1	-1	2.6802
30.	+1	-1	+1	-1	-1	-1	2.4099
31.	+1	+1	-1	-1	-1	-1	3.2342
32.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	2.7761
33.	+1	0	0	0	0	0	3.5938
34.	+1	0	0	0	0	0	3.8876
35.	+1	0	0	0	0	0	3.6049
36.	+1	0	0	0	0	0	3.5849
b_1	-	0.247	-0.135	0.171	0.380	0.645	
$(\mu=0.5)$	λ	2.019	2.019	2.019	2.019	2.019	
$\lambda b_1 w_1$	-	37.5	54.47	0.391	0.830	2.007	
zaokruž.	-	40	60	0.4	0.8	0.8	
1.	-	120	690	2.6	4.2	24.2	2.4044
2.	-	160	750	3	5	25	3.0528
3.	-	200	810	3.4	5.8	25.8	3.7633
4.	-	240	870	3.8	6.6	26.6	4.4604
5.	-	280	930	4.2	7.4	27.4	5.1441
6.	-	320	990	4.6	8.2	28.2	5.8144
7.	-	360	1050	5	9	29	6.4714
8.	-	400	1110	5.4	9.8	29.8	7.115
Ekspl. na grad. lin.							

Tabela 7.2. Drugi ciklus optimizacije procesa FSW

II CIKLUS							
	ω	v	α	d	D		
x_0	200	810	3.4	5.8	25.8		
w_1	40	60	0.4	0.8	0.8		
x_n	240	870	3.8	6.6	26.6		
x_d	160	750	3	5	25		
kod	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Fz
							\hat{Y}
1.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4.4604
2.	+1	-1	+1	+1	+1	+1	4.2352
3.	+1	+1	-1	+1	+1	+1	4.5714
4.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	4.3208
5.	+1	+1	+1	-1	+1	+1	4.4046
6.	+1	-1	+1	-1	+1	+1	4.1365
7.	+1	+1	-1	-1	+1	+1	4.5219
8.	+1	-1	-1	-1	+1	+1	4.2284
9.	+1	+1	+1	+1	-1	+1	3.9698
10.	+1	-1	+1	+1	-1	+1	3.679
11.	+1	+1	-1	+1	-1	+1	4.0978
12.	+1	-1	-1	+1	-1	+1	3.7816
13.	+1	+1	+1	-1	-1	+1	3.8984
14.	+1	-1	+1	-1	-1	+1	3.5647
15.	+1	+1	-1	-1	-1	+1	4.0328
16.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	3.6737
17.	+1	+1	+1	+1	+1	-1	3.7402
18.	+1	-1	+1	+1	+1	-1	3.5165
19.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	3.8487
20.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	3.5996
21.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	3.6723
22.	+1	-1	+1	-1	+1	-1	3.4057
23.	+1	+1	-1	-1	+1	-1	3.7871
24.	+1	-1	-1	-1	+1	-1	3.4951
25.	+1	+1	+1	+1	-1	-1	3.3621
26.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	3.0727
27.	+1	+1	-1	+1	-1	-1	3.4876
28.	+1	-1	-1	+1	-1	-1	3.1728
29.	+1	+1	+1	-1	-1	-1	3.2785
30.	+1	-1	+1	-1	-1	-1	2.9463
31.	+1	+1	-1	-1	-1	-1	3.4104
32.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	3.0528
33.	+1	0	0	0	0	0	3.7633
34.	+1	0	0	0	0	0	3.7633
35.	+1	0	0	0	0	0	3.7633
36.	+1	0	0	0	0	0	3.7633
b_1	-	0.145	-0.054	0.043	0.233	0.335	
$(\mu=0.5)$	λ	3.431	3.431	3.431	3.431	3.431	
$\lambda b_1 w_1$	-	20	11.19	0.060	0.640	0.920	
zaokruž.	-	20	10	0	0.6	0.4	
1.	-	220	830	3.4	5.6	25.4	3.5962
2.	-	240	840	3.4	6.2	25.8	3.9881
3.	-	260	850	3.4	6.8	26.2	4.3889
4.	-	280	860	3.4	7.4	26.6	4.7985
5.	-						
6.	-						
7.	-						
8.	-						
Ekspl. na grad. lin.							

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

Tabela 7.3. Treći ciklus optimizacije procesa FSW

III CIKLUS							
	ω	v	α	d	D		
x_0	240	840	3.4	6.2	26.2		
w_1	20	10	0.1	0.6	0.4		
x_{10}	260	850	3.5	6.8	26.6		
x_{d1}	220	830	3.3	5.6	25.8		
kod	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	F_z
1.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4.5794 4.5805
2.	+1	-1	+1	+1	+1	+1	4.4607 4.4609
3.	+1	+1	-1	+1	+1	+1	4.5990 4.6001
4.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	4.4782 4.4806
5.	+1	+1	+1	-1	+1	+1	4.5688 4.5678
6.	+1	-1	+1	-1	+1	+1	4.4448 4.4430
7.	+1	+1	-1	-1	+1	+1	4.5887 4.5875
8.	+1	-1	-1	-1	+1	+1	4.4626 4.4626
9.	+1	+1	+1	+1	-1	+1	4.2215 4.2222
10.	+1	-1	+1	+1	-1	+1	4.0782 4.0780
11.	+1	+1	-1	+1	-1	+1	4.2432 4.2418
12.	+1	-1	-1	+1	-1	+1	4.0978 4.0977
13.	+1	+1	+1	-1	-1	+1	4.2080 4.2095
14.	+1	-1	+1	-1	-1	+1	4.0594 4.0601
15.	+1	+1	-1	-1	-1	+1	4.2300 4.2292
16.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4.0793 4.0797
17.	+1	+1	+1	+1	+1	-1	4.2096 4.2100
18.	+1	-1	+1	+1	+1	-1	4.0913 4.0905
19.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	4.2229 4.2297
20.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	4.1086 4.1101
21.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	4.1976 4.1974
22.	+1	-1	+1	-1	+1	-1	4.0739 4.0725
23.	+1	+1	-1	-1	+1	-1	4.2172 4.2170
24.	+1	-1	-1	-1	+1	-1	4.0915 4.0922
25.	+1	+1	+1	+1	-1	-1	3.8939 3.8939
26.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	3.7510 3.7498
27.	+1	+1	-1	+1	-1	-1	3.9154 3.9135
28.	+1	-1	-1	+1	-1	-1	3.7704 3.7694
29.	+1	+1	+1	-1	-1	-1	3.8789 3.8813
30.	+1	-1	+1	-1	-1	-1	3.7307 3.7318
31.	+1	+1	-1	-1	-1	-1	3.9007 3.9009
32.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	3.7503 3.7514
33.	+1	0	0	0	0	0	4.1618 4.1629
34.	+1	0	0	0	0	0	4.1658 4.1629
35.	+1	0	0	0	0	0	4.1628 4.1629
36.	+1	0	0	0	0	0	4.1638 4.1629
b_1	-	0.067	-0.009	0.007	0.174	0.174	
$(\mu=0.5)$ λ	7.434	7.434	7.434	7.434	7.434		
$\lambda b, w_1$	-	10	0.729	0.005	0.779	0.519	
zaokruži	-	10	0	0	0.3	0.2	
1.	-	230	840	3.4	5.6	26	3.8694
2.	-	240	840	3.4	5.9	26.2	4.0755
3.	-	250	840	3.4	6.2	26.4	4.2839
4.	-	260	840	3.4	6.5	26.6	4.4945
5.	-	270	840	3.4	6.8	26.8	4.7073
6.	-						
7.	-						
8.	-						

Ekspl. na građ. lin.

Tabela 7.4. Četvrti ciklus optimizacije procesa FSW

IV CIKLUS							
	ω	v	α	d	D		
x_0	250	840	3.4	6.2	26.4		
w_1	10	5	0.1	0.3	0.2		
x_{10}	260	845	3.5	6.5	26.6		
x_{d1}	240	835	3.3	5.9	26.2		
kod	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	F_z
1.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4.4949 4.4964
2.	+1	-1	+1	+1	+1	+1	4.4323 4.4322
3.	+1	+1	-1	+1	+1	+1	4.5050 4.5065
4.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	4.4418 4.4423
5.	+1	+1	+1	-1	+1	+1	4.4837 4.4828
6.	+1	-1	+1	-1	+1	+1	4.4184 4.4186
7.	+1	+1	-1	-1	-1	+1	4.4939 4.4929
8.	+1	-1	-1	-1	+1	+1	4.4281 4.4287
9.	+1	+1	+1	+1	-1	+1	4.3163 4.3173
10.	+1	-1	+1	+1	-1	+1	4.2474 4.2469
11.	+1	+1	-1	+1	-1	+1	4.3269 4.3274
12.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4.2575 4.2570
13.	+1	+1	+1	-1	-1	+1	4.3036 4.3037
14.	+1	-1	+1	-1	-1	+1	4.2321 4.2333
15.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4.3143 4.3138
16.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4.2423 4.2434
17.	+1	+1	+1	+1	+1	-1	4.3153 4.3164
18.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	4.2527 4.2522
19.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	4.3253 4.3265
20.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	4.2622 4.2623
21.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	4.3033 4.3028
22.	+1	-1	+1	-1	+1	-1	4.2381 4.2386
23.	+1	+1	-1	-1	+1	-1	4.3135 4.3129
24.	+1	-1	-1	-1	+1	-1	4.2477 4.2487
25.	+1	+1	+1	+1	-1	-1	4.1472 4.1478
26.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	4.0784 4.0774
27.	+1	+1	-1	+1	-1	-1	4.1577 4.1579
28.	+1	-1	-1	+1	-1	-1	4.0884 4.0875
29.	+1	+1	+1	-1	-1	-1	4.1337 4.1342
30.	+1	-1	+1	-1	-1	-1	4.0623 4.0638
31.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	4.1444 4.1443
32.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	4.0725 4.0739
33.	+1	0	0	0	0	0	4.2838 4.2841
34.	+1	0	0	0	0	0	4.2838 4.2841
35.	+1	0	0	0	0	0	4.2838 4.2841
36.	+1	0	0	0	0	0	4.2838 4.2841
b_1	-	0.033	-0.005	0.006	0.088	0.087	
$(\mu=0.5)$ λ	14.85	14.85	14.85	14.85	14.85		
$\lambda b, w_1$	-	5	0.375	0.010	0.394	0.259	
zaokruži	-	5	0	0	0	0	
1.	-	220	840	3.4	6.2	26.4	4.2168
2.	-	225	840	3.4	6.2	26.4	4.2000
3.	-	230	840	3.4	6.2	26.4	4.1831
4.	-	235	840	3.4	6.2	26.4	4.2336
5.	-	240	840	3.4	6.2	26.4	4.2504
6.	-	245	840	3.4	6.2	26.4	4.2673
7.	-	250	840	3.4	6.2	26.4	4.2841
8.	-	255	840	3.4	6.2	26.4	4.3009

III CIKLUS

U trećem ciklusu nakon izvršene regresione i disperzionale analize ustanovljeno je da koeficijenti: b_{12} , b_{15} , b_{23} , b_{24} , b_{25} , b_{34} i b_{35} nijesu značajni, zatim su određene vrijednosti koraka po gradijentnoj liniji ($\omega = 10$, $v = 0$, $\alpha = 0$, $d = 0.3$ i $D = 0.2$) i eksperimentalne tačke kojih u ovom ciklusu ima pet. Funkcija vertikalne sile zavarivanja F_z je takođe rastuća funkcija pa se kao najpovoljnija uzima treća tačka ($\omega = 250$ mm/min, $v = 840$ o/min, $\alpha = 3.4^\circ$, $d = 6.2$ mm i $D = 26.4$ mm), koja će predstavljati osnovni nivo u sledećem ciklusu. Rezultati sprovedenog trećeg ciklusa su dati u Tabeli 7.3.

IV CIKLUS

Četvrti ciklus se takođe izvodi na način identičan prethodnom (Tabela 7.4). Nakon izvršene regresione i disperzionale analize ustanovljeno je da koeficijenti: b_{12} , b_{13} , b_{15} , b_{23} , b_{24} , b_{25} , b_{34} i b_{35} nijesu značajni i da je model adekvatan. Određene su vrijednosti koraka po gradijentnoj liniji i eksperimentalne tačke kojih u ovom ciklusu ima osam. U ovom ciklusu se vidi da funkcija vertikalne sile zavarivanja F_z ima minimum, pa se kao najpovoljnija uzima treća tačka, ($\omega = 230$ mm/min, $v = 840$ o/min, $\alpha = 3.4^\circ$, $d = 6.2$ mm i $D = 26.4$ mm). Ova tačka ujedno predstavlja i optimalne ulazne parametre procesa FSW na osnovu minimuma srednje vrijednosti vertikalne sile zavarivanja F_z .

Na kraju programa dobijamo izlazne podatke varirajućih faktora koji su prikazani na Slici 7.1 preko krive reagovanja F_z u funkciji v za vrijednosti, ugaone brzine okretanja alata, ugla nagiba trna alata, prečnika trna alata i prečnika čela alata.



Slika 7.1. Kriva reagovanja F_z u funkciji v za odnose ω , α , d i D

7.2. MODELIRANJE IZLAZNIH PARAMETARA PROCESA FSW, REGRESIONA ANALIZA

Modeliranje procesa FSW se izvodi sa ciljem dobijanja visokokorelativnih matematičkih modela veličina koje karakterišu proces, odnosno izlaznih parametara (sile, temperature, zatezne čvrstoće i udarne žilavosti), u funkciji ulaznih faktora (brzine zavarivanja, ugaone brzine okretanja alata, ugla nagiba trna alata, prečnika trna alata i

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

prečnika čela alata). Da bi dobili matematičke (regresione) modele traženih veličina potrebno je izvršiti regresionu analizu, odnosno odrediti koeficijente regresije, izračunati disperziju eksperimentalnih rezultata, provjeriti adekvatnost dobijenog regresionog modela, izvršiti ocjenu signifikantnosti koeficijenata regresije, proračun granica pouzdanosti koeficijenata regresije i dati interpretaciju rezultata ispitivanja. Za ocjenu signifikantnosti koeficijenata usvajaju se tablične vrijednosti disperzionih odnosa prema Fišerovom kriterijumu $F_7(5\%,1.3)=10.13$, a za provjeru adekvatnosti modela $F_7(5\%,5.3)=8.64$ [151, 152].

Da bi regresiona analiza mogla biti korektno sprovedena potrebno je napraviti pravilan izbor što jednostavnijeg matematičkog modela. Visokokorelativni matematički model treba da zadovolji dva uslova:

1. da dobro aproksimira izlazne veličine (kada je u pitanju temperatura modeliranje se vrši po poprečnom presjeku radnog komada) i
2. da dobro aproksimira izlazne veličine u svim tačkama hiperprostora ulaznih faktora u usvojenim granicama.

Ovi uslovi se mogu zadovoljiti, s obzirom na karaktere promjena izlaznih parametara, u okviru usvojenih granica intervala varijacije ulaznih faktora, ali nije moguće usvojiti jedinstveni model koji će opisati promjene izlaznih parametara: sila, temperature po poprečnom presjeku radnog komada, zatezne čvrstoće i udarne žilavosti, pa se u hiperprostoru ulaznih faktora matrice plana eksperimenta modeliranje vrši posebno.

Za dobijanje matematičkog modela u ovom radu, prvo se pošlo od modela prvog reda i modela prvog reda sa međudejstvom faktora koji su dali nezadovoljavajuće rezultate [122, 150]. Rezultati sa visokim koeficijentom korelacije su dobijeni korišćenjem tzv. modela sa kvadratnom funkcijom odziva, koji se sastoji od linearnih članova, članova međudejstva faktora i kvadratnih članova.

Za modeliranje komponenti sila kod procesa FSW, korišćen je model sa pet ulaznih faktora i on ima oblik:

$$\begin{aligned} y = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \\ & + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{15} x_1 x_5 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\ & + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{25} x_2 x_5 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{35} x_3 x_5 + \beta_{45} x_4 x_5 + \\ & + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{55} x_5^2. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Sa dijagrama dobijenih komponenti sila F_x , F_y i F_z iz Poglavlja 6, vidi se da na prvi dio dijagrama, gdje se alat ukopava u materijal, ne utiče faktor brzine zavarivanja x_5 , sve do trenutka kada počinje uzdužno kretanje. Pa se za modeliranje komponenti sila uzima dio dijagrama od početka uzdužnog kretanja do zaustavljanja uzdužnog kretanja. Sa dijagrama iz Poglavlja 6 se vidi da na ovome dijelu gdje se vrši proces zavarivanja trenjem, sile imaju konstantne vrijednosti sa vrlo malim šumom koji se javlja prilikom mjerjenja sila. Za relevantnu vrijednost izmjerениh sila uzima se srednja vrijednost sile F_x , F_y i F_z . Bočna komponenta sile u y -pravcu ima male vrijednosti, pa je njen uticaj na proces zavarivanja postupkom FSW minimalan.

Kod modeliranja temperature po poprečnom presjeku zavarenih radnih komada takođe je korišćen model od pet članova, izraz (7.11). Temperatura je mjerena u donjoj zoni (termo-parovi T_1 , T_2 i T_3) i gornjoj zoni (termo-parovi T_4 , T_5 i T_6). Uzete su

maksimalne vrijednosti temperature za svaku poziciju mjerena. U poprečnom presjeku imamo dvije krive u funkciji temperature sa po tri tačke, pa se modeliranje vrši po principu „tačka po tačka”.

Za modeliranje zatezne čvrstoće i udarne žilavosti se takođe koristi model sa kvadratnom funkcijom odziva, izraz (7.11).

Za sprovođenje regresione analize urađen je program u programskom jeziku MATLAB (v. 7.0), koji je dat u Prilogu 5. Program posjeduje statističke alate za *Nonlinear Estimation*, i koristi *Gauss-Newton* metod najmanjih kvadrata. Ulazni podaci za regresionu analizu su matrica vrijednosti ulaznih faktora u tačkama eksperimentalnog plana, dok su izlazni podaci vektori kolone izlaznih traženih parametara za sve kombinacije vrijednosti ulaznih faktora.

Vrijednosti koeficijenata regresije za uzdužnu silu F_x , bočnu silu F_y i vertikalnu silu F_z su date u Tabeli 7.5, a dobijene modelske vrijednosti u Tabeli 7.6. Radi bolje preglednosti dobijenih rezultata u Tabeli 7.6 su date i srednje vrijednosti komponenti sila F_x , F_y i F_z koje su dobijene eksperimentalnim putem.

Tabela 7.5. Koeficijenti regresije za uzdužnu silu F_x , bočnu silu F_y i vertikalnu silu F_z

	F_x	F_y	F_z
β_0	5616.2	5617.1	5615.4
β_1	42.281	42.266	42.264
β_2	-33.083	-33.083	-33.084
β_3	1077.8	1077.6	1077.6
β_4	537.72	537.58	537.24
β_5	88.287	88.271	88.269
β_{12}	0.00000017587	0.00000011455	-0.0000035788
β_{13}	-0.00025297	0.000042276	-0.00094594
β_{14}	0.00039089	0.000022734	-0.00069219
β_{15}	-0.0004301	-0.000044719	0.000015056
β_{23}	0.000066098	0.000011319	0.000081317
β_{24}	0.0000048632	-0.000003.355	0.00010368
β_{25}	0.000049313	-0.00001208	-0.000014618
β_{34}	-0.020078	-0.0010834	-0.014837
β_{35}	-0.010627	-0.0055873	-0.010983
β_{45}	-0.026431	-0.006099	0.048692
β_{11}	-0.15096	-0.15095	-0.15089
β_{22}	0.020295	0.020296	0.020297
β_{33}	-134.68	-134.69	-134.62
β_{44}	-44.747	-44.783	-44.84
β_{55}	-1.6618	-1.664	-1.6618

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

Tabela 7.6. Eksperimentalne i modelske vrijednosti komponenti sila F_x , F_y i F_z

	F_x eksp.	F_x model	F_y eksp.	F_y model	F_z eksp.	F_z model
1.	1.5562	1.4934	0.1976	0.1898	5.1488	5.1689
2.	1.2317	1.2111	0.1758	0.1717	4.7921	4.9471
3.	1.2154	1.4287	0.1746	0.1992	5.4799	5.4577
4.	1.3641	1.2245	0.1966	0.1862	5.2000	5.0770
5.	1.5064	1.5436	0.1854	0.1730	4.9435	4.9720
6.	1.1876	1.2006	0.1625	0.1651	4.6125	4.5232
7.	1.6050	1.5279	0.1915	0.1908	5.1069	5.3210
8.	1.2262	1.2629	0.1798	0.1879	4.8964	4.7133
9.	1.3692	1.4075	0.1698	0.1749	4.2698	4.3361
10.	1.1821	1.2190	0.1581	0.1622	4.0600	3.9482
11.	1.4924	1.3788	0.1996	0.1818	4.4661	4.7016
12.	1.2203	1.2684	0.1679	0.1742	4.3747	4.1548
13.	1.3939	1.3774	0.1449	0.1537	4.1520	4.0798
14.	1.1534	1.1282	0.1476	0.1512	3.4614	3.4649
15.	1.4163	1.3976	0.1690	0.1690	4.9755	4.5055
16.	1.1758	1.2265	0.1817	0.1716	3.1631	3.7317
17.	1.7262	1.6911	0.2183	0.2304	3.9632	3.7702
18.	1.2132	1.2539	0.2048	0.1962	3.4895	3.5538
19.	1.7561	1.6812	0.2315	0.2264	4.0800	4.0428
20.	1.2431	1.3221	0.1980	0.1972	3.5315	3.6675
21.	1.6862	1.6775	0.1758	0.1801	3.5520	3.5074
22.	1.1432	1.1797	0.1422	0.1560	3.0049	3.0640
23.	1.7083	1.7165	0.1995	0.1844	3.8056	3.8401
24.	1.3425	1.2968	0.1660	0.1654	3.2569	3.2379
25.	1.4258	1.4466	0.1766	0.1788	3.2616	3.2295
26.	1.1213	1.1033	0.1531	0.1501	2.8158	2.8470
27.	1.4586	1.4727	0.1856	0.1723	3.6161	3.5788
28.	1.2340	1.2075	0.1321	0.1487	2.9694	3.0375
29.	1.3257	1.3527	0.1366	0.1242	2.6802	2.9073
30.	1.0118	0.9486	0.1139	0.1056	2.4099	2.2979
31.	1.3791	1.4277	0.0986	0.1261	3.2342	3.3168
32.	1.1046	1.1018	0.1216	0.1125	2.7761	2.5484
33.	1.4057	1.3812	0.1841	0.1819	3.5938	3.6008
34.	1.3878	1.3812	0.1852	0.1819	3.6196	3.6008
35.	1.3346	1.3812	0.1731	0.1819	3.6049	3.6008
36.	1.3967	1.3812	0.1851	0.1819	3.5849	3.6008

DOKTORSKA DISERTACIJA

Vrijednosti koeficijenata regresije temperature za poprečni presjek zavarenih radnih komada date su u Tabeli 7.7, a dobijene modelske i eksperimentalne vrijednosti temperature u Tabeli 7.8.

Tabela 7.7. Koeficijenti regresije temperature za mjerna mesta T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 i T_6

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
β_0	5580.8	5586.3	5664.2	5881.7	5715.7	5656.7
β_1	44.174	42.843	42.171	43.463	42.646	42.317
β_2	-33.004	-33.081	-33.09	-32.935	-33.051	-33.057
β_3	1067.4	1074.3	1057.4	1068.6	1035.4	1066.2
β_4	569.8	562.43	560.35	538.2	568.99	548.36
β_5	89.073	91.306	90.317	86.667	89.242	87.906
β_{12}	-0.0003108	-0.0002961	-0.0003094	-0.0003986	-0.0004085	-0.0003226
β_{13}	-0.04875	-0.049688	-0.037969	-0.015417	-0.05474	-0.034375
β_{14}	-0.034479	-0.034063	-0.034323	-0.073542	-0.036927	-0.028438
β_{15}	-0.011319	-0.0020139	-0.0044792	-0.021181	-0.016701	-0.0014584
β_{23}	0.021182	0.015068	0.016436	0.049899	0.021774	0.0089189
β_{24}	-0.039189	-0.030608	-0.035895	-0.050304	-0.036976	-0.034223
β_{25}	0.0082432	0.0081982	0.0079392	0.0014414	0.007241	0.0051126
β_{34}	-0.7	-1.0688	-0.72187	0.16875	-0.20313	-4.2375
β_{35}	5.2333	1.6458	3.2896	4.15	7.7646	3.0917
β_{45}	-3.2708	-3.0792	-2.3979	4.1167	-3.3646	0.24583
β_{11}	-0.15554	-0.15172	-0.14915	-0.15123	-0.14921	-0.15019
β_{22}	0.020209	0.020252	0.020278	0.020235	0.020259	0.02032
β_{33}	-150.92	-138.66	-142.46	-152.99	-155.35	-140.22
β_{44}	-37.504	-37.583	-38.572	-51.541	-37.653	-42.33
β_{55}	-1.5749	-1.4014	-1.574	-2.1575	-1.7288	-1.7453

Tabela 7.8. Eksperimentalne i modelske vrijednosti temperature za mjerna mesta T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 i T_6

	T_1 eksp.	T_1 model	T_2 eksp.	T_2 model	T_3 eksp.	T_3 model	T_4 eksp.	T_4 model	T_5 eksp.	T_5 model	T_6 eksp.	T_6 model
1.	280.7	280.20	228.7	228.13	215.0	218.11	339.2	335.63	240.7	249.94	187.2	192.89
2.	344.7	339.09	292.6	285.38	275.2	272.67	390.6	391.48	319.0	314.78	243.6	249.35
3.	287.3	303.44	232.1	242.48	224.5	235.35	352.3	370.08	262.9	271.66	197.5	211.80
4.	353.8	348.52	292.7	286.58	280.7	276.18	405.8	408.23	326.3	318.36	260.2	253.94
5.	265.7	254.01	215.3	210.63	198.5	190.90	334.0	317.96	224.8	211.16	198.2	186.10
6.	306.7	301.20	259.0	255.96	242.3	236.36	371.0	370.11	270.2	262.86	243.3	234.31
7.	287.3	292.92	231.8	236.13	217.1	220.31	388.1	389.33	242.1	248.99	211.9	211.61

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

Tabela 7.8. Eksperimentalne i modelske vrijednosti temperature za mjerna mesta T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 i T_6 (nastavak)

	T_1 eksp.	T_1 model	T_2 eksp.	T_2 model	T_3 eksp.	T_3 model	T_4 eksp.	T_4 model	T_5 eksp.	T_5 model	T_6 eksp.	T_6 model
8.	319.5	326.31	261.4	268.31	248.6	252.02	425.6	423.78	274.3	282.56	243.6	245.50
9.	338.6	323.04	276.7	263.21	267.0	250.15	412.7	394.03	315.3	294.81	240.4	220.50
10.	349.7	373.65	291.9	312.28	281.8	296.48	412.6	432.23	331.8	350.79	263.0	270.14
11.	324.5	317.27	256.9	254.91	246.4	240.83	397.3	391.26	295.9	289.16	223.6	214.09
12.	360.0	354.09	292.2	290.83	272.6	273.42	424.2	411.76	324.6	327.01	246.6	249.40
13.	279.3	294.05	229.5	241.43	205.8	220.06	363.0	377.03	238.5	255.21	177.8	196.76
14.	332.8	332.96	281.9	278.58	256.4	257.28	406.9	411.53	297.3	298.06	234.7	238.15
15.	305.5	303.96	250.2	244.28	224.3	222.9	399.9	411.18	266.4	265.68	194.1	196.95
16.	337.7	329.08	274.5	268.28	253.2	246.38	440.4	427.98	301.3	290.39	229.8	224.01
17.	220.5	235.64	180.2	193.63	163.9	177.3	254.5	278.36	189.1	199.58	135.1	140.68
18.	305.3	290.45	258.8	250.16	245.4	230.26	352.8	326.58	275.4	258.41	212.2	196.61
19.	292.1	268.03	234.6	217.08	222.5	203.36	349.0	314.41	248.0	229.34	184.6	165.26
20.	290.0	309.04	244.2	260.46	228.6	242.58	325.5	344.93	250.7	270.03	197.0	206.87
21.	227.6	240.85	183.9	186.01	168.9	169.83	263.1	285.58	199.3	207.39	145.2	152.44
22.	274.2	283.96	222.0	230.61	199.9	213.68	330.6	330.11	238.7	253.08	187.7	200.12
23.	302.8	288.91	228.1	220.61	212.8	208.05	369.7	358.56	264.4	253.26	184.7	183.63
24.	322.6	318.22	258.8	252.06	241.2	238.16	378.7	385.38	286.3	280.81	216.1	216.99
25.	251.5	258.85	205.2	210.23	187.2	194.96	355.8	361.46	216.2	224.26	158.0	169.76
26.	315.3	305.39	267.5	258.58	244.1	239.68	393.6	392.03	279.3	274.23	219.3	218.87
27.	253.5	262.24	206.3	211.03	188.0	194.45	344.7	360.28	217.3	226.66	157.6	169.03
28.	296.4	294.98	250.6	246.23	228.3	225.43	375.3	373.16	265.0	258.49	207.1	203.81
29.	284.0	261.26	212.1	198.33	199.6	184.60	397.1	369.36	249.7	231.26	181.8	164.58
30.	294.1	296.10	232.6	234.76	221.5	220.21	392.2	396.23	268.6	268.09	209.2	205.44
31.	264.1	280.32	196.8	210.28	185.9	196.26	399.2	405.11	237.5	249.76	168.8	170.44
32.	301.6	301.36	231.9	233.56	219.1	218.13	414.0	414.28	267.6	268.46	197.1	196.97
33.	326.8	330.83	245.6	247.43	226.5	226.48	408.0	409.63	280.5	278.63	208.1	209.10
34.	336.6	330.83	251.6	247.43	226.5	226.48	410.0	409.63	279.9	278.63	209.6	209.10
35.	329.7	330.83	246.2	247.43	226.5	226.48	409.5	409.63	276.2	278.63	210.0	209.10
36.	330.2	330.83	246.3	247.43	226.4	226.48	411.0	409.63	277.9	278.63	208.7	209.10

Vrijednosti koeficijenata regresije zatezne čvrstoće R_m u x i y - pravcu, kao i udarne žilavosti ρ , date su u Tabeli 7.9, a dobijene modelske i eksperimentalne vrijednosti u Tabeli 7.10.

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tabela 7.9. Koeficijenti regresije za zateznu čvrstoću Rm_x , Rm_y i udaru žilavost ρ

	Rm_x	Rm_y	ρ
β_0	5804.4	5820.1	5733.4
β_1	43.507	42.277	42.523
β_2	-32.882	-32.979	-33.16
β_3	1131.9	1088.9	1091.8
β_4	547.69	546.62	536.11
β_5	93.177	90.577	85.555
β_{12}	-0.00016806	-0.0000017539	0.00027686
β_{13}	0.020983	0.0082075	0.01649
β_{14}	0.02817	0.026478	0.085927
β_{15}	0.02082	0.0025658	-0.015625
β_{23}	-0.0021882	0.0053389	-0.004223
β_{24}	0.0051359	-0.019716	0.00028375
β_{25}	-0.0082264	-0.001554	0.019331
β_{34}	4.0857	0.22536	-1.8225
β_{35}	-4.5879	0.0018465	-0.034584
β_{45}	0.076976	0.79943	1.4929
β_{11}	-0.1577	-0.15186	-0.15338
β_{22}	0.020313	0.020321	0.019982
β_{33}	-129.97	-137.09	-135.59
β_{44}	-48.162	-46.391	-48.287
β_{55}	-1.5736	-1.7725	-2.0307

Tabela 7.10. Eksperimentalne i modelske vrijednosti za zateznu čvrstoću Rm_x , Rm_y i udaru žilavost ρ

	Rm_x eksp.	Rm_x model	Rm_y eksp.	Rm_y model	ρ eksp.	ρ model
1.	349.89	342.45	332.00	329.02	50.00	35.311
2.	340.72	334.36	325.59	322.61	18.33	23.332
3.	365.83	346.34	327.90	333.00	25.00	39.579
4.	331.37	330.79	323.81	326.51	51.66	39.893
5.	361.16	353.77	333.69	327.59	58.33	50.414
6.	336.54	350.73	320.87	323.14	28.33	42.393
7.	348.91	356.04	333.69	335.52	63.33	51.558
8.	325.59	345.54	330.84	331.00	56.66	55.829
9.	322.29	336.25	330.84	330.97	18.33	21.664
10.	321.49	334.93	329.42	330.91	23.33	30.308

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

Tabela 7.10. Eksperimentalne i modelske vrijednosti za zateznu čvrstoću Rm_x , Rm_y i udamu žilavost ρ (nastavak)

	Rm_x eksp.	Rm_x model	Rm_y eksp.	Rm_y model	ρ eksp.	ρ model
11.	338.32	343.95	320.87	320.36	26.66	26.143
12.	334.31	335.16	323.18	320.22	50.00	47.079
13.	362.27	363.92	330.84	330.45	28.33	29.478
14.	389.69	367.64	323.81	332.35	53.33	42.079
15.	364.05	370.00	320.87	323.78	15.00	30.832
16.	385.68	366.25	334.85	325.62	58.33	55.726
17.	401.44	392.50	319.18	325.43	13.33	22.082
18.	378.65	391.91	318.55	319.94	10.00	4.4781
19.	360.58	387.26	333.16	327.69	46.66	47.808
20.	376.34	379.21	326.12	322.12	40.00	42.497
21.	358.80	376.30	316.24	324.01	30.00	36.978
22.	395.57	380.75	326.12	320.49	43.33	23.332
23.	377.49	369.44	336.63	330.22	56.66	59.579
24.	394.94	366.43	320.51	326.62	55.00	58.226
25.	382.83	386.77	334.85	332.18	20.00	17.393
26.	399.66	385.33	319.71	319.85	21.66	20.412
27.	414.80	392.95	333.69	333.04	53.33	43.329
28.	385.68	384.05	315.62	320.63	51.66	58.641
29.	400.20	386.91	333.69	331.66	20.00	24.999
30.	373.93	398.12	338.94	334.50	23.33	31.976
31.	387.38	383.86	320.87	323.28	60.00	47.811
32.	361.11	387.60	323.81	326.03	61.66	67.079
33.	388.53	388.18	332.98	333.20	63.33	64.58
34.	389.16	388.18	332.00	333.20	63.33	64.58
35.	388.18	388.18	333.87	333.20	66.66	64.58
36.	386.84	388.18	333.96	333.20	65.00	64.58

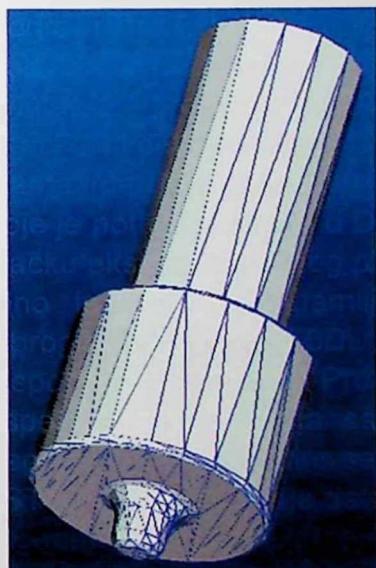
S obzirom da postoji relativno veliki broj ispitivanih parametara procesa FSW (ukupno 12), posle izvršene regresione i disperzionale analize, dobijene su datoteke svih parametara modela, na osnovu kojih je moguće izvršiti kvalitetnu analizu i dobiti modelske dijagrame za istraživane parametre procesa FSW.

7.3. NUMERIČKA SIMULACIJA

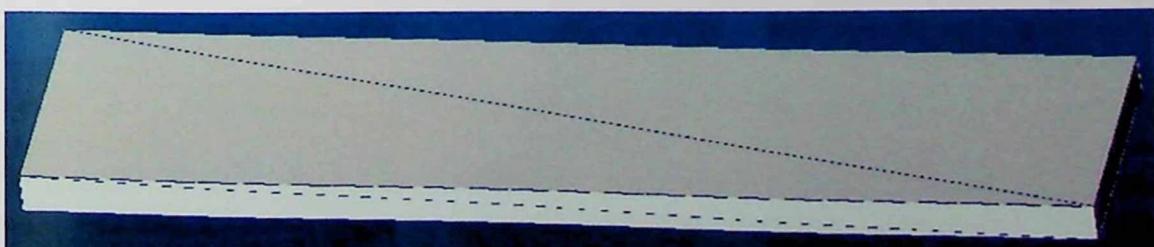
Za numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata korišćen je softverski paket DEFORM-3D [30]. Da bi se izvršila DEFORM simulacija potrebno je unijeti

određene ulazne podatke i formirati fajl sa ekstenzijom *.KEY, na osnovu koga se može formirati baza podataka. Pošto je DEFORM-3D dosta složen program i namijenjen je prvenstveno za numeričku simulaciju procesa iz obrade deformisanjem, program ne posjeduje alate za formiranje geometrije složenih objekata ispitivanja. Za formiranje geometrije korišćen je CAD program Pro/ENGINEER [61]. Da bi se mogli upoređivati numerički podaci dobijeni simulacijom procesa FSW sa eksperimentalnim podacima potrebno je izvršiti 36 simulacija procesa FSW, koje odgovaraju tačkama eksperimentalnog plana. Numeričke simulacije 33, 34, 35 i 36, su sa istim početnim faktorima, pa ćemo u ovim tačkama imati iste rezultate numeričkih simulacija. Pošto je u pitanju veliki broj parametara koje je potrebno unijeti u DEFORM program biće prikazan unos parametara samo za 36. tačku eksperimentalnog plana.

U prvom koraku potrebno je geometriju familije od devet alata prilagoditi ekstenzijama koje podržava program DEFORM-3D. Urađeni modeli 3D alata se konvertuju u formate *.STL i eksportuju iz programa Pro/ENGINEER. Na Slici 7.2 dat je prikaz alata za 36. tačku eksperimentalnog plana sa parametarskim koordinatama tačaka koje opisuju složenu geometriju alata. Zatim se takođe urađeni model radnog komada, konvertuje u format *.STL i njegov prikaz je dat na Slici 7.3.



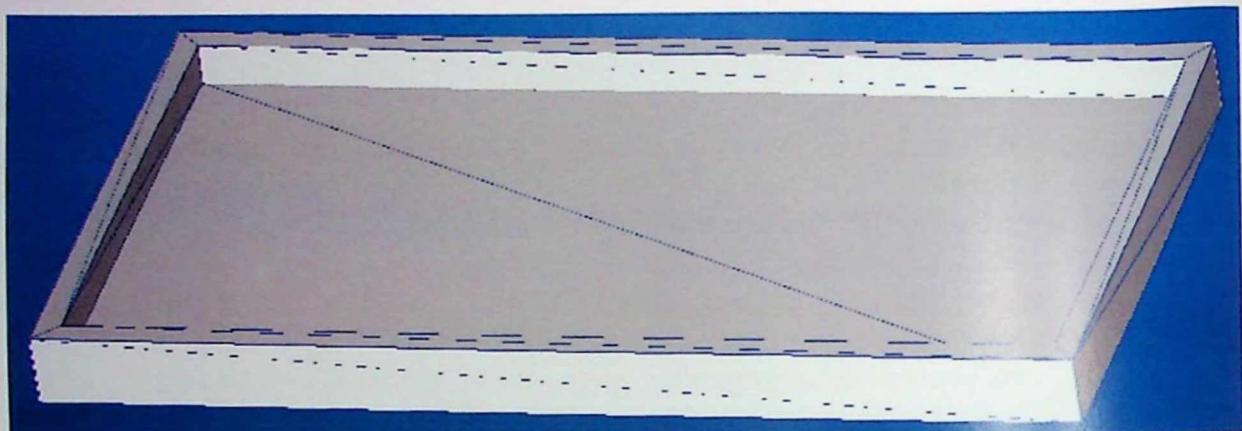
Slika 7.2. Prikaz parametarski formirane geometrije alata za 36. tačku eksperimentalnog plana koja se učitava u program DEFORM-3D



Slika 7.3. Prikaz parametarski formirane geometrije radnog komada koji se učitava u program DEFORM-3D

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

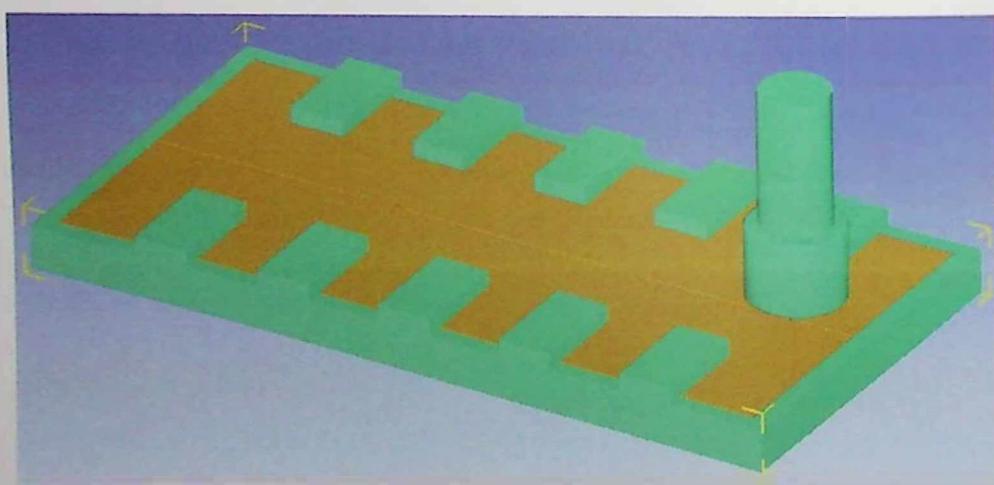
Da bi radni komadi mogli da stoje u prostoru DEFORM-a potrebno je modelirati oslonu ploču, tako da radni komadi čvrsto stoje u njoj. Oslona ploča takođe je konvertovana u format *.STL i njen prikaz je dat na Slici 7.4. Sve geometrijske dimenzije alata, radnog komada i oslone ploče odgovaraju realnim.



Slika 7.4. Prikaz parametarski formirane geometrije oslone ploče koja se učitava u program DEFORM-3D

Kako su u realnim uslovima eksperimenta radni komadi bili stegnuti sa po pet stezača, u numeričkim simulacijama je urađeno isto, dodati su djelovi sa gornje strane oslone ploče tako da radni komadi stoje čvrsto postavljeni.

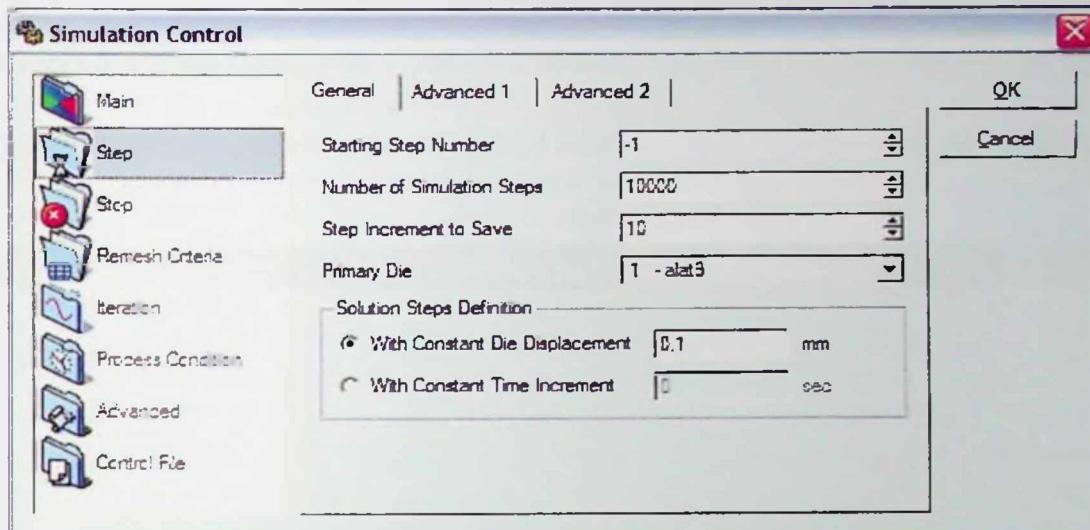
U drugom koraku u polju *Objeci* učitavaju se podaci koji su vezani za već formiranu geometriju alata, radnog komada i donjeg kalupa (oslone ploče, zajedno sa stezačima). Za tip alata se uzima *Rigid* (krut - materijal koji se ne deformatiše prilikom procesa), a on je ujedno i primarni kalup (*Primary Die*). Tip radnog komada je *Plastic* (plastičan - materijal koji se deformatiše tokom procesa). Oslona ploča i stezači su tipa *Rigid*. Na Slici 7.5 prikazan je formiran model numeričke simulacije procesa FSW.



Slika 7.5. Formiran model procesa FSW

Alat je pozicioniran tako da je udaljen od radne površine 1 mm, a od bočne ivice 17 mm i nalazi se na sredini linije spajanja radnih komada.

Kada je formirana pozicija objekata, u podmodulu *Simulation Control* (Slika 7.6), unose se podaci koji su vezani za izbor sistema jedinica, broja koraka, snimanja koraka, vrijednosti hoda po koraku, kao i vrijednosti zaustavljanja procesa SMAX. Ove vrijednosti su date u Tabeli 7.11 i nepromjenjive su za sve tačke eksperimentalnog plana.



Slika 7.6. Prikaz podmodula *Simulation Control*

Tabela 7.11. *Simulation Control*

Main	Units	<input checked="" type="checkbox"/> SI
	Type	<input checked="" type="checkbox"/> Incremental
	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Heat Transfer <input checked="" type="checkbox"/> Deformation
Step	Starting Step Number	NSTART=-1
	Number of simulation steps	NSTEP=10000
	Step Increment to Save	STPINC=10
	Primary Die	PDIE(1)=1 - alat9
	Solution Steps Definition <input checked="" type="checkbox"/> With Constant Die Displacement	DSMAX=0.1 mm
	Stop	Primary Die Displacement

U trećem koraku u podmodulu *Material* unose se podaci koji su vezani za materijal radnog komada. Izabran je materijal ALUMINIUM-6082 čiji se parametri nalaze u bazi podataka DEFORMA-3D. U podmodulu *Mesh* izabrana je mreža od 40000 elemenata koja se generiše na radne komade, a u podmodulu *Movement* unesene su vrijednosti brzine kretanja alata i ugaone brzine okretanja alata.

Numeričku simulaciju moguće je podijeliti u dvije etape. Prva etapa simulacije je kada se alat kreće vertikalno naniže i ukopava u materijal do dubine 6.9 mm, u stvari do trenutka kada čelo alata dohvati radni komad i uđe u materijal 0.1 mm. Druga etapa simulacije je proces zavarivanja, kada se alat kreće uzdužno 166 mm.

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

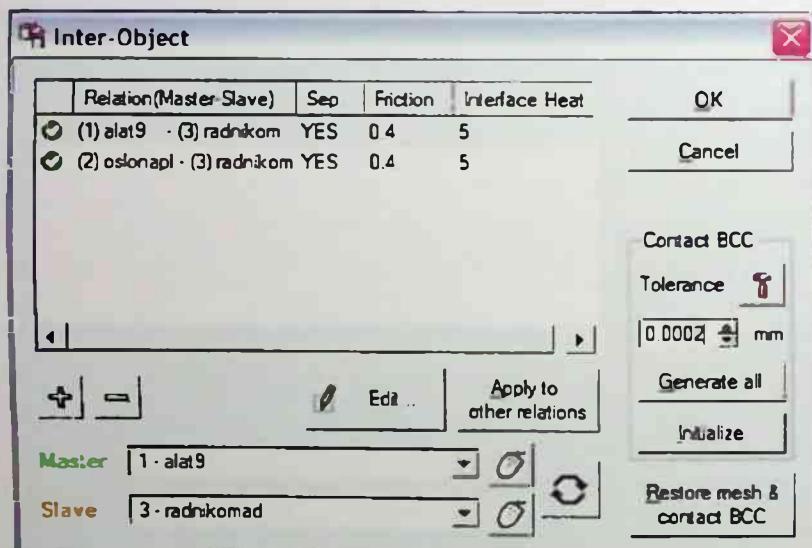
Za prvu etapu u podmodulu *Movement* unosi se brzina kretanja alata 0.5 mm/sec u pravcu „-z” (*Constant*) i u polju *Rotation1* ugaona brzina okretanja alata 83.78 Rad/sec u pravcu „-z” (*Constant*). U drugoj etapi numeričke simulacije oslona ploča je primarni kalup i njena brzina odgovara tački eksperimentalnog plana u ovom slučaju 2.0833 mm/sec što odgovara brzini 125 mm/min. U ovoj etapi brzina kretanja alata je 0 mm/sec, a ugaona brzina okretanja 83.78 Rad/sec, što odgovara ugaonoj brzini od 800 o/min.

Kada alat izlazi iz materijala nema fizičkih procesa u materijalu, jer samim prestankom uzdužnog kretanja alata, a zatim kretanja vertikalno naviše prestaje kontakt alata i materijala koji se zavaruje, pa je ovdje numerička simulacija završena. Na Slici 7.7 data je šema kretanja alata sa brzinama kod numeričke simulacije.



Slika 7.7. Šema kretanja alata tokom procesa FSW

U četvrtom koraku u podmodulu *Inter Object* (Slika 7.8) unose se podaci koji su vezani za odnose kalupa i radnog komada, gdje se unose i vrijednosti faktora trenja i koeficijenta transfera topline koje su date u Tabeli 7.12.



Slika 7.8. Podmodul *Inter Object*

Tabela 7.12. *Inter-Object*

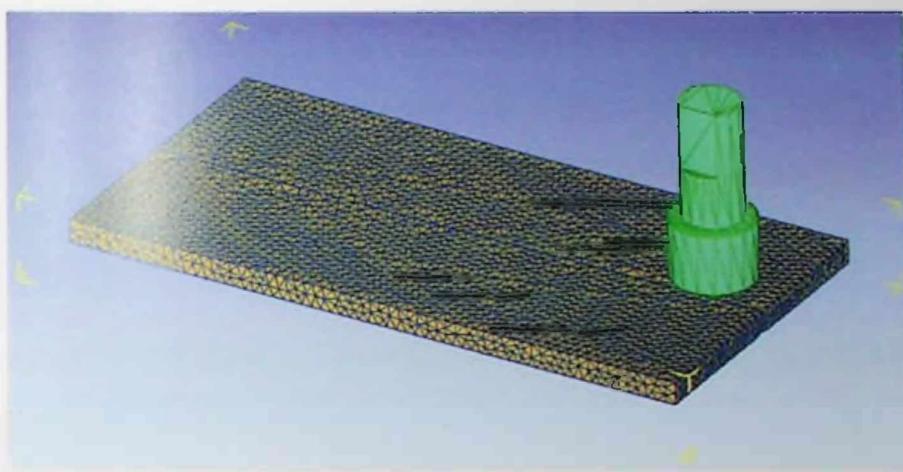
Alat9 - - Radni komad	Contact relation CNTACT	<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave
	Friction model FRCFAC	Shear
	Friction	0.4
	Heat Transfer Coefficient	5
Oslona ploča - - Radni komad	Contact relation CNTACT	<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave
	Friction model FRCFAC	Shear
	Friction	0.4
	Heat Transfer Coefficient	5

Ostale vrijednosti parametara uzete su kao *default* vrijednosti softverskog paketa DEFFORM-3D.

Nakon unošenja ulaznih podataka i generisanja mreže konačnih elemenata formira se početna baza podataka za početni korak, koji se označava kao -1. Kada se formira baza podataka onda su se stekli svi potrebni uslovi da se može izvršiti simulacija procesa FSW, odnosno aktiviranjem modula *Simulator* izvršiti numerička simulacija.

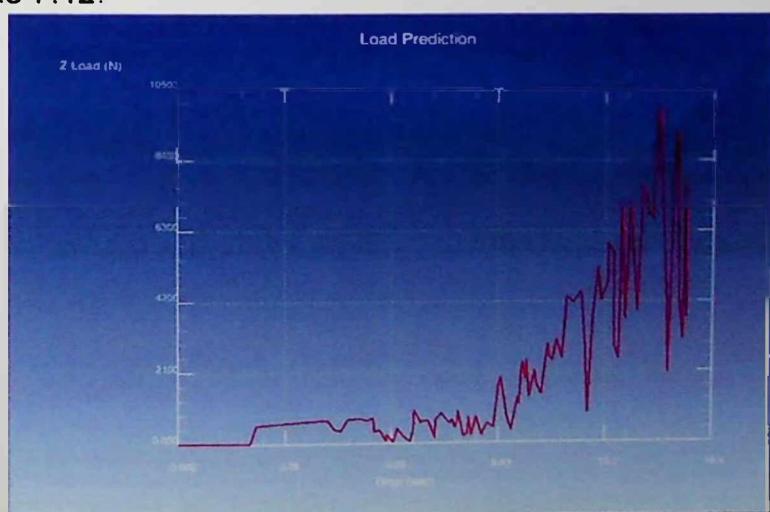
Nakon izvršene simulacije, dobijeni rezultati mogu se interpretirati u modulu *Post Processor* u grafičkom i *data* obliku.

Za prvu etapu numeričke simulacije, na Slici 7.9 dat je 3D prikaz radnih komada sa generisanim mrežom konačnih elemenata i alat.



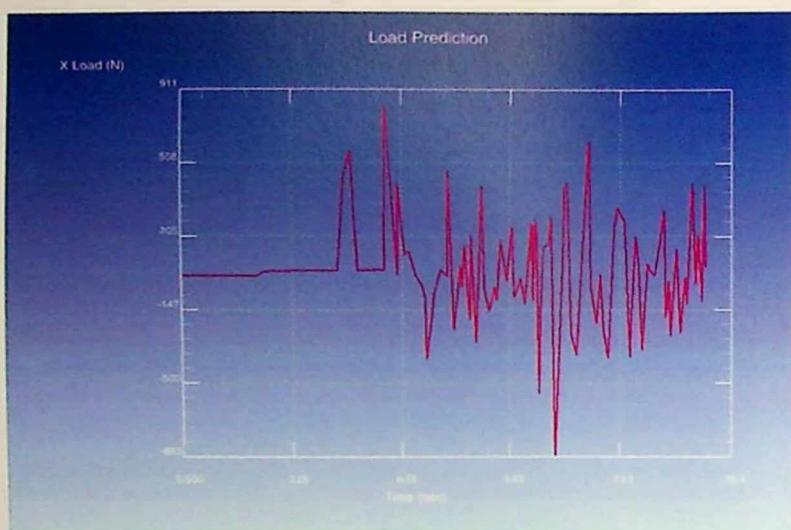
Slika 7.9. Radni komadi sa generisanom mrežom i alat

Nakon startovanja procesa simulacije vrše se numerički proračuni za vrijednost hoda po koraku DSMAX=0.1 mm, koji je ranije usvojen, pri čemu se u bazi podataka čuva svaki deseti korak. Kada parametri mreže konačnih elemenata dostignu kritične vrijednosti vrši se automatski *remeshing*. Proces prve etape završio se u 117.-om koraku. Sile koje se javljaju prilikom odvijanja simulacije procesa FSW date su na dijagramima Slike 7.10 do Slike 7.12.

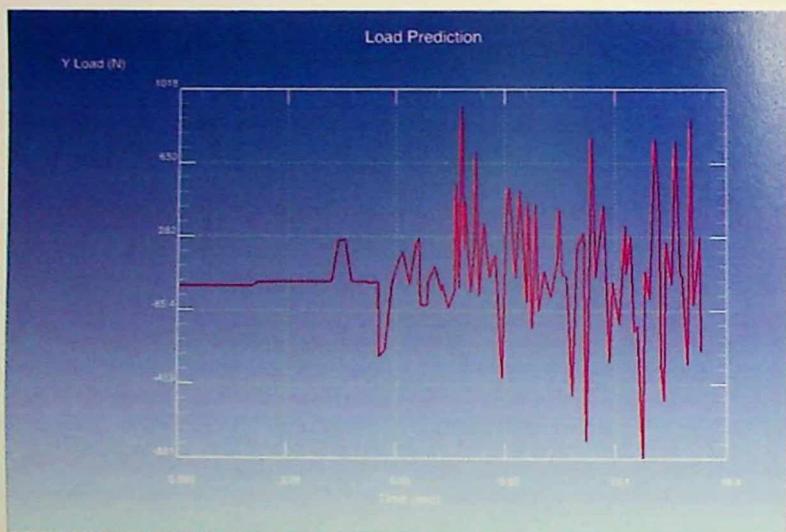


Slika 7.10. Vertikalna sila F_z (ukopavanje alata u materijal)

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

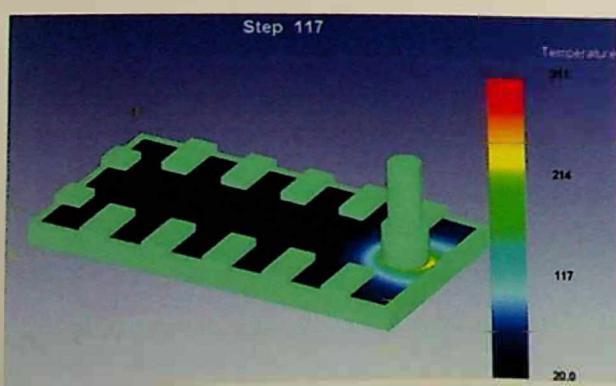


Slika 7.11. Uzdužna sila F_x (ukopavanje alata u materijal)

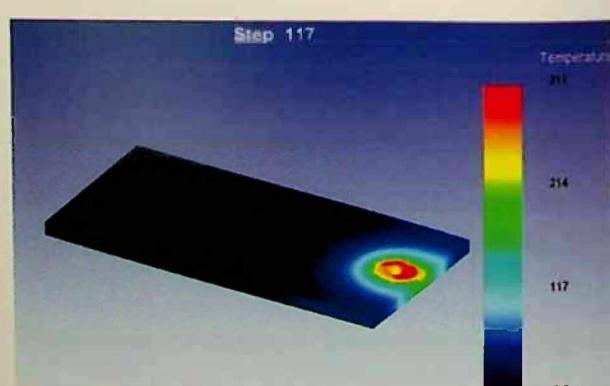


Slika 7.12. Bočna sila F_y (ukopavanje alata u materijal)

Konačan izgled radnog komada u 117-om koraku sa prikazom generisanja toplote u zahvatu sa alatom dat je na Slici 7.13, a na Slici 7.14 bez alata.

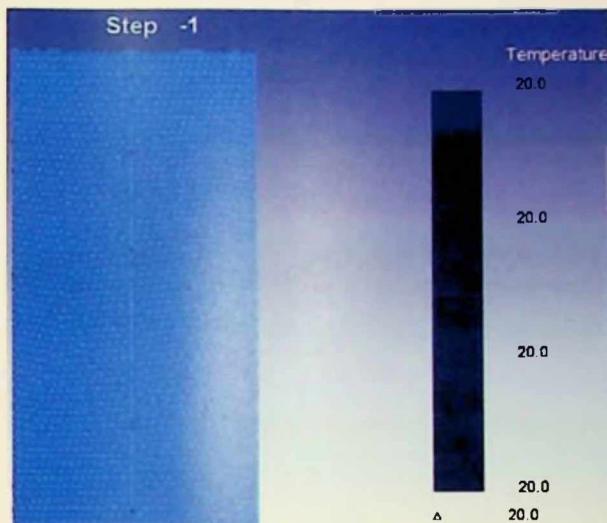


Slika 7.13. Prikaz radnih komada u 117-om koraku pri zahvatu sa alatom

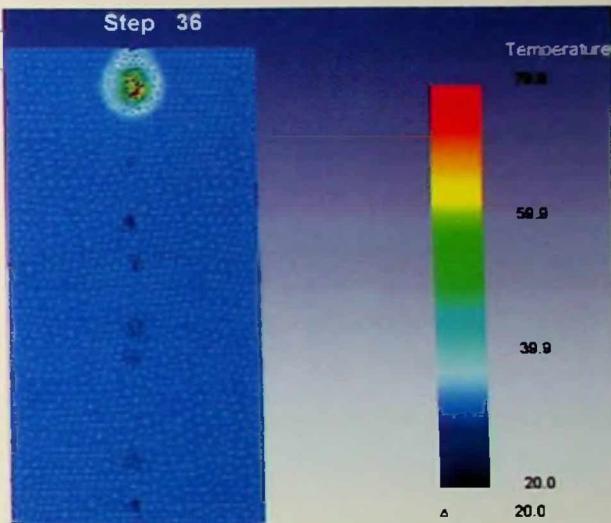


Slika 7.14. Prikaz radnih komada u 117-om koraku bez alata

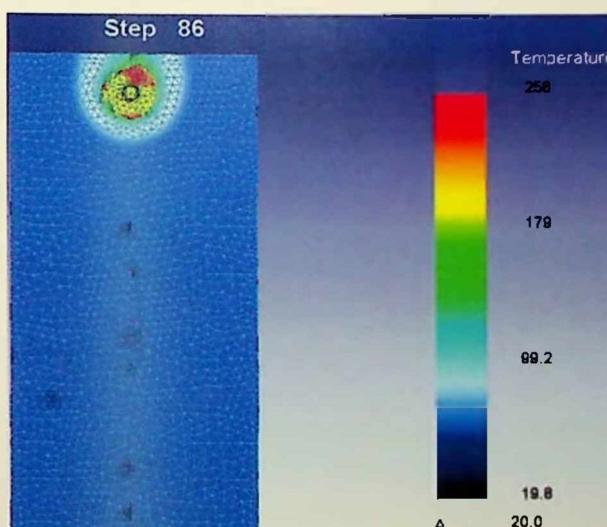
Prikazi generisanja toplote sa mrežom konačnih elemenata po koracima dati su na Slici 7.15 do Slike 7.18. Na Slici 7.19 dat je prikaz generisanja toplote bez mreže konačnih elemenata sa prednje (gornje) strane radnih komada, a na Slici 7.20 sa donje strane. Na Slici 7.21 dat je prikaz distribucije efektivne deformacije za 117. korak, a na Slici 7.22 prikaz distribucije efektivnog napona.



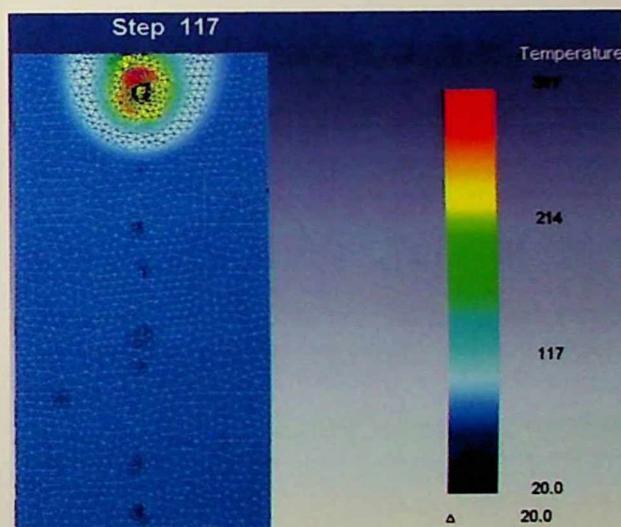
Slika 7.15. Prikaz generisanja toplote u početnom koraku -1



Slika 7.16. Prikaz generisanja toplote u 36-om koraku

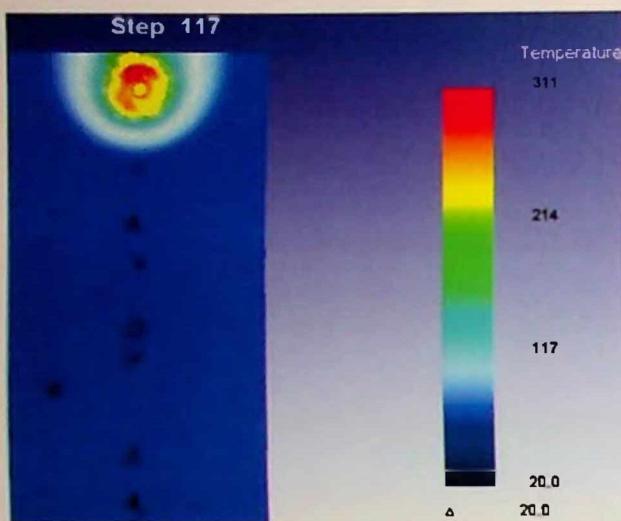


Slika 7.17. Prikaz generisanja toplote u 86-om koraku

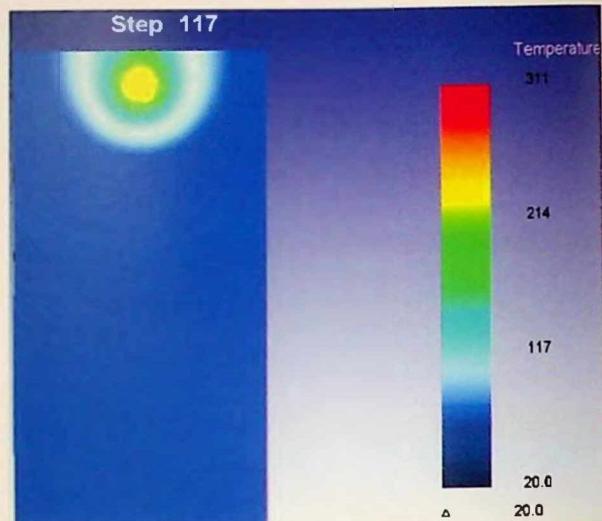


Slika 7.18. Prikaz generisanja toplote u 117-om koraku

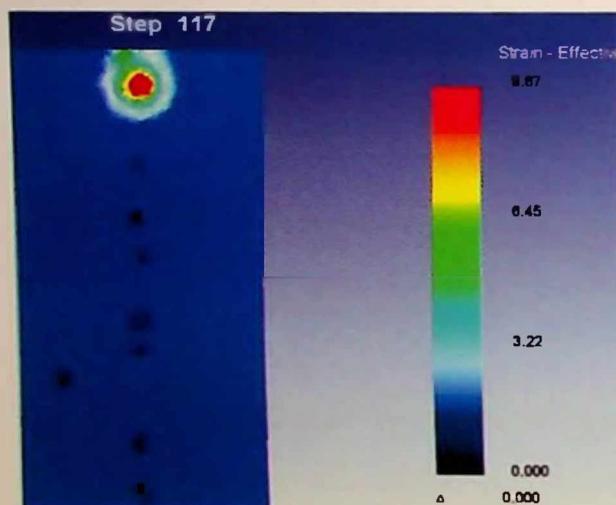
7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW



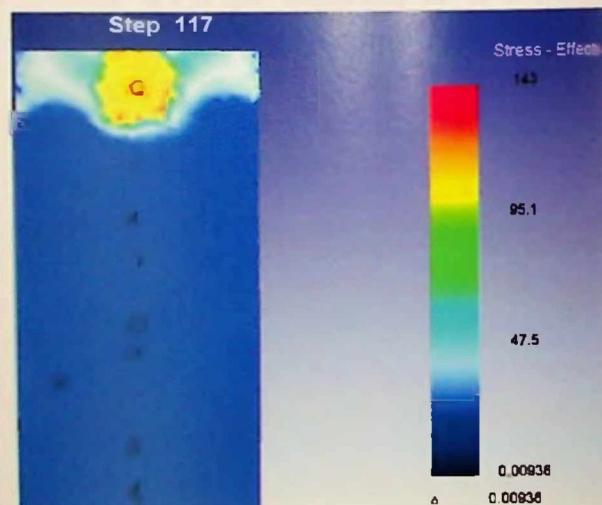
Slika 7.19. Prikaz generisanja topline sa prednje (gomje) strane



Slika 7.20. Prikaz generisanja topline sa donje strane



Slika 7.21. Prikaz generisanja efektivne deformacije

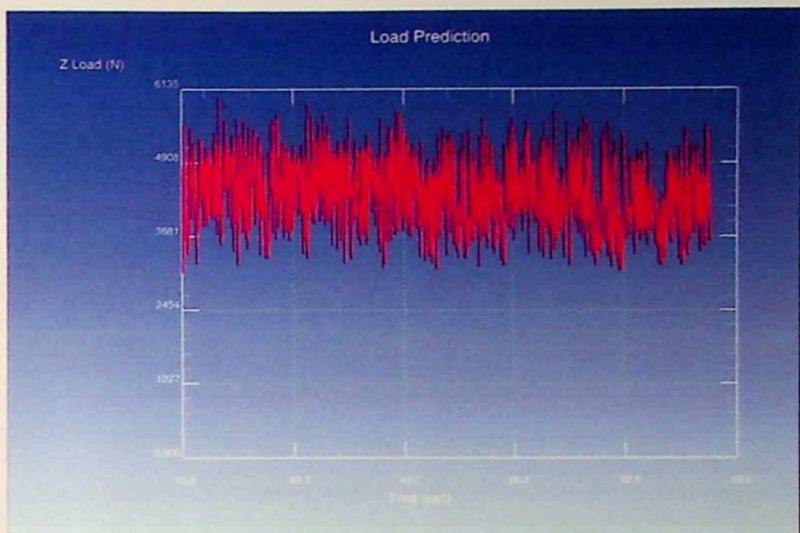


Slika 7.22. Prikaz generisanja efektivnog napona

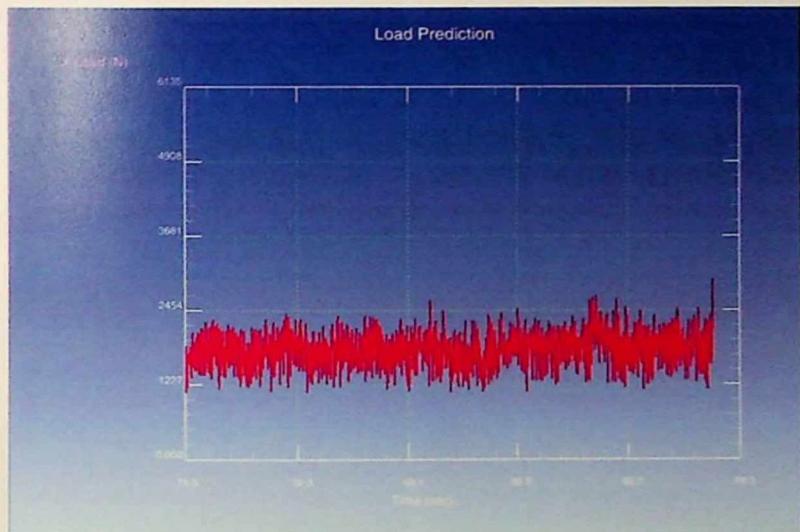
Za drugu etapu numeričke simulacije generiše se baza podataka za početni korak -118, koji je u ovom slučaju krajnji korak prve etape 117, a u modulu *Simulator* izvršava se numerička simulacija.

Nakon startovanja procesa simulacije za drugu etapu, vrše se numerički proračuni hoda po usvojenom koraku. U ovoj etapi je takođe vršen automatski *remeshing*. Proces je završen u 1805-om koraku, a time je i završena numerička simulacija procesa FSW.

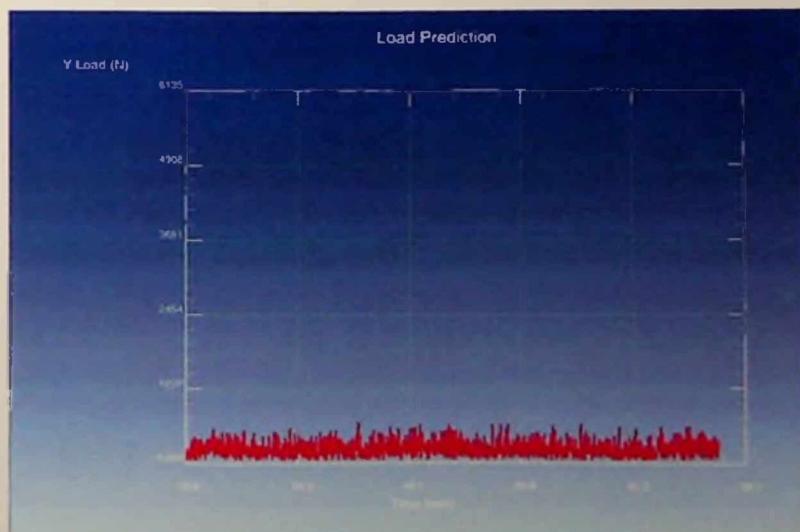
Sile F_z , F_x i F_y koje se predviđaju odnosno javljaju prilikom odvijanja druge etape simulacije procesa FSW date su na dijagramima u funkciji vremena, Slika 7.23 do Slike 7.24. Da bi vizuelno mogli lakše sagledati razlike dobijenih vrijednosti komponenti sile, dijagrami su prikazani u istom mernom opsegu.



7.23. Vertikalna sila F_z (proces spajanja)



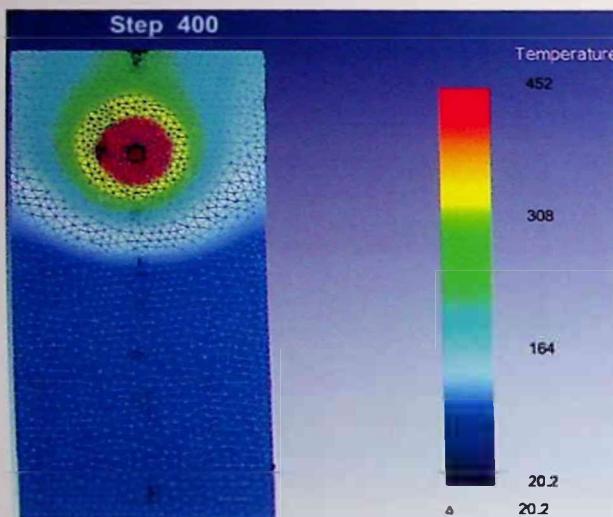
7.24. Uzdužna sila F_x - proces spajanja



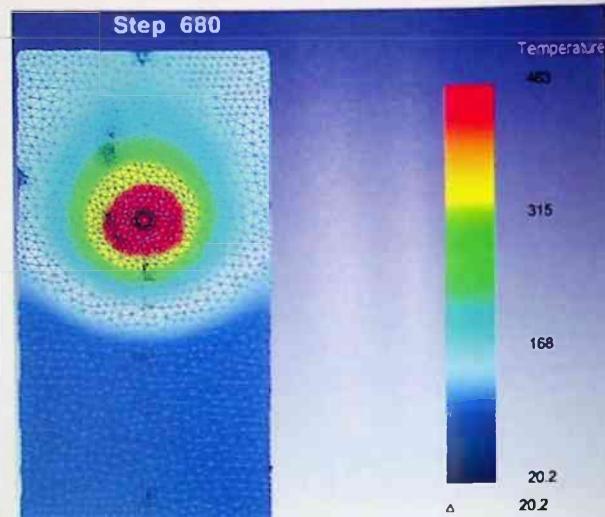
7.25. Bočna sila F_y - proces spajanja

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW

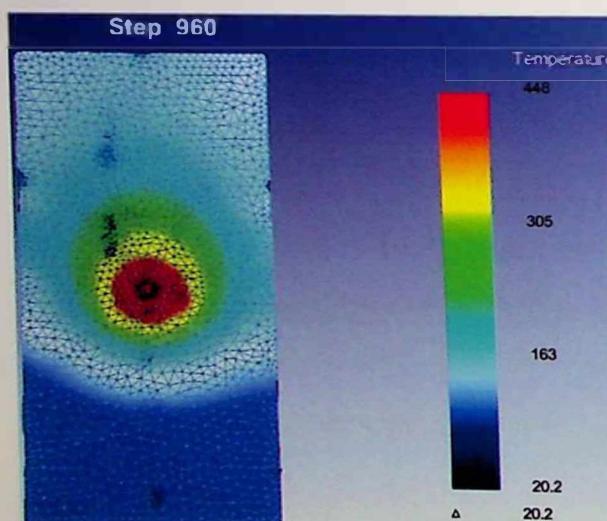
Zbog velikog broja koraka koji se javljaju prilikom izvođenja druge etape numeričke simulacije, odnosno kretanja alata duž linije spajanja od 166 mm, u radu će biti prikazani karaci na svakih 27.66 mm ili svakih 13.28 sec. Prikazi izabranih karakterističnih koraka sa deformisanim mrežom konačnih elemenata i generisanja toplote sa prednje gornje strane radnih komada dati su na Slici 7.26 do Slike 7.31.



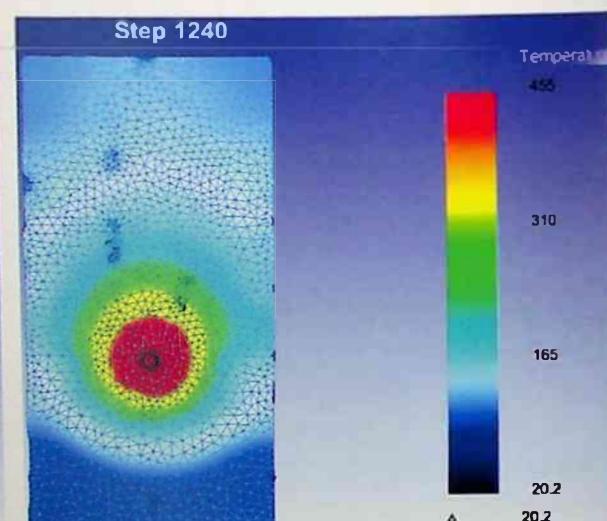
7.26. Prikaz deformisane mreže u 400-tom koraku



7.27. Prikaz deformisane mreže u 680-om koraku

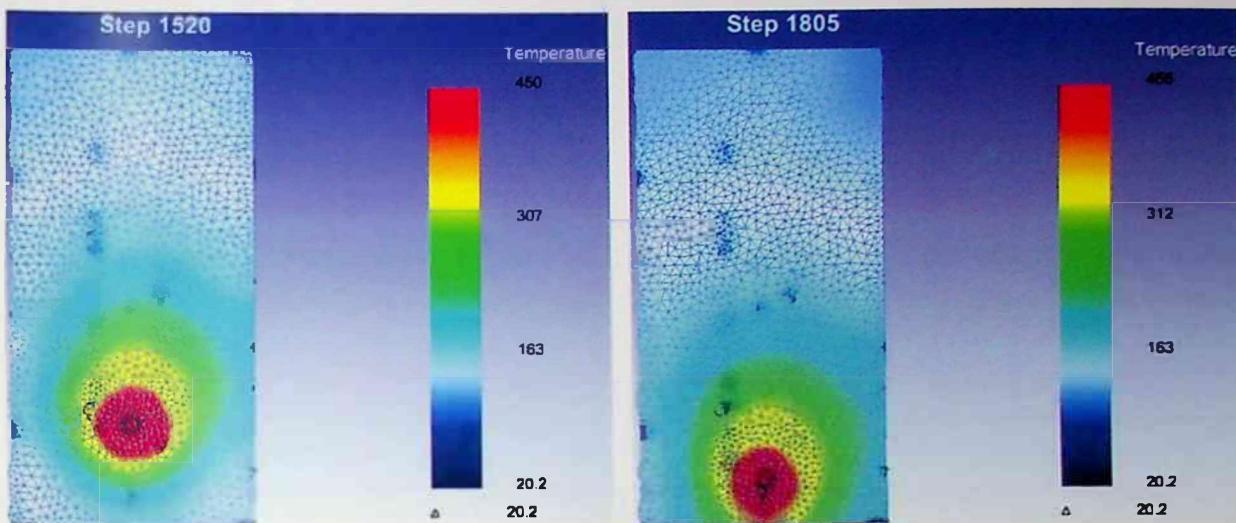


7.28. Prikaz deformisane mreže u 960-om koraku



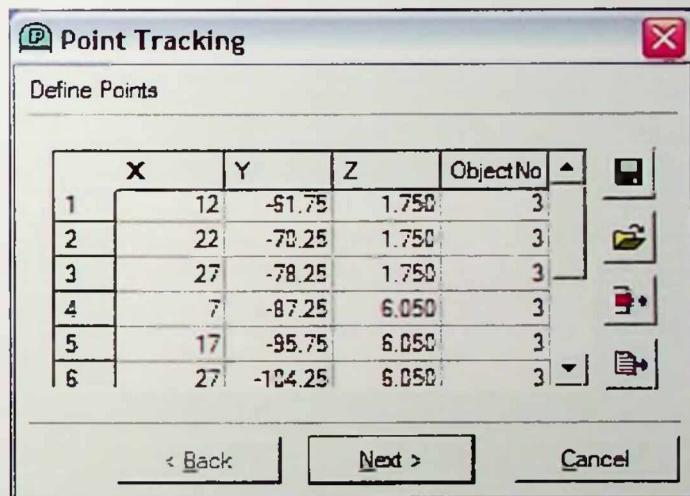
7.29. Prikaz deformisane mreže u 1240-om koraku

Kako je čelo alata upušteno u materijal 0.1 mm, prilikom odvijanja procesa deformisanja materijala dolazi do istiskanja materijala i nagomilavanja na suprotnosmjernoj strani, slično kao kod realnog eksperimenta.



7.30. Prikaz deformisane mreže u 1520-om koraku
7.31. Prikaz deformisane mreže u 1805-om koraku

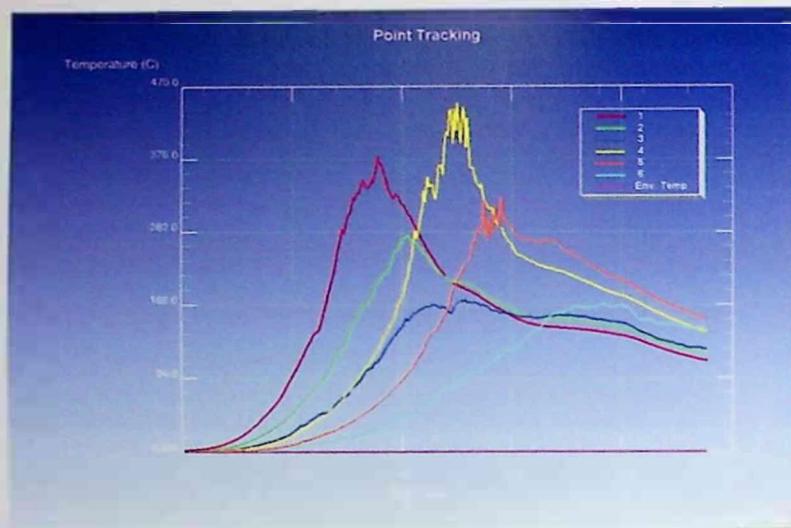
Da bi se mogli uporediti podaci, mjerjenja temperature potrebno je u podmodulu *Point Tracking*, unijeti unaprijed usvojene mjerne (čvorne) tačke iz Poglavlja 6.6.2 kojih ima ukupno 6, a njihove koordinate su date na Slici 7.32.



Slika 7.32. Prikaz podmodula Point Tracking sa definisanim koordinatama čvornih tačaka

Posle unošenja koordinata čvornih tačaka u podmodul *Point Tracking*, dobijamo vrijednosti temperature koja se generisala tokom odvijanja procesa FSW, odnosno numeričke simulacije. Ovako dobijene vrijednosti su prikazane na dijagramu (Slika 7.33) za numeričku simulaciju broj 36. Naredbom *Data Extract* dobijaju se vrijednosti koje se kasnije mogu upoređivati sa eksperimentalno dobijenim podacima. Maksimalne dobijene vrijednosti temperature za sve izvršene numeričke simulacije u šest čvornih tačaka su date u Tabeli 7.13.

7. MODELIRANJE I SIMULACIJA PROCESA FSW



7.33. Dobijeni dijagram temperature za 36. numeričku simulaciju u šest izabranih čvornih tačaka

Tabela 7.13. DEFORM vrijednosti temperature u usvojenim čvornim tačkama

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
1.	305.92	219.31	170.23	371.82	263.51	161.90
2.	393.13	287.97	208.55	450.57	338.26	198.93
3.	331.29	239.75	172.26	399.39	288.19	164.82
4.	370.55	287.53	218.15	425.86	329.10	214.01
5.	323.25	230.26	181.15	387.58	270.81	175.65
6.	358.36	267.78	204.13	417.26	312.46	200.03
7.	371.12	254.11	177.25	441.13	307.24	172.13
8.	389.79	284.01	225.20	448.14	329.97	218.95
9.	386.26	284.03	206.68	448.75	330.03	200.17
10.	401.36	300.52	233.26	457.20	350.05	227.70
11.	376.25	281.12	196.97	438.16	329.66	192.50
12.	402.20	310.26	230.76	467.99	354.15	224.32
13.	361.00	259.13	184.80	415.90	308.78	179.12
14.	381.11	288.46	210.29	444.31	333.19	205.80
15.	377.22	262.63	178.26	441.83	315.25	172.77
16.	405.04	292.29	199.15	478.11	344.37	191.29
17.	249.35	172.51	112.30	308.75	208.70	110.90
18.	322.55	236.98	169.02	379.23	283.34	163.73
19.	325.23	239.56	158.51	384.73	281.16	154.95
20.	313.46	243.85	193.96	358.62	281.47	187.19
21.	262.88	195.30	139.37	310.14	231.50	133.71
22.	322.82	232.53	167.56	374.50	278.61	161.73

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tabela 7.13. DEFORM vrijednosti temperature u usvojenim čvormim tačkama (nastavak)

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
23.	361.36	255.46	175.45	416.26	304.13	172.18
24.	355.29	263.27	200.37	400.86	308.15	194.31
25.	334.26	222.24	144.25	392.79	277.24	138.55
26.	365.25	271.25	194.10	422.85	319.56	185.85
27.	316.67	211.27	143.00	385.85	264.44	137.72
28.	344.24	255.21	190.55	402.26	297.57	184.45
29.	370.95	255.65	161.22	434.47	313.52	153.91
30.	365.21	270.57	190.45	420.34	320.08	183.61
31.	368.70	250.24	154.31	436.93	307.21	148.57
32.	367.56	260.26	179.09	439.13	312.35	172.13
33.	383.25	278.42	193.17	445.10	328.03	187.62
34.	383.25	278.42	193.17	445.10	328.03	187.62
35.	383.25	278.42	193.17	445.10	328.03	187.62
36.	383.25	278.42	193.17	445.10	328.03	187.62



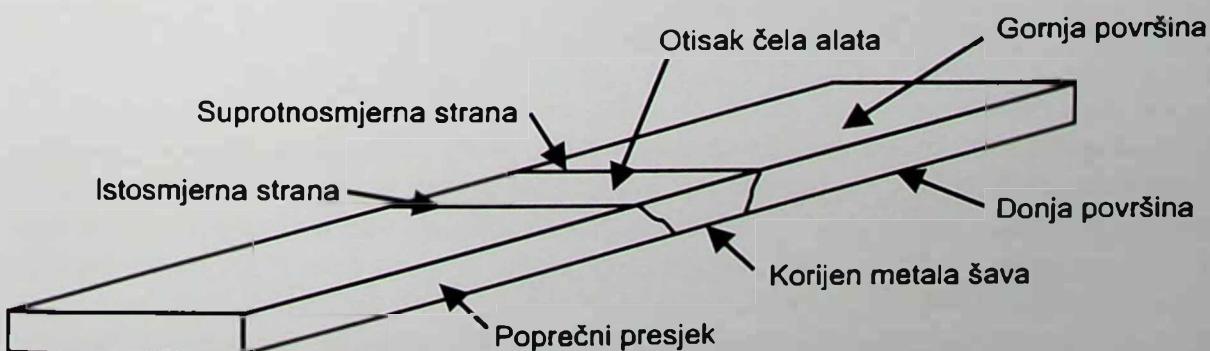
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

U okviru procesa FSW, radi dobijanja relevantnih zaključaka potrebno je uraditi kompletну detaljnu analizu dobijenih rezultata. Prilikom izvođenja eksperimenta, dobijeni su dijagrami sila, koje se javljaju tokom postupka zavarivanja, dijagrami temperature po poprečnom presjeku radnog komada, dijagrami istezanja odnosno vrijednosti zatezne čvrstoće, vrijednosti udarne žilavosti, kao i slike makro i mikrostrukture zavarenog spoja. Pošto je svaki zavareni spoj dokumentovan digitalnom fotografijom moguće je izvršiti i vizuelnu analizu zavarenih radnih komada. Da bi se izvršila kompletna analiza potrebno je i uporediti dobijene rezultate numeričke simulacije procesa FSW, kao i rezultate dobijenih modelskih vrijednosti parametara procesa FSW, sa eksperimentalnim rezultatima.

8.1. VIZUELNA ANALIZA

Kod svih procesa zavarivanja materijala pa i kod procesa zavarivanja postupkom FSW, na prvom mjestu prisutna je vizuelna analiza zavarenog spoja. Iskustveno, vizuelnom analizom, na osnovu samog izgleda šava moguće je utvrditi da li je zavareni spoj dobar ili loš. Ovaj metod vizuelne analize ne spada u naučne metode, ali je ponekad i on dovoljan da bi se utvrdio kvalitet zavarenog spoja.

Na Slici 8.1 prikazana je nomenklatura koja se koristi za identifikaciju različitih površina zavarenih radnih komada. Gornja površina odgovara gornjoj strani zavarenog spoja koju karakteriše otisak čela alata, gdje se razlikuju istosmjerna i suprotnosmjerna strana zavarivanja. Površini sa strane odgovara ravan normalna na ravan zavarivanja (poprečni presjek zavarenih radnih komada). Donjoj površini odgovara prikaz korjena metala šava.



Slika 8.1. Definicija površina zavarenih radnih komada

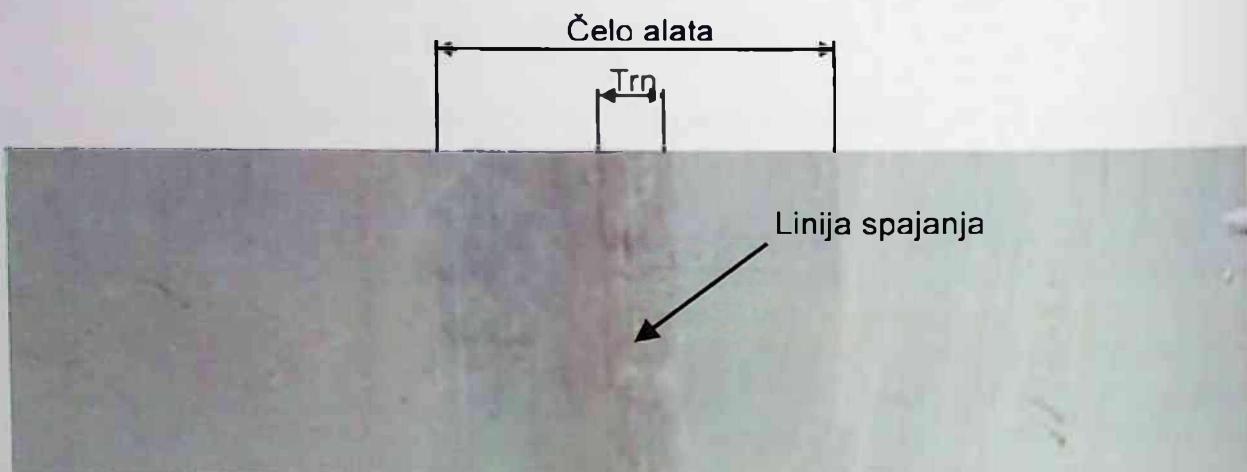
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

U vizuelnoj analizi zavarivanja postupkom FSW otkrivaju se mane i nedostaci koji su vidljivi golim okom na gornjoj i donjoj površini šava, kao što je prikazano na Slici 8.2 gdje je data gornja površina zavarenog spoja za 36. tačku eksperimentalnog plana.



Slika 8.2. Vizuelni pregled FSW spoja, gornje površine zavarenih radnih komada

Na Slici 8.3 prikazan je vizuelni pogled donje površine zavarenog spoja za 36. tačku eksperimentalnog plana, gdje se jasno izdvajaju zone nastale pod uticajem trna čela alata.



Slika 8.3. Vizuelni pregled FSW spoja, donje korjene strane zavarenih radnih komada

Za vizuelnu analizu zavarenog spoja postupkom FSW koriste se slike zavarenih radnih komada iz Priloga 1. Na gomjoj strani zavarenih radnih komada na mjestu kuda je prošao alat nazire se malo ulegnuće, dok se na mjestu suprotnosmjerne strane zavarivanja javlja mali brijeđ, kao posledica rotacije alata i izbacivanja viška materijala u obliku nabora. Nabori koji se javljaju na suprotnosmjernoj strani zavarenog spoja su neizbjegavan pratićac procesa FSW. Veličina nabora može da varira u zavisnosti od toga koliko se čelo alata ukopalo u materijal. Najbolji slučaj je kada čelo alata samo dodiruje površinu zavarivanja i ukopa se u materijal za jednu desetinu milimetra. Veličina nabora može da zavisi i od neravnina površine materijala koji se zavaruje, kao i drugih grešaka koje se javljaju na površini osnovnog materijala. Prilikom izvođenja eksperimenta nabori se javljaju skoro u svakoj tački eksperimentalnog plana.

Kako oblik donje površine zavarenog spoja zavisi od oslone ploče, dobijeni zavareni spoj sa donje strane je gladak i ravan kao što se vidi sa Slike 8.3. Na mjestu

spajanja radnih komada uočava se linija spajanja odnosno rascjep koji se dodirom ruke ne može osjetiti. Tako vizuelnom analizom donje strane zavarenog spoja možemo konstatovati da je dobijen dobar izgled korjena metala šava, gdje je u svakoj tački eksperimentalnog plana dobijena ravna i glatka površina.

Na gornjoj strani zavarenog spoja primjećuju se otisci od alata, čija veličina zavisi od prečnika čela alata, a izgled od ugaone brzine okretanja alata i brzine zavarivanja. Ako je brzina okretanja alata veća a brzina zavarivanja manja onda su otisci manji, a ako je brzina okretanja alata manja a brzina zavarivanja veća onda se otisci od alata jasno vide kao paralelni rubovi u obliku polukružnice. Tako za tačke eksperimentalnog plana broj 2, 6, 10, 14, 18, 22 i 26. imamo najmanje vidljive otiske alata. Za te slučajeve je ugaona brzina okretanja alata 1000 o/min i brzini zavarivanja 80 mm/min.

Vizuelnom analizom sa slika iz Priloga 1 dobijenog oblika šava sa gornje strane zavarenog spoja može se konstatovati da je u tačkama eksperimentalnog plana broj 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 i 36. dobijen dobar izgled šava. U tački 2 eksperimentalnog plana sa Slike P.1.3 vidi se pojava „tunel“ efekta u manjoj mjeri. Ova pojava se javlja zbog prevelikog zagrijevanja materijala jer je brzina zavarivanja 80 mm/min, a velika vrijednost prečnika čela alata 28 mm, trna alata 7 mm i ugla nagiba trna alata 5 °. U tački 6 eksperimentalnog plana sa Slike P.1.11 vidi se pojava „tunel“ efekta takođe zbog velike brzine okretanja alata 1000 o /min i male brzine zavarivanja 80 mm/mm gdje je prečnik čela alata 28 mm, trna alata 7 mm i ugla nagiba trna alata 3 °. Sa Slike P.1.33 vidi se da tačka eksperimentalnog plana broj 17 ima najlošiji oblik šava, jer je pojava tunel efekta najviše zastupljena. Veličina prečnika čela alata je 25 mm, trna alat 7 mm, a ugla nagiba trna alata 5 °. Velika ugaona brzina okretanja alata od 1000 o/min, zbog malog prečnika čela alata i velikog prečnika trna alata ne može da zagrije dovoljno materijal pa dobijamo šav slabog kvaliteta. Sa Slike P.1.35 konstatuje se takođe pojava „tunel“ efekta u manoj mjeri nego u tački 17 eksperimentalnog plana, zbog manje brzine zavarivanja od 80 mm/min, tako da se materijal malo više zagrijao nego u tački 17 eksperimentalnog plana, pa je „tunel“ efekat manji. Takođe sa Slike P.1.43 se vidi pojava „tunel“ efekta u tački 22 eksperimentalnog plana. Varirani parametri eksperimentalnog plana su isti kao u tački broj 18, ali je samo ugao nagiba trna alata različit i iznosi 3 °.

Dakle, vizuelnom analizom možemo konstatovati da su u tačkama broj 2, 6, 17, 18 i 22 eksperimentalnog plana dobijeni loši oblici šava, koji su uslovljeni lošim odnosima geometrijskih parametara alata i režima zavarivanja (kinematskih parametara).

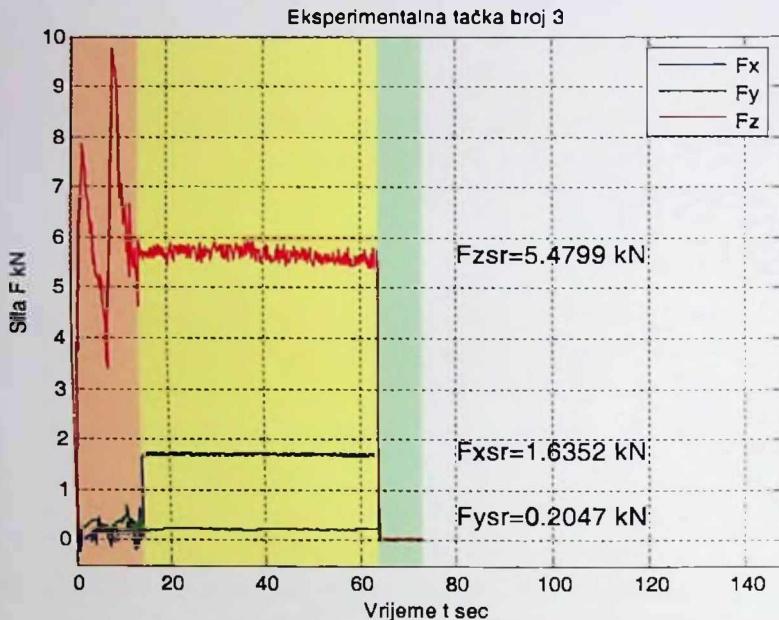
8.2. ANALIZA SILA ZAVARIVANJA

8.2.1. ANALIZA SILA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIM PUTEM

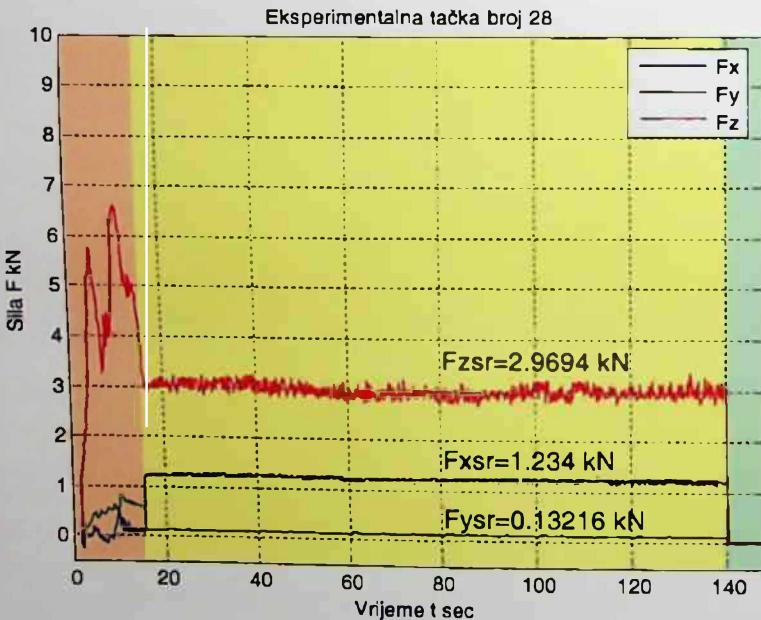
Prilikom izvođenja procesa FSW, izvršeno je mjerjenje sila koje se javljaju tokom zavarivanja. To su tri normalne komponente: vertikalna sila F_z , uzdužna sila F_x i bočna sila F_y . Kao što je već objašnjeno u Poglavlju 6.6.1, odvijanje procesa FSW, u odnosu na kretanje alata je podijeno na tri etape, pa će se i analiza sprovesti na taj način.

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

Na Slici 8.4 i Slici 8.5 prikazani su dobijeni dijagrami sila F_z , F_x i F_y za eksperimentalnu tačku broj 3 i 28, a na Slici 8.6 za centralnu tačku eksperimentalnog plana 33.



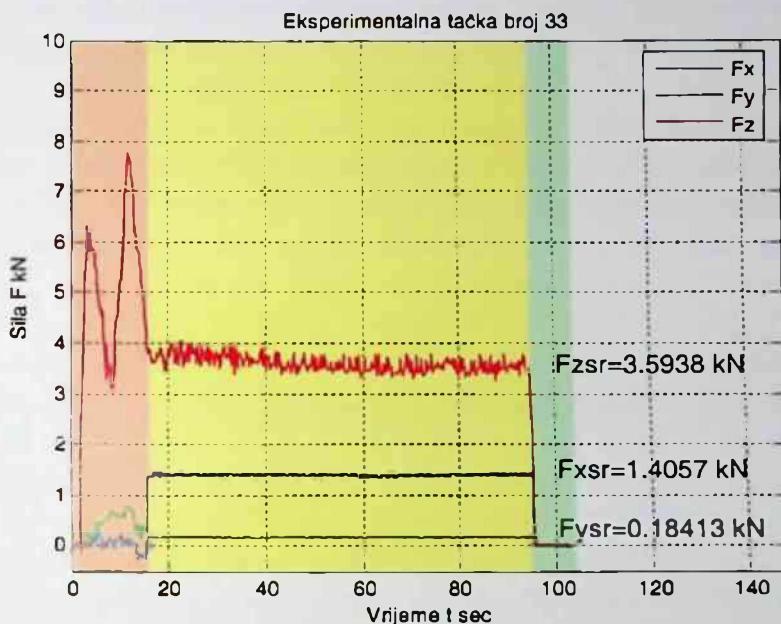
Slika 8.4. Dijagram dobijenih sila za eksperimentalnu tačku broj 3



Slika 8.5. Dijagram dobijenih sila za eksperimentalnu tačku broj 28

Sa slike se vidi da vrijeme trajanja procesa zavisi od brzine zavarivanja. Za brzinu od 200 mm/s, kao što je prikazano na Slici 8.4, vrijeme trajanja zavarivanja materijala je 49.8 s, a ukupno vrijeme trajanja procesa FSW, sa ukopavanjem alata, zavarivanjem i vađenjem alata iznosi 73.2 s. Za brzinu od 80 mm/s, kao što je prikazano na Slici 8.5,

vrijeme trajanja zavarivanja je 124.5 s, a ukupno vrijeme trajanja procesa FSW iznosi 147.9 s.



Slika 8.6. Dijagram dobijenih sila za centralnu tačku plana broj 33

Za centralne tačke eksperimentalnog plana i brzinu 125 mm/s, kao što je prikazano na Slici 8.6, vrijeme trajanja zavarivanja je 79.68 s, a ukupno vrijeme trajanja procesa FSW iznosi 103.08 s. Vrijeme trajanja procesa je vrlo bitno sa stanovišta generisanja toplotne. Što proces duže traje, materijal je više izložen uticaju toplotne. Ovo je pozitivno sa stanovišta kvaliteta šava, ali nije pozitivno sa stanovišta produktivnosti.

Za sve tačke eksperimentalnog plana u prvoj etapi procesa, sile F_z i F_y dostižu svoje najveće vrijednosti. Pošto se u ovoj etapi alat ukopava u materijal, dobijaju se promjenjive vrijednosti sile. Kako je F_z aksijalna sila koja pritiska materijal, ona ima uvijek pozitivne vrijednosti. Zbog posledice stvaranja toplotne prilikom ukopavanja alata u materijal sila F_x može imati i negativne vrijednosti koje se kreću u granicama od -0.12 kN do -0.48 kN za sve tačke eksperimentalnog plana. Kako smjer okretanja alata odgovara pozitivnom smjeru okretanja kazaljki na časovniku vrijednosti sile F_y se dobijaju pozitivne, jer prilikom rotacije, alat pokušava da okreće radne komade u istom smjeru. U ovoj etapi maksimalne vrijednosti sile F_z za sve tačke eksperimentalnog plana kreću se u granicama od 5.3620 kN do 9.7300 kN, dok su vrijednosti sile F_y u granicama od 0.3877 kN do 1.1375 kN. Najveća izmjerena vrijednost sile F_z u procesu FSW je u tački eksperimentalnog plana broj 3. Ovo je posledica velike vrijednosti prečnika trna i čela alata, kao i ugla nagiba trna, a male ugaone brzine, tako da se nije stvorila potrebna toplotna, dok se relativno veliki alat ukopava u materijal. Ova etapa u procesu FSW nije toliko značajna za sam proces, iako se u njoj dobijaju najveće vrijednosti vertikalne sile F_z .

Kada se na glodalici zada uzdužno kretanje radnog stola odnosno izabrana brzina zavarivanja, počinje druga etapa i sile F_x , F_y i F_z zadržavaju konstantne vrijednosti, sve do trenutka kada alat izđe iz radnog komada. Za proces zavarivanja postupkom FSW,

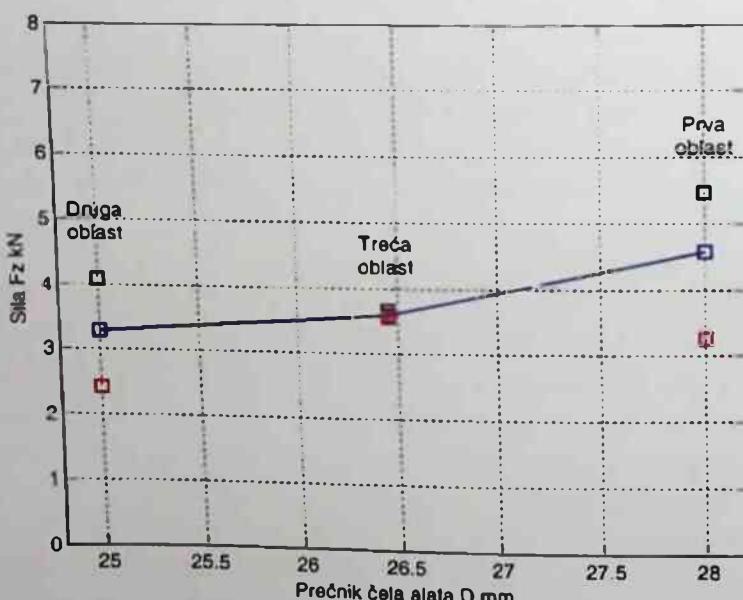
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

sa stanovišta utroška energije najznačajnija je vertikalna komponenta sile F_z , koja se, kao što smo rekli, često naziva i sila zavarivanja. Za svaku tačku eksperimentalnog plana komponenta F_z u odnosu na ostale dvije komponente sile F_x i F_y , ima veću vrijednost. Sila F_z se kreće u granicama od 2.4099 kN do 5.4799 kN, a sila F_x od 1.0118 kN do 1.7561 kN, dok je sila F_y od 0.0987 kN do 0.2316 kN. Odavde možemo zaključiti da sila F_z ima vrijednosti reda veličine nekoliko puta veće od ostalih komponenti. Prilikom odvijanja procesa FSW sila F_y , koja djeluje u bočnom pravcu ima u odnosu na druge sile male vrijednosti, pa je njen uticaj na proces zavarivanja relativno mali.

Na vrijednosti sile F_x najveći uticaj ima brzina zavarivanja. Što je brzina zavarivanja veća, veći je i otpor materijala na alat, pa se dobijaju i veće vrijednosti uzdužne sile F_x . Drugi po značajnosti faktor koji utiče na vrijednost sile F_x je ugaona brzina okretanja alata, a treći površina alata koja je u kontaktu sa materijalom. Ako je ugaona brzina veća i površina alata veća, generiše se više toplote, pa se alat lakše kreće kroz materijal, tako da je otpor manji i dobija se manja vrijednost sile F_x . Ako je ugaona brzina manja, a površina alata ista generisće se manje toplote, pa će i otpor kretanju alata biti veći, a samim tim i uzdužna sila F_x veća.

Kada su u pitanju dobijene vrijednosti sile F_z , može se zaključiti da na njenu veličinu najveći uticaj imaju geometrijski parametri alata, posebno veličina čela alata. Sve dobijene vrijednosti sile F_z se mogu podijeliti na tri oblasti. Prvih 16 tačaka eksperimentalnog plana pripada prvoj oblasti. To je oblast gdje je vrijednost prečnika čela alata 28 mm. Ovdje su dobijene vrijednosti sile F_z u granicama od 3.4614 kN do 5.4799 kN. Drugoj oblasti pripadaju tačke eksperimentalnog plana od 17 do 32, gdje je prečnik čela alata 25 mm, a sila se kreće u granicama od 2.4099 kN do 4.0428 kN. Trećoj oblasti pripadaju centralne tačke plana, gdje je vrijednost prečnika čela alata 26.46 mm, a srednja vrijednost sile F_z u ovim tačkama 3.6008 kN. Na Slici 8.7 dat je prikaz vrijednosti sile F_z u funkciji prečnika čela alata za pomenute tri oblasti.

U trećoj etapi sve komponente sile imaju vrijednosti 0.

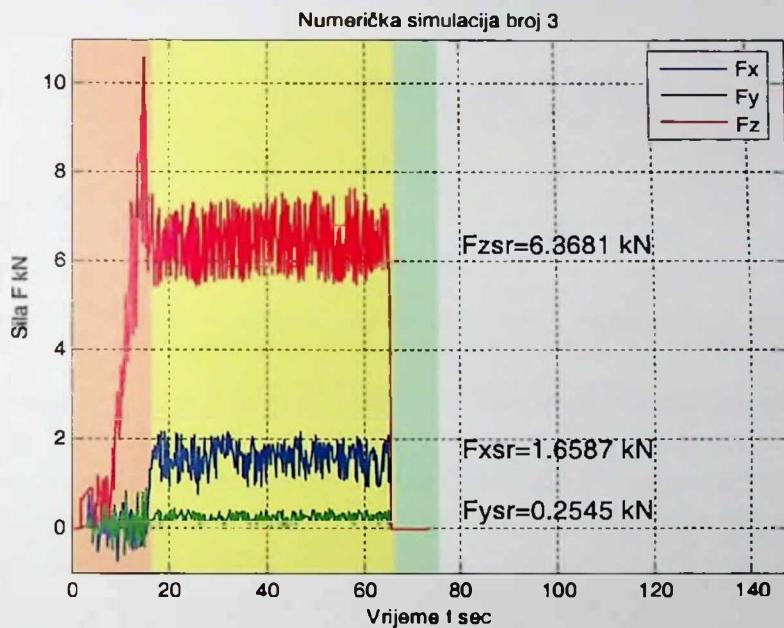


Slika 8.7. Vrijednosti vertikalne sile F_z u funkciji prečnika čela alata

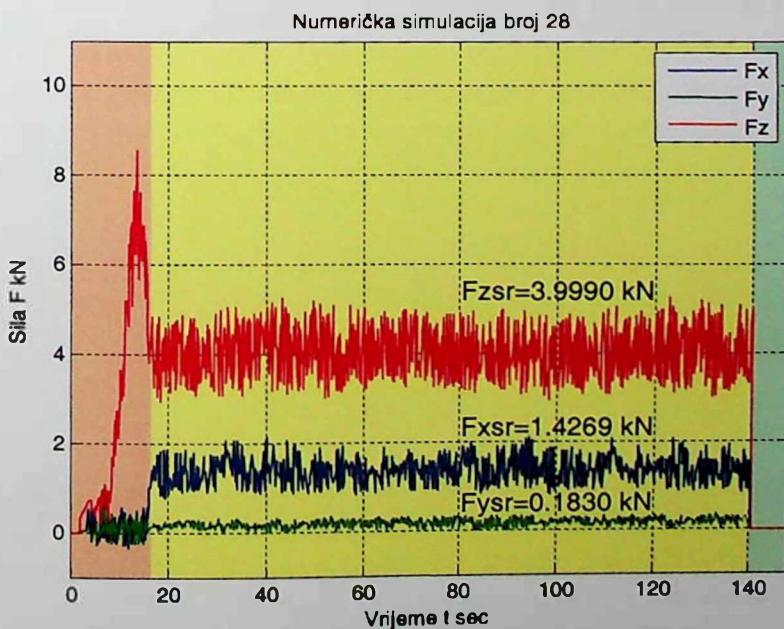
8.2.2. ANALIZA SILA DOBIJENIH NUMERIČKOM SIMULACIJOM

Za iste uslove eksperimentalnih istraživanja, urađena je i numerička simulacija u Poglavlju 7.3 gdje su dobijeni i prezentirani rezultati parametara koji karakterišu proces FSW. Kako je šema kretanja alata analogna kao kod eksperimentalnih istraživanja, analiza će se takođe izvršiti po etapama kretanja alata u procesu FSW.

Na Slici 8.8 i Slici 8.9 prikazani su dobijeni dijagrami sila F_z , F_x i F_y numeričke simulacije broj 3 i 28, a na Slici 8.10 dijagrami sila numeričke simulacije za centralne tačke plana 33, 34, 35 i 36.

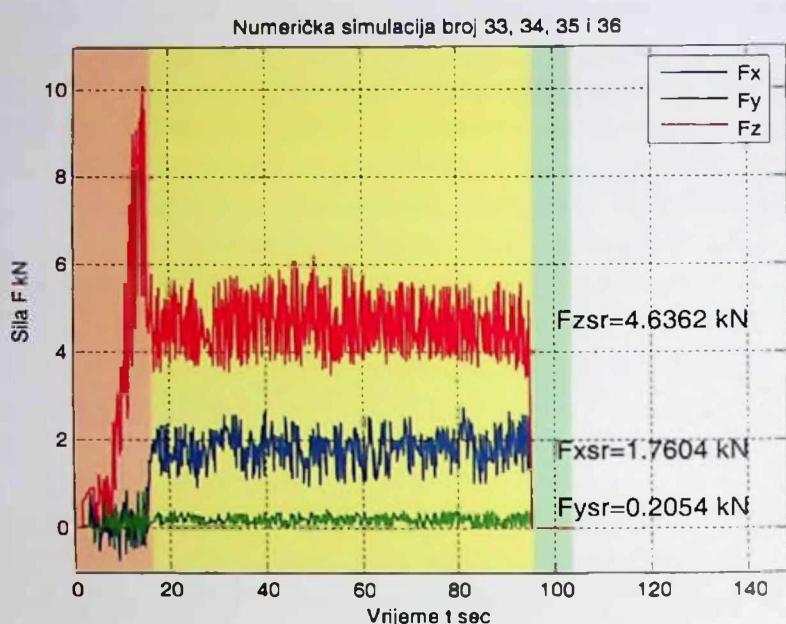


Slika 8.8. Dijagram sila dobijen numeričkom simulacijom broj 3



Slika 8.9. Dijagram sila dobijen numeričkom simulacijom broj 28

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.10. Dijagram sila dobijen numeričkom simulacijom u centralnim tačkama plana

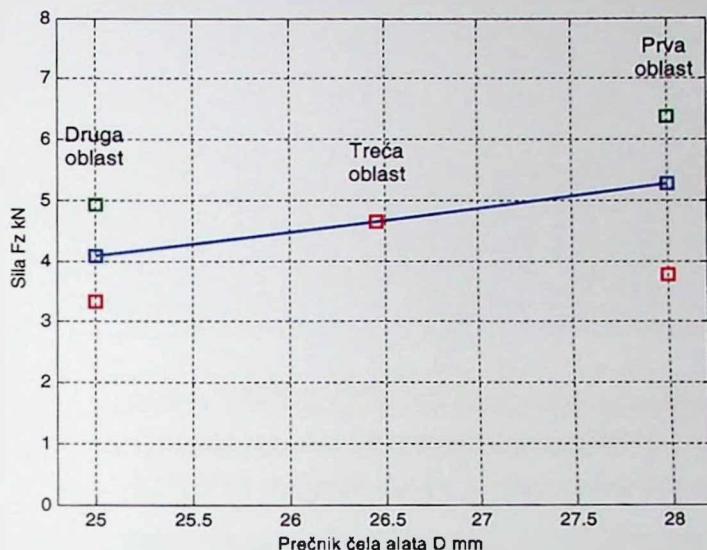
Vrijeme trajanja izvršenih numeričkih simulacija je analogno eksperimentalnom.

Za sve numeričke simulacije u prvoj etapi procesa, sile F_z i F_y dostižu svoje najveće vrijednosti. Analogno eksperimentalnim vrijednostima u ovoj etapi se dobiju promjenjive vrijednosti sile. Kod numeričkih simulacija, sila F_z ima uvijek pozitivne vrijednosti, dok sile F_x i F_y u ovoj etapi ukopavanja alata u materijal imaju i negativne vrijednosti. Sile F_x i F_y u ovoj etapi imaju približne vrijednosti, koje se kreću u granicama $\pm 1.2 \text{ kN}$. U ovoj etapi maksimalne vrijednosti sile F_z za sve numeričke simulacije kreću se u granicama od 7.1982 kN do 11.5214 kN . Najveća vrijednost sile F_z dobijena numeričkim simulacijama u procesu FSW je u simulaciji broj 3.

U drugoj etapi numeričkih simulacija kada je oslona ploča primarni kalup koji se kreće, sile F_x , F_y i F_z , takođe zadržavaju konstantne vrijednosti, sve do trenutka dok se ne završi simulacija posle 166 mm hoda oslone ploče. U svakoj numeričkoj simulaciji komponenta F_z ima veće vrijednosti od komponenti F_x i F_y . Sila F_z u ovoj etapi, za sve numeričke simulacije se kreće u granicama od 3.3429 kN do 6.3681 kN , a sila F_x od 1.2968 kN do 2.2801 kN , dok je sila F_y od 0.1420 kN do 0.3103 kN . Odavde možemo zaključiti da sila F_z ima vrijednosti reda veličine nekoliko puta veće od ostalih komponenti, slično eksperimentalnim rezultatima. Kod numeričkih simulacija procesa FSW sila F_y , koja djeluje u bočnom pravcu ima takođe, relativno male vrijednosti, pa je njen uticaj na proces zavarivanja trenjem mali.

Kod numeričkih simulacija na vrijednosti sile F_x najveći uticaj ima brzina zavarivanja, a na vrijednosti sile F_z , geometrijski parametri alata, posebno veličina čela alata. Kod numeričkih simulacija, takođe se sve dobijene vrijednosti sile F_z mogu podijeliti na tri oblasti. Oblast većeg prečnika čela alata od 28 mm , oblast manjeg prečnika čela alata od 25 mm i oblast od 26.46 mm (centralna tačka plana). U prvoj oblasti vrijednosti sile F_z su u granicama od 3.7789 kN do 6.3681 kN , u drugoj od 3.3429 kN do 4.5703 kN , a u trećoj 4.6362 kN , pošto su vrijednosti u centralnoj tački kod

numeričkih simulacija iste. Na Slici 8.11 dat je prikaz vrijednosti sile F_z u funkciji prečnika čela alata za sve izvršene numeričke simulacije pomenutih oblasti.

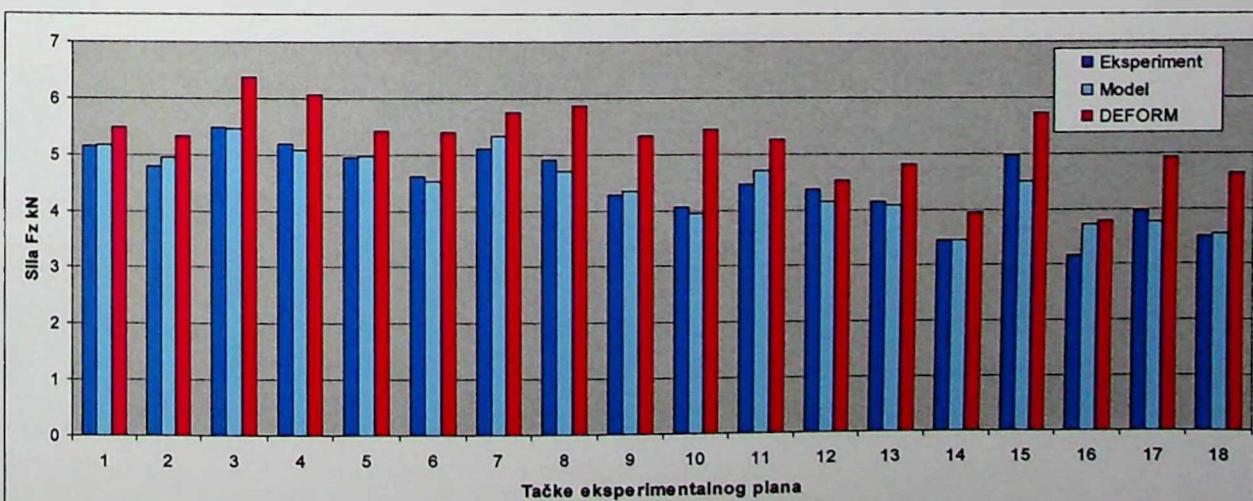


Slika 8.11. Vrijednosti vertikalne sile F_z u funkciji prečnika čela alata za izvršene numeričke simulacije

8.2.3. POREĐENJE SILA

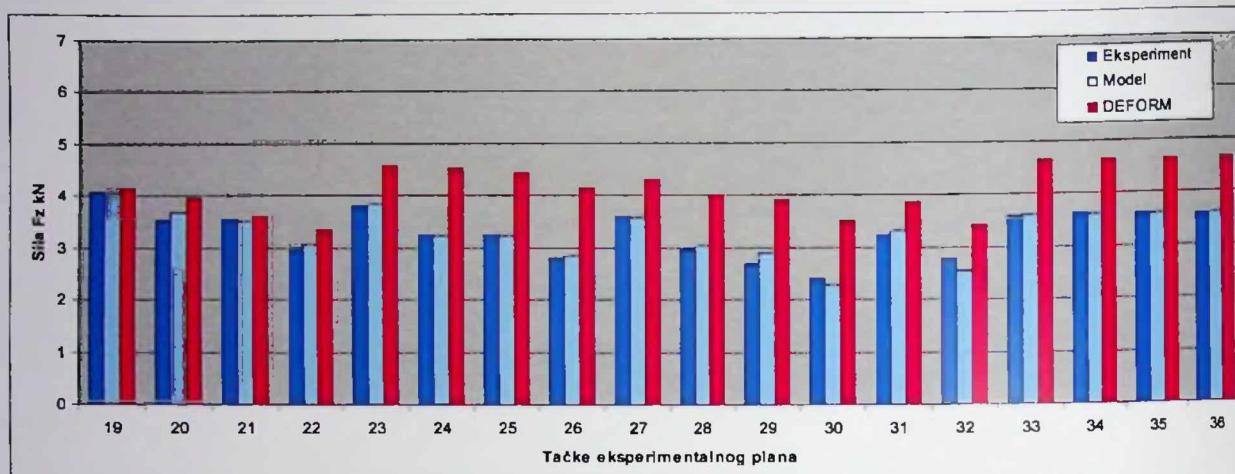
Dijagrami sila koji su dobijeni u funkciji vremena dobri su za vizuelno sagledavanje karaktera promjene, ali nijesu pogodni za kvantitativnu analizu rezultata. U tu svrhu urađeni su grafikoni za sve tri komponente sila u svim tačkama eksperimentalnog plana, kako bi mogli jasnije sagledati odstupanja sila koja su dobijena: eksperimentalnim putem, modeliranjem i numeričkom DEFORM simulacijom.

Na Slici 8.12 dat je grafički prikaz odstupanja dobijenih vrijednosti sile F_z za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, a na Slici 8.13 od 19 do 36.



Slika 8.12. Grafikon - vertikalne sile F_z za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



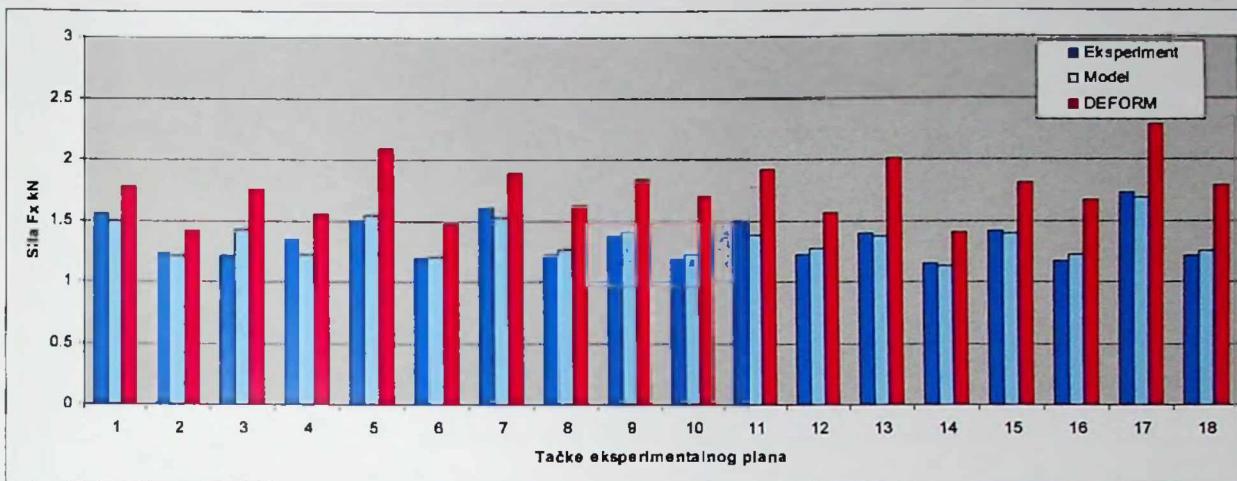
Slika 8.13. Grafikon - vertikalne sile F_z za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom

Analizom prikazanih grafikona (Slika 8.12 i Slika 8.13), zaključuje se da su mala odstupanja vrijednosti sile F_z dobijene eksperimentalno i modeliranjem. Ovo odstupanje je najviše u 16. tački eksperimentalnog plana i ono iznosi 16 %, dok u ostalim tačkama eksperimentalnog plana ne prelazi 10 %. Najmanje odstupanje je u 35. tački eksperimentalnog plana i iznosi 0.1 %. Može se zaključiti da je kod vertikalne sile F_z proces uspješno modeliran kvadratnom funkcijom odziva. Evidentno je veće odstupanje vrijednosti koje su dobijene numeričkom simulacijom odnosno DEFORM simulacijom. Vrijednosti koje su dobijene su reda veličine do 1.47 puta veće. Ovo se može objasniti brojem konačnih elemenata, koji je korišćen pri numeričkoj simulaciji. S obzirom da je proces dosta složen, alat se okreće velikom brzinom, a istraživani radni komadi su relativno velikih dimenzija 200 mm x 50 mm. Kada je generisana mreža od 40000 elemenata, zbog velike dimenzije radnog komada, dobili smo dosta grubu mrežu, koja je uslovila relativno visoke vrijednosti sile F_z . Sa usitnjavanjem mreže dobijaju se precizniji rezultati. Trenutno je ovaj faktor uslovljen razvojem računarske tehnike, prvenstveno nove generacije procesora.

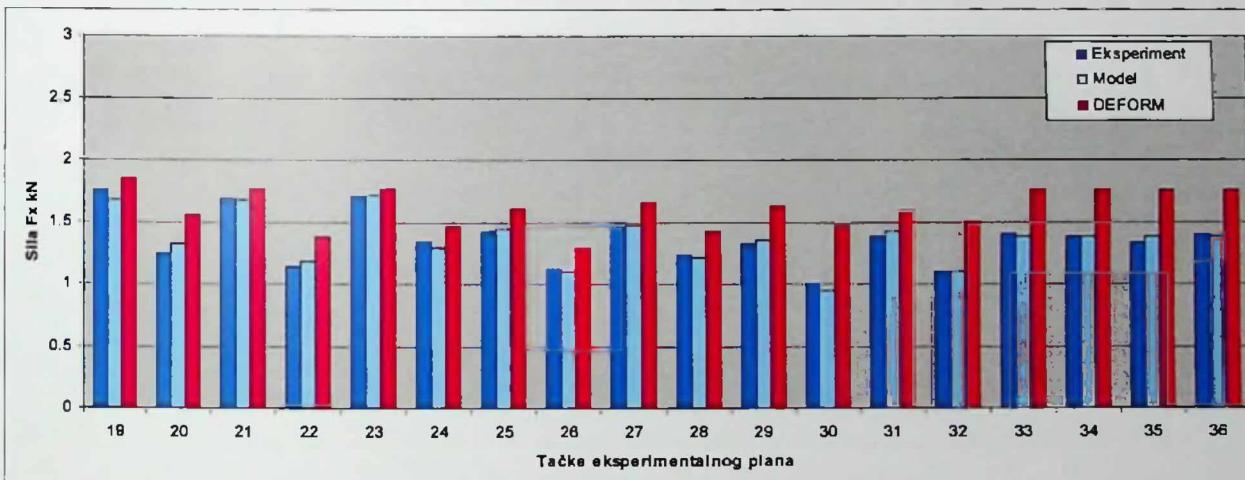
Kao što je ranije istaknuto na silu F_z najviše uticaja ima vrijednost prečnika alata, pa i ovdje se razlikuju tri zone odstupanja vrijednosti sile F_z . Najveći relativni odnos između sile F_z dobijene numeričkom simulacijom i sile F_z dobijene eksperimentalnim putem je u 26. tački eksperimentalnog plana i iznosi 1.4740, dok je najmanji u 19. tački i iznosi 1.019. Prosječno odstupanje iznosi 21 %.

Za poređenje vrijednosti komponente sile F_x , takođe je urađen grafikon odstupanja za sve tačke eksperimentalnog plana. Na Slici 8.14. dat je grafički prikaz odstupanja dobijenih vrijednosti sile F_x za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, a na Slici 8.15 od 19 do 36.

Sa Slike 8.14 i 8.15 može sa vidjeti da vrijednosti sile dobijene eksperimentalnim putem ne odstupaju mnogo od vrijednosti dobijenih modeliranjem. Ovo odstupanje je najviše u 3. tački eksperimentalnog plana i iznosi 15 %, a najmanje u 34. tački plana i iznosi 0.4 %. Možemo konstatovati da je uzdužna sila F_x uspješno modelirana i da dobro opisuje proces FSW.



Slika 8.14. Grafikon - uzdužne sile F_x za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom

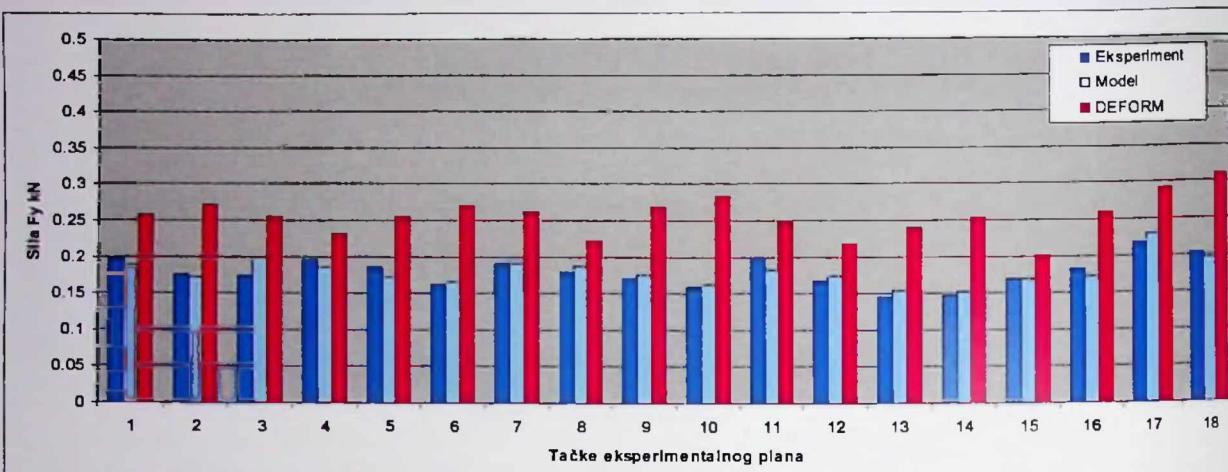


Slika 8.15. Grafikon - uzdužne sile F_x za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom

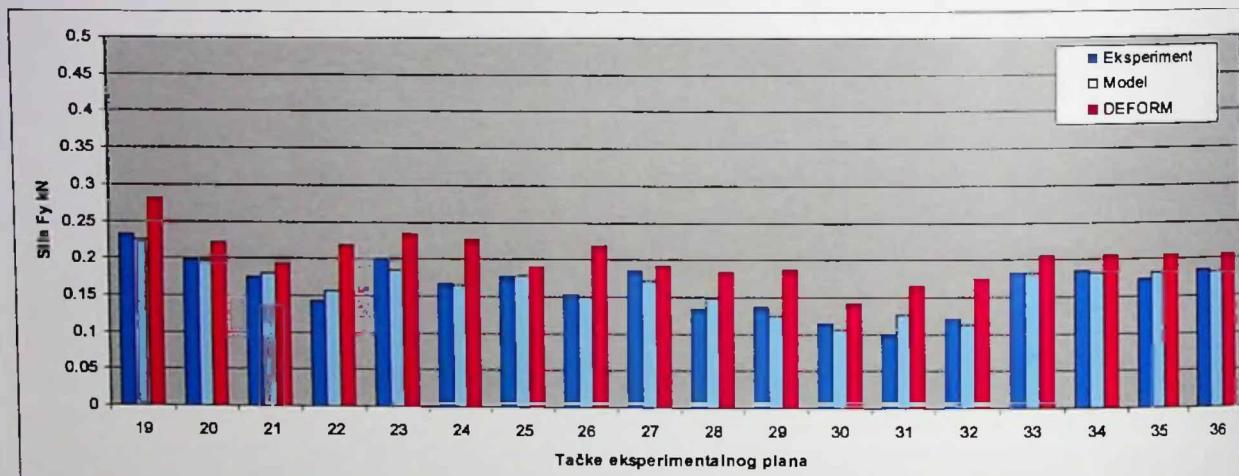
Kod vrijednosti koje su dobijene numeričkom simulacijom takođe je evidentno odstupanja vrijednosti sile F_x od eksperimentalnih vrijednosti. Sila F_x koja je dobijena za sve numeričke simulacije ima veće vrijednosti od sila dobijenih eksperimentalnim putem, kao i modeliranjem. Najveći relativni odnos između sile F_x dobijene numeričkom simulacijom i sile F_x dobijene eksperimentalno je u 18. tački eksperimentalnog plana i iznosi 1.4777, dok je najmanji u 23. tački i iznosi 1.037. Prosječno odstupanje iznosi 24 %. Karakteristično je dakle da se u ovoj 23. tački, vrijednosti dobijene numerički, eksperimentalno i modeliranjem skoro poklapaju. U tačkama 1, 2, 4, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28 i 31, dobijene su vrijednosti sa manjim odstupanjima numeričkih i eksperimentalnih rezultata u odnosu na ostale tačke. Ovo odstupanje ne prelazi 15 %.

Za poređenje vrijednosti komponente sile F_y , takođe je urađen grafikon odstupanja za sve tačke eksperimentalnog plana. Na Slici 8.16 dat je grafički prikaz odstupanja dobijenih vrijednosti sile F_y za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, a na Slici 8.17 od 19 do 36.

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.16. Grafikon - bočne sile F_y za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom



Slika 8.17. Grafikon - bočne sile F_y za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom

Sa prikazanog grafikona (Slika 8.16 i Slika 8.17), može se vidjeti da se vrijednosti sile F_y dobijene eksperimentalnim putem dobro poklapaju sa vrijednostima dobijenim modeliranjem, pa zaključujemo da je bočna sila F_y uspješno modelirana i da dobro opisuje proces FSW. Najveće odstupanje je 22 % u 31. tački eksperimentalnog plana dok je u ostalim tačkama ± 0.12 . Najmanje odstupanje je u 24. tački i iznosi 0.3 %. Kod vrijednosti koje su dobijene numeričkom simulacijom i kod sile F_y je uočljivo relativno veliko odstupanje od eksperimentalno dobijenih vrijednosti. Najveći relativni odnos između sile F_y dobijene numeričkom simulacijom i sile F_y dobijene eksperimentalno je u 10. tački eksperimentalnog plana i iznosi 1.7946, dok je najmanji u 27. tački i iznosi 1.0381. Prosječno odstupanje sile F_y iznosi 34 %.

U Tabeli 8.1 dati su dobijeni relativni odnosi eksperimentalnih i modelskih vrijednosti datih sila, kao i dobijeni relativni odnosi numeričkih i eksperimentalnih vrijednosti datih sila.

Tabela 8.1. Dobijeni relativni odnosi sila zavarivanja

Tač. eks. plana	F_x		F_y		F_z	
	$\frac{F_{x_{eks}}}{F_{x_{mod}}}$	$\frac{F_{x_{num}}}{F_{x_{eks}}}$	$\frac{F_{y_{eks}}}{F_{y_{mod}}}$	$\frac{F_{y_{num}}}{F_{y_{eks}}}$	$\frac{F_{z_{eks}}}{F_{z_{mod}}}$	$\frac{F_{z_{num}}}{F_{z_{eks}}}$
1.	1.0421	1.1408	1.0408	1.3079	0.9961	1.0650
2.	1.0170	1.1457	1.0238	1.5472	0.9686	1.1133
3.	0.8507	1.4575	0.8764	1.4575	1.0041	1.1621
4.	1.1140	1.1380	1.0558	1.1794	1.0242	1.1661
5.	0.9759	1.3899	1.0714	1.3726	0.9942	1.0940
6.	0.9891	1.2389	0.9843	1.6600	1.0197	1.1699
7.	1.0505	1.1738	1.0036	1.3643	0.9597	1.1270
8.	0.9709	1.3222	0.9570	1.2400	1.0388	1.1967
9.	0.9727	1.3441	0.9709	1.5802	0.9847	1.2484
10.	0.9697	1.4379	0.9749	1.7946	1.0283	1.3399
11.	1.0824	1.2839	1.0979	1.2458	0.9499	1.1777
12.	0.9620	1.2829	0.9640	1.3092	1.0529	1.0326
13.	1.0120	1.4444	0.9424	1.6550	1.0177	1.1602
14.	1.0223	1.2207	0.9760	1.7118	0.9989	1.1407
15.	1.0134	1.2742	0.9998	1.1926	1.1043	1.1518
16.	0.9586	1.4150	1.0589	1.4270	0.8476	1.1947
17.	1.0208	1.3209	0.9474	1.3359	1.0512	1.2430
18.	0.9675	1.4777	1.0437	1.5152	0.9819	1.3270
19.	1.0446	1.0498	1.0228	1.2134	1.0092	1.0190
20.	0.9402	1.2551	1.0039	1.1204	0.9629	1.1245
21.	1.0052	1.0454	0.9760	1.1015	1.0127	1.0213
22.	0.9690	1.2089	0.9117	1.5417	0.9807	1.1125
23.	0.9952	1.0370	1.0820	1.1712	0.9910	1.2009
24.	1.0352	1.0889	1.0035	1.3717	1.0059	1.3887
25.	0.9856	1.1299	0.9877	1.0826	1.0099	1.3565
26.	1.0163	1.1565	1.0203	1.4296	0.9890	1.4740
27.	0.9904	1.1325	1.0772	1.0381	1.0104	1.1945
28.	1.0219	1.1563	0.8887	1.3845	0.9775	1.3467
29.	0.9800	1.2298	1.1003	1.3610	0.9218	1.4612
30.	1.0665	1.4616	1.0788	1.2466	1.0487	1.4547
31.	0.9659	1.1557	0.7826	1.6656	0.9751	1.1946
32.	1.0025	1.3604	1.0802	1.4430	1.0894	1.2284
33.	1.0177	1.2523	1.0122	1.1157	0.9980	1.2901
34.	1.0048	1.2685	1.0183	1.1091	1.0052	1.2809
35.	0.9662	1.3190	0.9517	1.1866	1.0011	1.2861
36.	1.0112	1.2604	1.0177	1.1097	0.9955	1.2933

8.3. ANALIZA TEMPERATURE

8.3.1. ANALIZA TEMPERATURE DOBIJENE EKSPERIMENTALNIM PUTEM

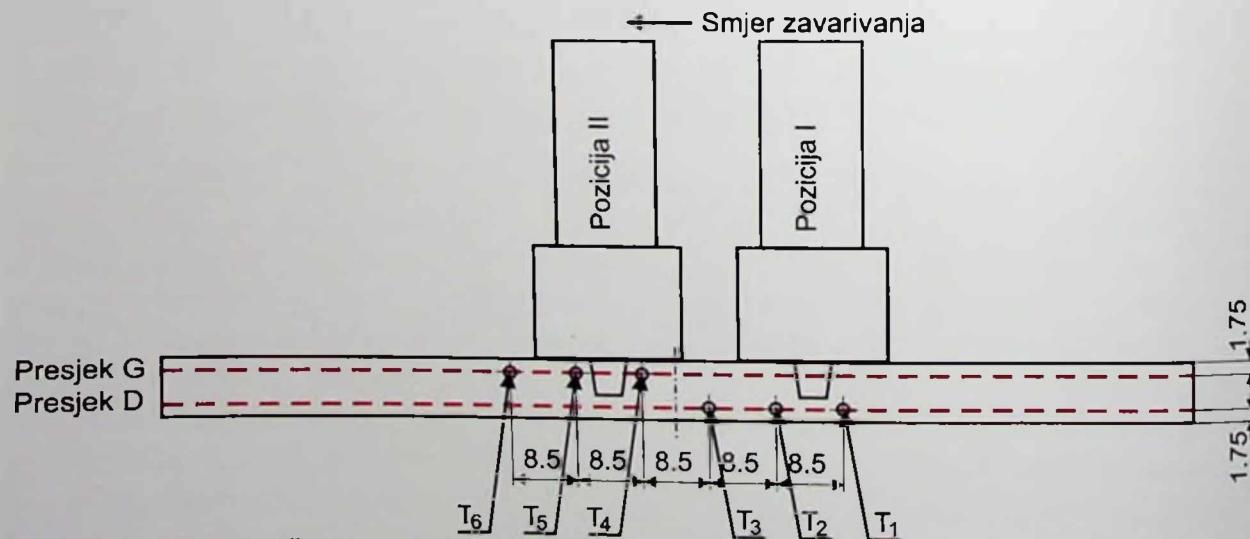
Da bi na najbolji način mogli izvršiti analizu temperature, potrebno je prvo izvršiti analizu smjera kretanja alata u odnosu na generisanje toplote. Kao što je već kazano, proces FSW u zavisnosti od smjera kretanja alata je podijeljen na tri etape.

U prvoj etapi prodiranja trna alata u materijal, usled dejstva sile trenja, nastalih od kontakta alata i materijala počinje da se generiše toplota. Na samom početku ove etape, trn alata deformiše materijal u hladnom stanju i istiskuje ga na gornju stranu zavarivanog materijala. Materijal postepeno počinje da se zagrijava, tako da alat lakše prodire u materijal, a to je i dokazano opadanjem vertikalne sile kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju. Ovaj period treba da zadovolji uslov unošenja određene količine toplote, da bi sledeći period mogao da počne. Završava se kada čelo alata ostvari kontakt sa površinama zavarivanih radnih komada.

U drugoj etapi vrši se proces spajanja materijala. Početak ove etape karakteriše već zagrijan materijal do određene temperature. Proces FSW se odvija zavarivanjem definisanim brzinom i generisanjem toplote. Kao što je poznato ovaj period je glavni period zavarivanja.

Treću etapu karakteriše izvlačenje alata iz zavarivanog materijala, tako da u ovoj etapi ne dolazi do generisanja toplote, jer nema kontakta alata i materijala, pa se neće ni analizirati.

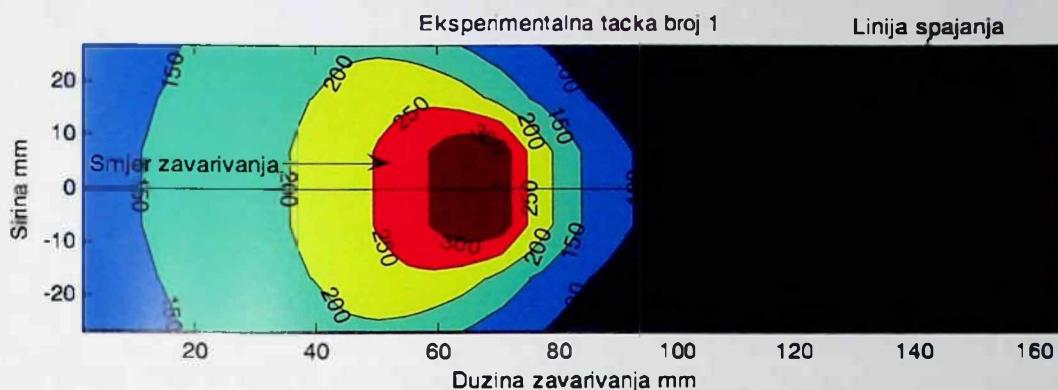
Mjerenje temperature u eksperimentalnim istraživanjima izvršeno je u šest tačaka ploče radnog komada korišćenjem termo-parova, kao što je prikazano na Slici 6.19 iz Poglavlja 6.6.2. Mjerne tačke su pozicionirane u dva presjeka, koji su udaljeni 1.75 mm od gornje ravni i 1.75 mm od donje ravni radnog komada kao što je prikazano na Slici 8.18.



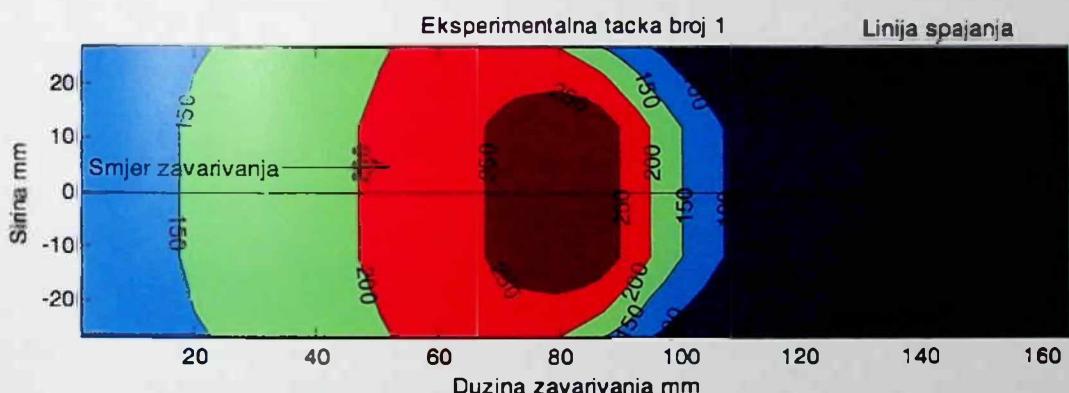
Slika 8.18. Šema mjernih tačaka temperature sa pozicijama presjeka D i G.

Interpretacija temperaturne distribucije prikazana je preko konturnih dijagrama u presjecima D i G. Na apcisnoj osi data je dužina zavarivanog spoja od 166 mm, a na

ordinatnoj osi širina u milimetrima od linije spajanja. Na konturnim presjecima date su vrijednosti izmjerene temperature u °C. Na Slici 8.19 prikazan je konturni dijagram izmjerene temperature u 1. tački eksperimentalnog plana u presjeku G i poziciji alata I, dok je na Slici 8.20 dat prikaz u presjeku D i poziciji alata II.

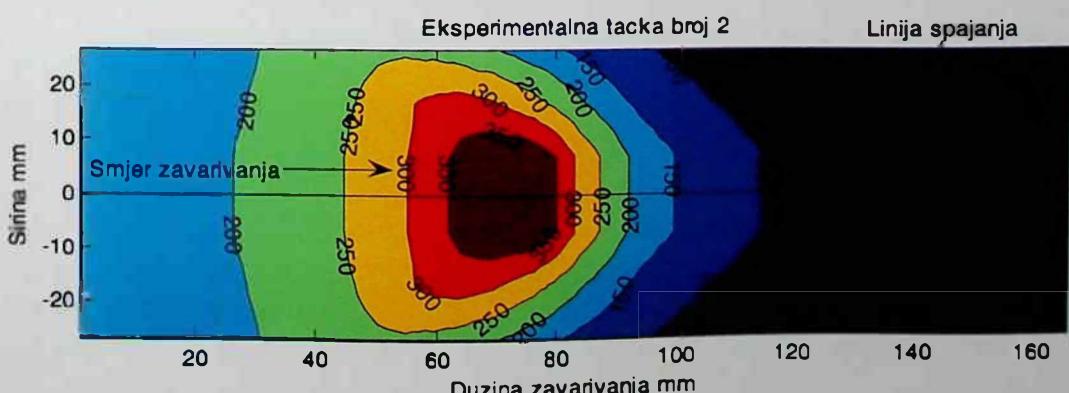


Slika 8.19. Konturni dijagram temperature za presjek G i poziciju alata I



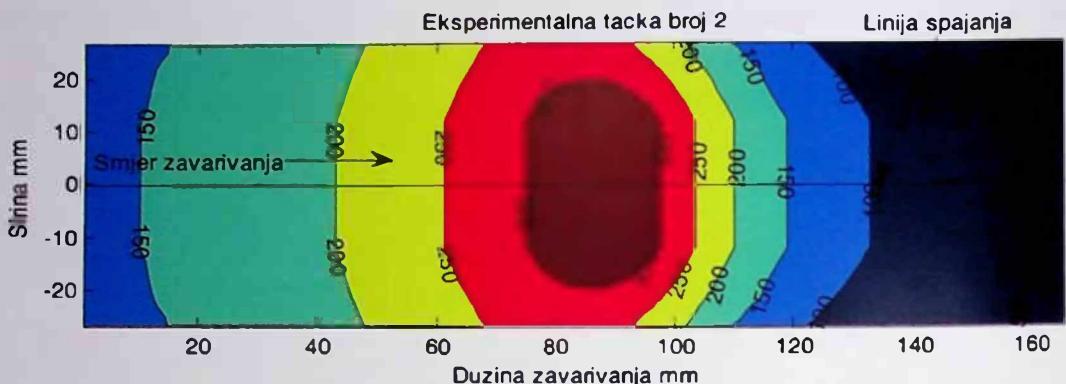
Slika 8.20. Konturni dijagram temperature za presjek D i poziciju alata II

Na Slici 8.21 prikazan je konturni dijagram izmjerene temperature u 2. tački eksperimentalnog plana u presjeku G i poziciji alata I, dok je na Slici 8.22 dat prikaz u presjeku D i poziciji alata II. Zbog racionalizacije prostora u poglavlju, ostali konturni dijagrami neće biti prikazani u radu.



Slika 8.21. Konturni dijagram temperature za presjek G i poziciju alata I

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

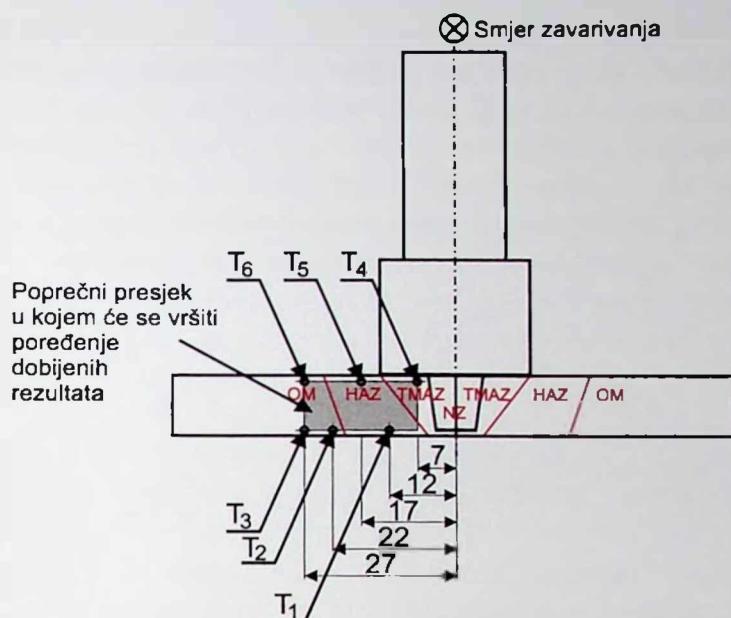


Slika 8.22. Konturni dijagram temperature za presjek D i poziciju alata II

Pošto je 1. tačka eksperimentalnog plana realizovana sa brzinom zavarivanja od 200 mm/min, sa konturnog dijagrama (Slika 8.19), jasno se vidi, da se materijal koji se nalazi neposredno ispred nailazećeg alata sporije zagrijava zbog velike brzine zavarivanja. Kako radni komadi leže na čeličnoj fino brušenoj osloboj ploči, prilikom odvijanja procesa FSW, dolazi i do zagrijavanja oslove ploče. Sa Slike 8.20 vidimo da je temperatura manja ali se zavareni radni komadi sporije hlađe zbog dejstva toplote ugrijane oslove ploče, pa imamo veće temperaturno polje. U 2. tački eksperimentalnog plana imamo veću temperaturu zavarivanja, jer se proces odvija sa brzinom 80 mm/min. U ovom slučaju proces zavarivanja postupkom FSW traje duže, pa se i unosi veća količina toplote, jer je materijal izložen dužem zagrijavanju od alata, pa se sa Slike 8.21 vidi da je u gornjoj zoni temperaturno polje veće od temperaturnog polja iz 1. tačke eksperimentalnog plana. Materijal koji se nalazi neposredno ispred nailazećeg alata je više zagrijan. Na Slici 8.22 prikazan je isti efekat dejstva toplote od oslove ploče kao na Slici 8.20. Za ostale tačke eksperimentalnog plana efekti distribucije temperaturnog polja su slični, dok na vrijednost veličine temperature utiču varirani faktori.

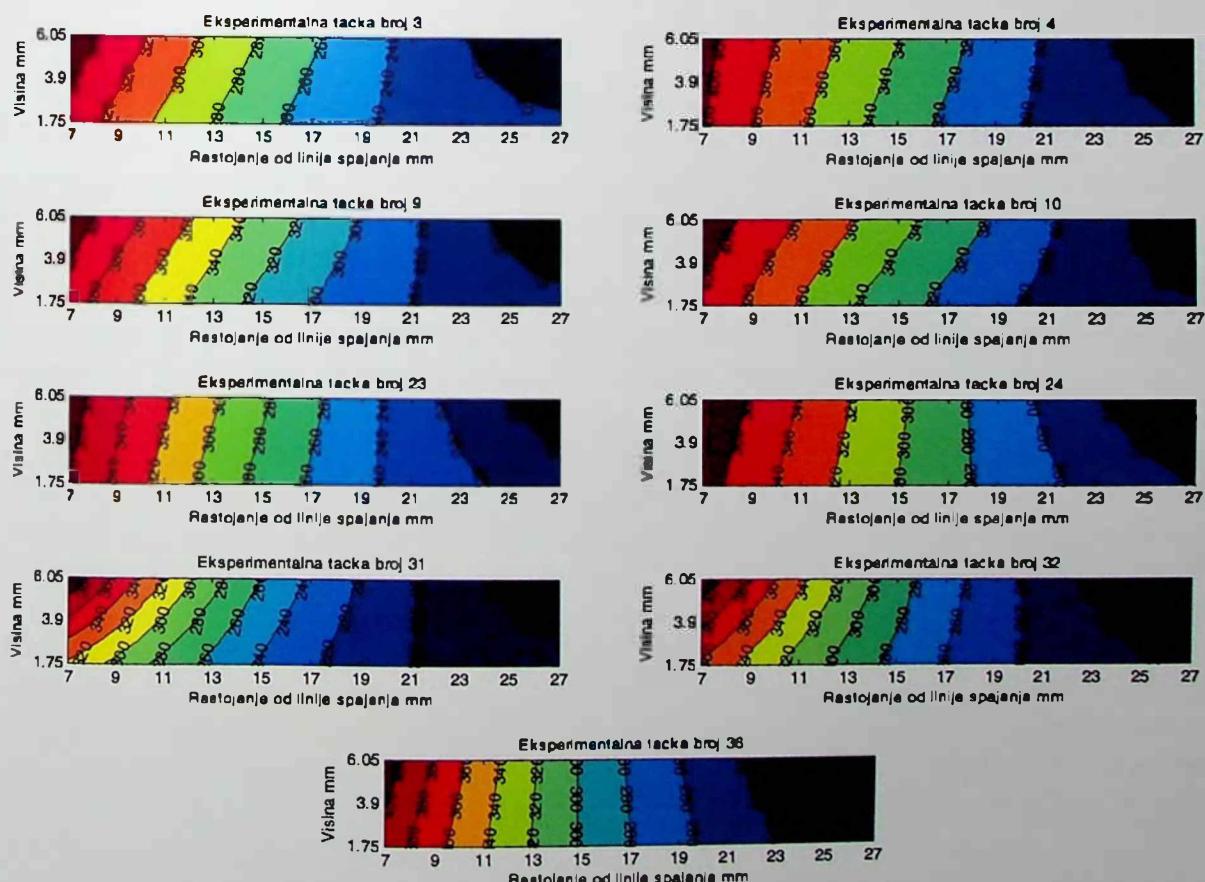
Pošto je druga etapa glavna za proces zavarivanja, u radu će biti izvršeno upoređenje i analiza dobijenih rezultata po poprečnom presjeku zavarenih radnih komada koji se nalazi na sredini procesa zavarivanja postupkom FSW, odnosno na rastojanju od 83 mm od početka procesa FSW. Šematski prikaz poprečnog presjeka zavarenih radnih komada sa pozicijama termo-parova dat je na Slici 8.23.

Kao što se sa šematskog prikaza može vidjeti u izabranom poprečnom presjeku zastupljene su sve mikrostruktturne zone. Kako je merna pozicija 4 udaljena samo nekoliko milimetara (u zavisnosti od eksperimentalne tačke) od nailazećeg trna alata, ona daje vrijednosti temperature zagrijanosti same „grumen“ zone. Merna pozicija 1, daje vrijednosti temperature na granici prelaza zone termo-mehaničkog uticaja u zonu uticaja toplote, dok merna pozicija 5, daje vrijednosti same zone uticaja toplote. Vrijednosti temperature na prelazu zone uticaja toplote u osnovni materijal se mogu dobiti u mernoj poziciji 2, a merne pozicije 3 i 6 daju vrijednosti temperature osnovnog materijala. Poznavanje vrijednosti temperature samih mikrostruktturnih zona, kroz kasniju metalografsku analizu poprečnog presjeka zavarenog spoja, omogućava da se lakše izvrši determinacija i bolje sagleda formiranje zrnaste strukture pomenutih zona.



Slika 8.23. Šematski prikaz poprečnog presjeka zavarenih radnih komada

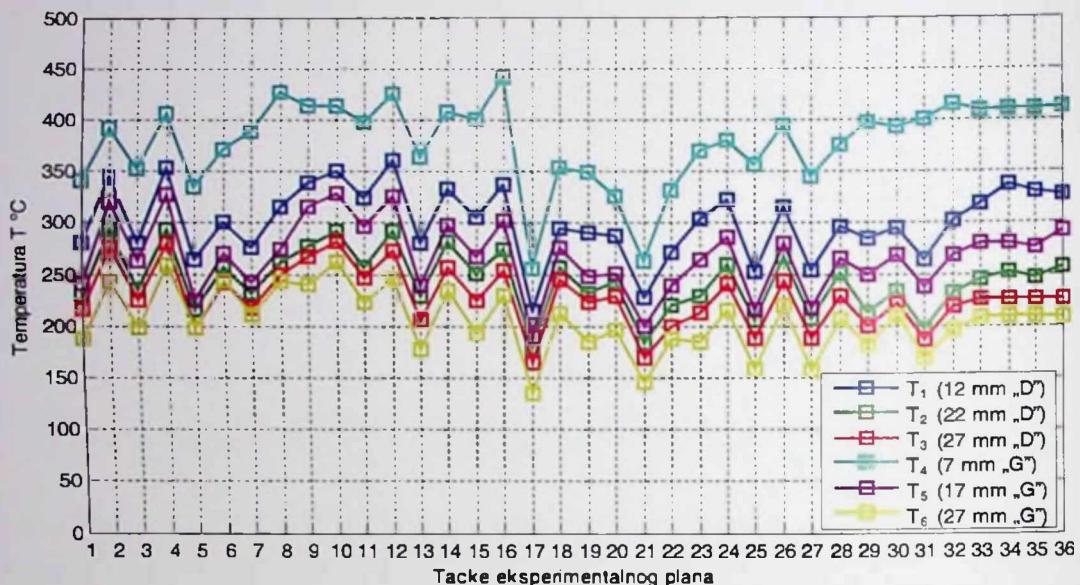
Na Slici 8.24 dati su konturni dijagrami posmatranog poprečnog presjeka za tačke eksperimentalnog plana 3, 4, 9, 10, 23, 24, 31, 32 i 36, koji su dobijeni na osnovu izmjerjenih vrijednosti temperature preko termo-parova.



Slika 8.24. Konturni dijagrami izmjerene temperature u poprečnom presjeku

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

Za analizu promjene temperature u odnosu na varirane parametre eksperimentalnih istraživanja, na Slici 8.25 prikazane su maksimalne vrijednosti temperature koje su izmjerene preko termo-parova T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 i T_6 , za sve tačke eksperimentalnog plana.



Slika 8.25. Pregledni dijagram izmjerene temperature eksperimentalnim putem za sve tačke eksperimentalnog plana

Najveća izmjerena vrijednost temperature je u 16. tački eksperimentalnog plana i iznosi $440.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kako je temperatura topljena legure aluminijuma 6080-T6, $555\text{ }^{\circ}\text{C}$, može se konstatovati da je proces FSW izведен za sve tačke eksperimentalnog plana u čvrstom stanju bez efekta topljenja materijala koji karakteriše ostale konvencionalne postupke zavarivanja. Kako je temperatura mjerena na određenim udaljenostima od linije spajanja to se može izvršiti i analiza dobijenih rezultata. Termo-par koji je najbliže pozicioniran izvoru topline je T_4 . Ovaj termo-par je na udaljenosti od linije spajanja 7 mm, pa se na ovome mjernom mjestu dobijaju najveće vrijednosti izmjerene temperature. Najmanja izmjerena vrijednost u termo-paru broj T_4 je u 17. tački eksperimentalnog plana i iznosi $254.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inače u 17. tački eksperimentalnog plana dobijene su najmanje izmjerene vrijednosti za sve ostale pozicije termo-parova, a najmanja je $135.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, na rastojanju 27 mm od linije spajanja u gornjoj zoni. Razlog ovako dobijenih malih vrijednosti temperature je posledica nepovoljnog odnosa variranih faktora, što je i rezultiralo šavom lošeg kvaliteta.

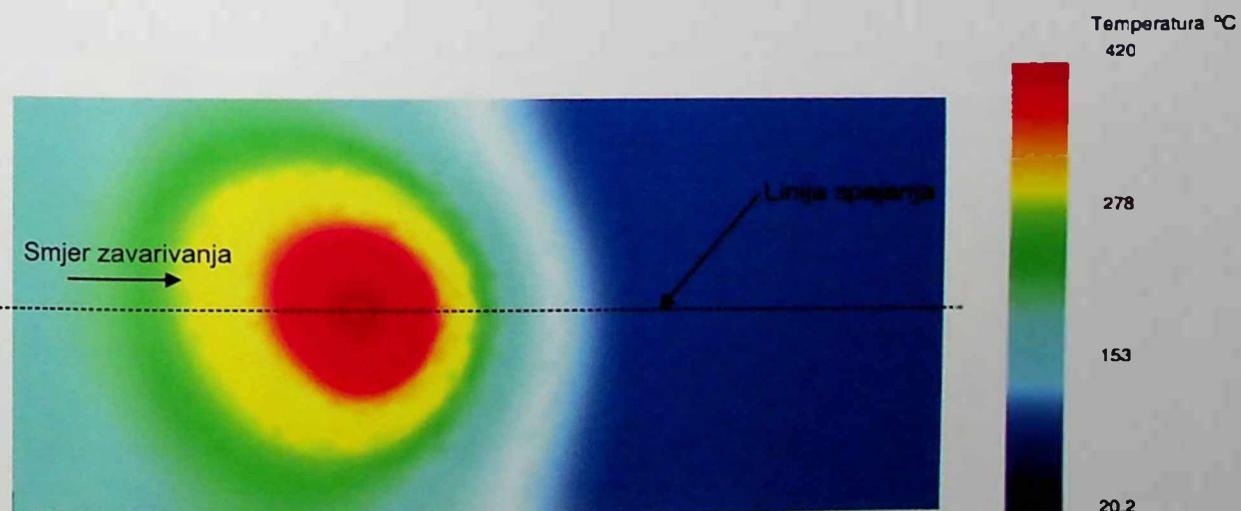
Na rastojanju 12 mm od linije spajanja u donjoj zoni izmjerena je najveća vrijednost temperature u 12. tački eksperimentalnog plana i ona iznosi $360\text{ }^{\circ}\text{C}$. U 10. tački eksperimentalnog plana, na rastojanju 17 mm od linije spajanja u gornjoj zoni izmjerena je najveća vrijednost temperature i ona iznosi $328\text{ }^{\circ}\text{C}$. U ovoj tački izmjerena je i najveća vrijednost temperature na rastojanju od 27 mm u donjoj zoni $281.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ i u gornjoj zoni $263\text{ }^{\circ}\text{C}$. U 4. tački eksperimentalnog plana na rastojanju 22 mm od linije spajanja u donjoj zoni izmjerana je najveća vrijednost temperature koja iznosi $292.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kako se najveća unesena količina toplote generiše od čela alata, ovaj faktor najviše utiče na dobijene vrijednosti temperature, pa su se izdvojile tri temperaturne oblasti, kao što se vidi na Slici 8.25. Iz prethodno opisane analize možemo konstatovati da se najveće maksimalne izmjerene vrijednosti temperature dobijaju u prvih 16 tačaka eksperimentalnog plana gdje je dominantni faktor prečnik čela alata od 28 mm. U centralnim tačkama eksperimentalnog plana gdje je prečnik čela alata 26.46 mm dobijaju se manje vrijednosti temperature, gdje je prosječna temperatura na rastojanju 7 mm od linije spajanja $409.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na rastojanju 27 mm $209.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ u gornjoj zoni. U tačkama eksperimentalnog plana od 17 do 32, gdje je manji prečnik čela alata od 25 mm dobijaju se znatno manje vrijednosti temperature.

8.3.2. ANALIZA TEMPERATURE DOBIJENE NUMERIČKOM SIMULACIJOM

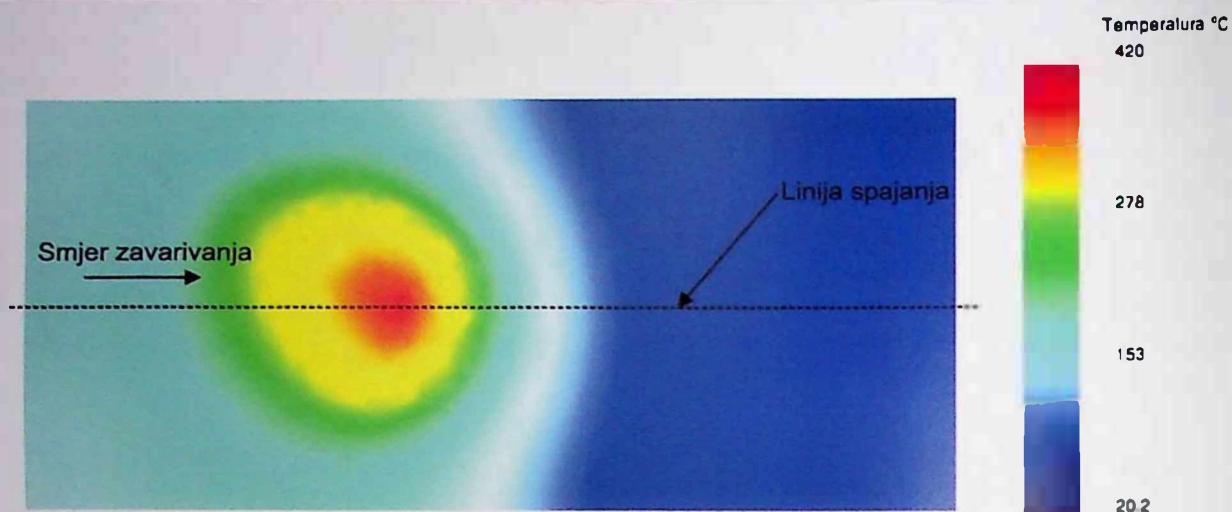
Numerička simulacija je urađena za sve tačke eksperimentalnog plana, gdje su dobijeni osjenčeni dijagrami temperature, koji su za centralnu tačku plana prikazani u Poglavlju 7.3. Ovi dijagrami su pogodni za vizuelnu analizu, ali ne i za kvantitativnu. Da bi se mogli uporediti podaci koji su dobijeni eksperimentalnim putem sa podacima dobijenim numeričkim simulacijama, u DEFORM podmodulu *Point Tracking* su na istim pozicijama mjernih mesta putem termo-parova izabrane pozicije tačaka u kojima se dobijaju vrijednosti temperature koja je numerički generisana korišćenjem metode konačnih elemenata. Za analizu numerički dobijenih vrijednosti temperature uzete su takođe maksimalne vrijednosti sa dijagrama za šest pozicija P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 i P_6 . U ovim izabranim tačkama pored parametra temperature, DEFORM softverski paket daje i ostale vrijednosti parametara koji karakterišu procese iz obrade deformisanjem, kao što su: deformacije, brzine deformacija, napone i razne druge parametre.

Osjenčeni dijagram temperaturne distribucije dobijen za numeričku simulaciju broj 3 u gornjoj zoni za poziciju alata 1 (Slika 8.18), dat je na Slici 8.26, a u donjoj zoni na Slici 8.27. Na Slici 8.28 i Slici 8.29 dati su osjenčeni dijagrami dobijen za numeričku simulaciju broj 4 u gornjoj i donjoj zoni.

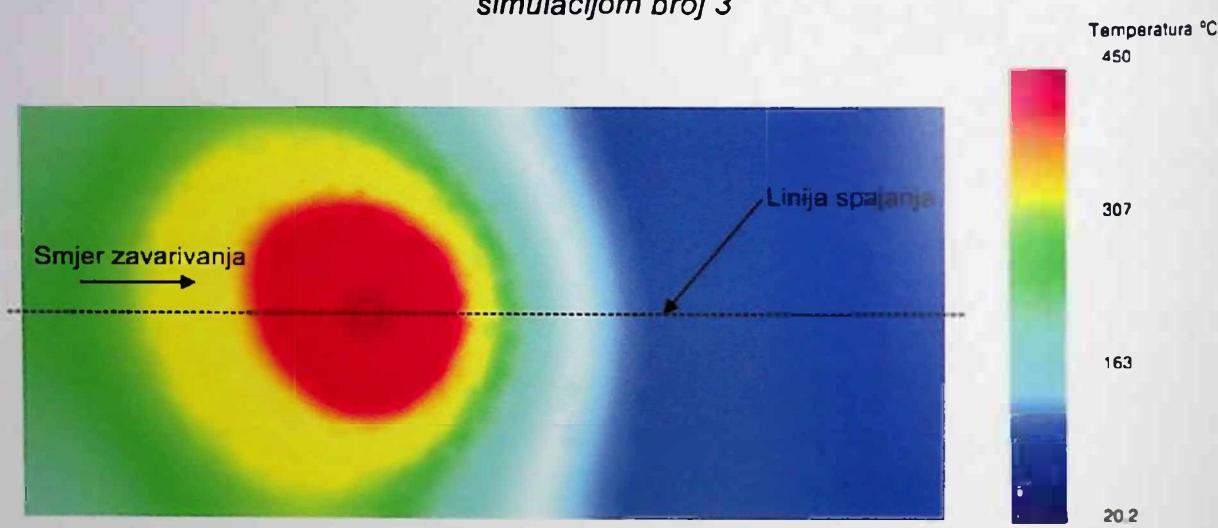


Slika 8.26. Osjenčeni dijagram temperature u gomjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 3

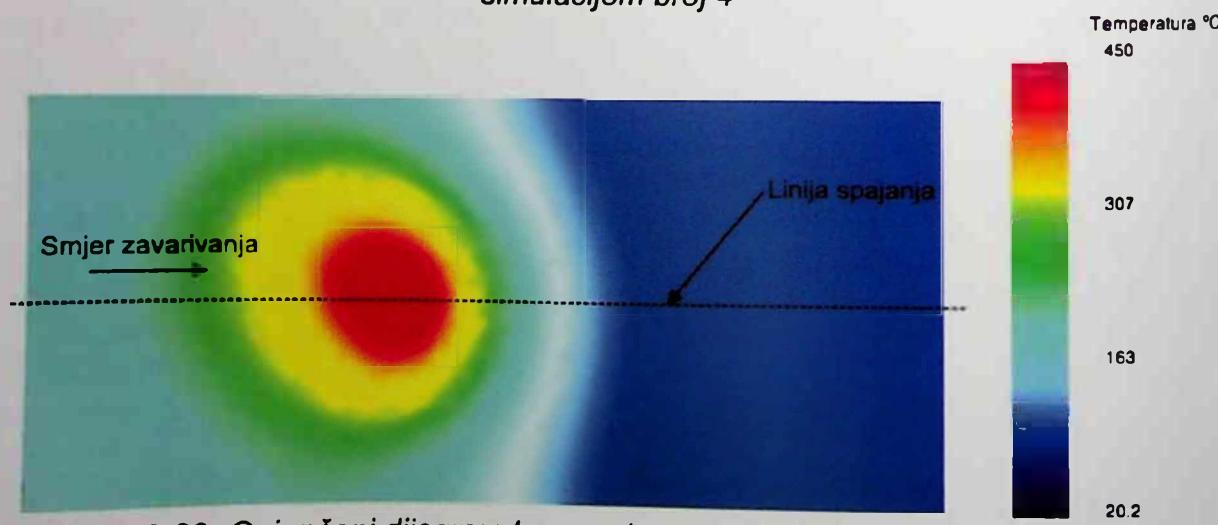
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.27. Osjenčeni dijagram temperature u donjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 3



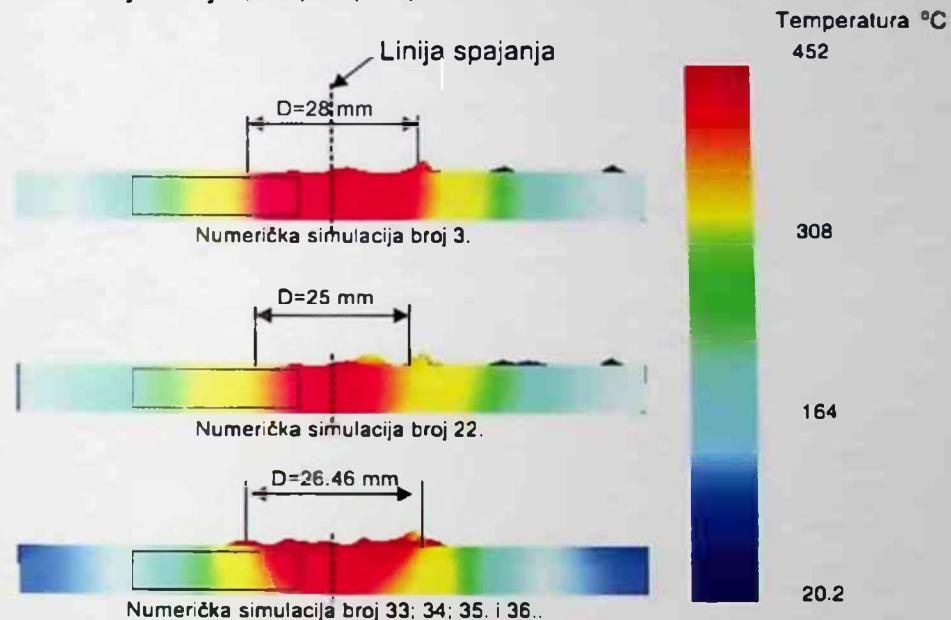
Slika 8.28. Osjenčeni dijagram temperature u gornjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 4



Slika 8.29. Osjenčeni dijagram temperature u donjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 4

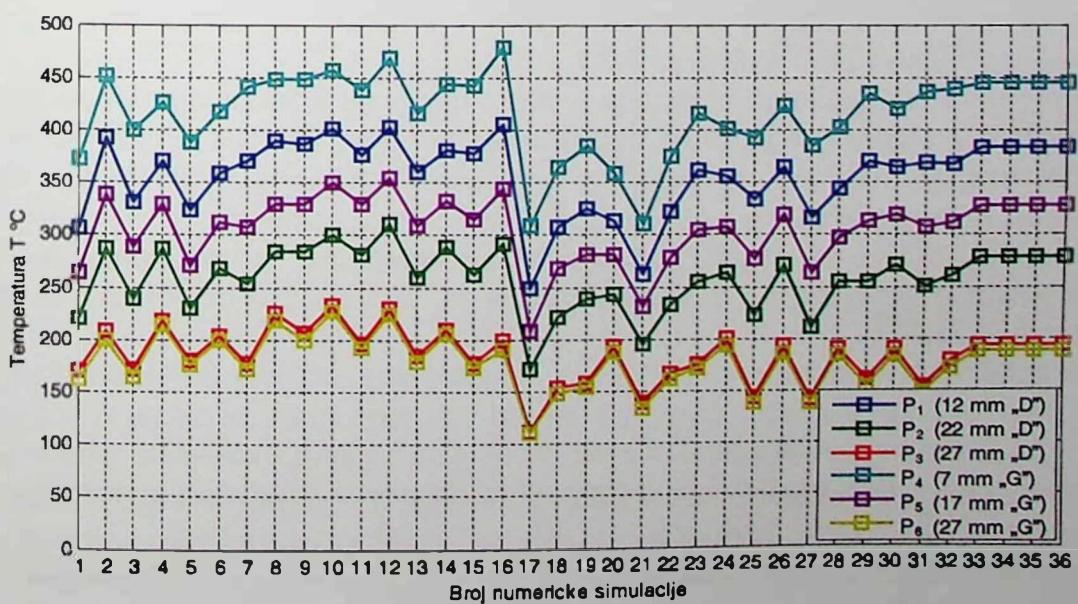
Na ovako prikazanim osjenčenim dijagramima primjećuje se slično temperaturno polje kao kod izmjerene vrijednosti temperature eksperimentalnim putem, samo što je uticaj od topline oslane ploče kod numeričkih simulacija manji, ali je primjetan sa povećanjem udaljenja od linije spajanja.

Koristeći šemu sa Slike 8.23 dobijeni su osjenčeni dijagrami u izabranom poprečnom presjeku, u kojem će se kasnije uporediti rezultati. Na Slici 8.30 dat je osjenčeni dijagram temperature, dobijen u karakterističnom poprečnom presjeku za numeričke simulacije broj 3, 22, 33, 34, 35 i 36.



Slika 8.30. Osjenčeni dijagram izmjerene temperature u poprečnom presjeku

Na Slici 8.31 dat je pregledni dijagram maksimalnih dobijenih temperatura u izabranih šest tačaka podmodula *Point Tracking*, koje su obrađene u MATLAB-u, za sve izvedene numeričke simulacije.



Slika 8.31. Pregledni dijagram dobijene temperature za sve numeričke simulacije

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

Sa Slike 8.31 jasno se vidi da se i kod numeričkih simulacija takođe izdvajaju tri temperaturne oblasti numerički dobijene temperature. Prva oblast je od 1. do 16. numeričke simulacije, gdje je prečnik čela alata 28 mm. U ovoj oblasti takođe je dobijena najveća numerički generisana temperatura u 16. simulaciji, koja iznosi 478.11°C , a ona je ujedno i maksimalna temperatura procesa FSW. Druga oblast je od 17. do 32. numeričke simulacije gdje se dobijaju znatno niže vrijednosti temperature. Ovu oblast karakteriše prečnik čela alata od 25 mm. Treća oblast je u centralnim tačkama plana, gdje su dobijene iste vrijednosti numeričkih simulacija za četiri numeričke simulacije 33, 34, 35 i 36.

Kako je tačka P_4 najbliža liniji spajanja, za očekivati je da u ovoj tački imamo najveće vrijednosti numerički generisane temperature. Najmanja dobijena vrijednost temperature u tački P_4 je u 21. simulaciji i iznosi 310.14°C . U tački P_1 koja se nalazi u donjoj zoni i koja je udaljena 12 mm od linije spajanja dobijena je najveća vrijednost temperature takođe u 16. simulaciji, koja iznosi 405.04°C . U 17. simulaciji za tačke P_1 , P_2 , P_3 , P_5 i P_6 dobijene su najmanje vrijednosti temperature, a najmanja je u tački P_3 gornje zone, na rastojanju 27 mm od linije spajanja i iznosi 112.30°C . Tačka P_5 se nalazi u gornjoj zoni na rastojanju od 17 mm od linije spajanja, a najveća temperatura je izmjerena u 12. numeričkoj simulaciji i iznosi 354.15°C . U 12. simulaciji u tački P_2 , koja se nalazi u donjoj zoni na rastojanju 22 mm od linije spajanja, dobijena je najveća vrijednost temperature, koja iznosi 310.26°C . U 10. simulaciji, u tački P_3 i P_6 , dobijena je najveća temperatura. Za tačku P_3 iznosi 233.26°C , a za P_6 227.70°C .

Odavde vidimo da su sve najveće dobijene temperature za sve numeričke simulacije skoncentrisane u prvoj oblasti, a najmanje u trećoj.

8.3.3. POREĐENJE TEMPERATURE

Za kvantitativnu analizu i poređenje temperature, dobijeni su dvodimenzionalni dijagrami u karakterističnom presjeku zavarenog radnog komada, za sve tačke eksperimentalnog plana. Šema rasporeda mjernih tačaka u usvojenom presjeku, za koje će se vršiti upoređenje eksperimentalnih, modeliranih i numeričkih vrijednosti prikazana je u Poglavlju 8.3.1 na Slici 8.23.

Zbog obimnosti dobijenih podataka u ovom poglavlju prikazaćemo samo nekoliko karakterističnih presječnih dijagrama dobijene temperature i izvršiti njihovo poređenje i analizu za eksperimentalne, modelirane i numerički dobijene vrijednosti, u funkciji rastojanja od linije spajanja.

Na Slici 8.32 prikazani su presječni dijagrami temperature za tačku eksperimentalnog plana broj 3 u gornjoj zoni, a na Slici 8.33 u donjoj zoni zavarenih radnih komada.

Sa prikazanih dijagrama se vidi da temperatura izmjerena eksperimentalnim putem i temperatura dobijena numeričkom simulacijom imaju različite vrijednosti. U gornjoj zoni temperatura dobijena numeričkom simulacijom ima veće vrijednosti na rastojanju 7 mm od linije spajanja od temperature izmjerene eksperimentalnim putem za 50°C .



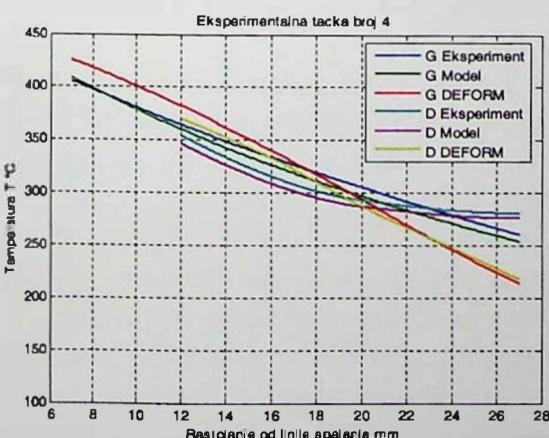
Slika 8.32. Presječni dijagrami temperature u gornjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 3



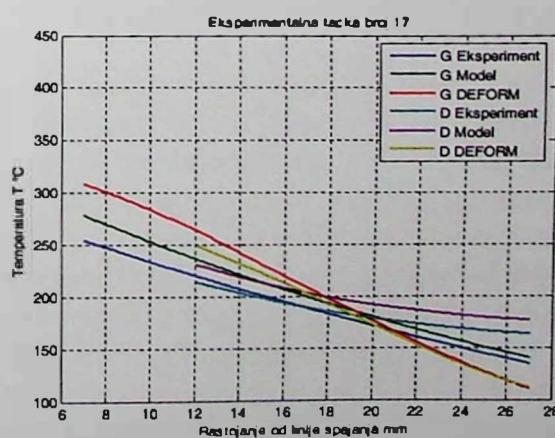
Slika 8.33. Presječni dijagrami temperature u donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 3

Kako se rastojanje od linije spajanja povećava, tako temperatura dobijena numeričkom simulacijom opada i na rastojanju od 21 mm ima istu vrijednost kao temperatura izmjerena eksperimentalnim putem. Na rastojanju od 27 mm temperatura dobijena numeričkom simulacijom ima manje vrijednosti za 40 °C, od vrijednosti izmjerene eksperimentalnim putem. Oblik presječne krive temperature dobijene numeričkim putem je blago konkavan pa konveksan kako se rastojanje od linije spajanja povećava. Dok je kod krive koja je dobijena eksperimentalnim putem oblik blago konveksan.

Na sledećim slikama prikazani su presječni dijagrami temperature za 4, 17, 18, 27, 28. i 36. tačku eksperimentalnog plana (od Slike 8.34 do Slike 8.39), za gornju i donju zonu u funkciji rastojanja od linije spajanja za vrijednosti koje su dobijene eksperimentalnim putem, modeliranjem i numeričkom DEFORM simulacijom. Presječni dijagrami temperature za ostale eksperimentalne tačke dati su u Prilogu 6.



Slika 8.34. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 4

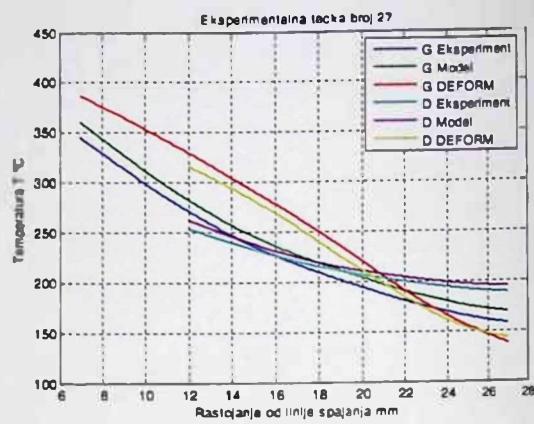


Slika 8.35. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 17

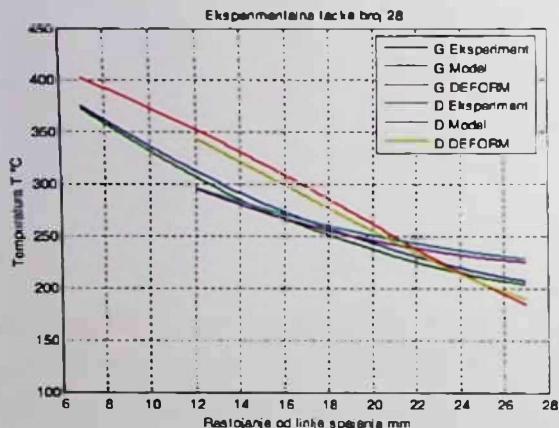
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



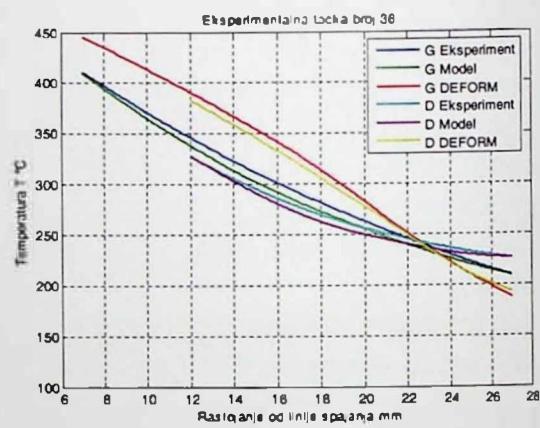
Slika 8.36. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 18



Slika 8.37. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 27



Slika 8.38. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 28



Slika 8.39. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 36

Sa prikazanih presječnih dijagrama i njihovom analizom zaključuje se da su vrlo mala odstupanja između vrijednosti dobijenih eksperimentalnim putem i modeliranjem. U svim tačkama eksperimentalnog plana dobijene krive imaju isti blago konveksni oblik. Odstupanje između eksperimentalnih i modelskih vrijednosti najviše je u 19. tački eksperimentalnog plana za mjeru poziciju 6 i iznosi 11.7 %. U svim ostalim tačkama eksperimentalnog plana odstupanje temperature ne prelazi 10 %, pa možemo zaključiti da je proces generisanja topote uspješno modeliran kvadratnom funkcijom odziva.

U svakoj tački eksperimentalnog plana na mjerenoj poziciji 4 imamo veće vrijednosti numerički dobijene temperature od temperature izmjerene eksperimentalnim putem. Odstupanje je najveće u 17. tački eksperimentalnog plana i iznosi 21.32 %. Kako se udaljavamo od linije spajanja, odstupanja su manja i na rastojanju od 20 ± 2 mm dijagrami temperature dobijeni numeričkim simulacijama presijecaju dijagrame dobijene eksperimentalnim putem. Na rastojanju od 27 mm u mjerenoj poziciji 3 i 6 sve vrijednosti dobijene numeričkom simulacijom su manje od eksperimentalno izmjerene vrijednosti.

temperature. Najveće odstupanje na rastojanju 27 mm od linije spajanja je u 13. tački eksperimentalnog plana i iznosi 29.47 %. Sa aspekta dobijenih vrijednosti temperature u poprečnom presjeku i najvećih, modelskih, numeričkih i eksperimentalnih odstupanja, možemo konstatovati da je u 17. i 18. tački eksperimentalnog plana proces FSW nestabilan, a kao posledicu imamo nekvalitetan spoj koji se manifestuje pojavom „tunel“ efekta. Najveće odstupanje između numeričkih i eksperimentalnih vrijednosti temperature je u 31. tački eksperimentalnog plana na mjerenoj poziciji 1 i iznosi 39.61 %.

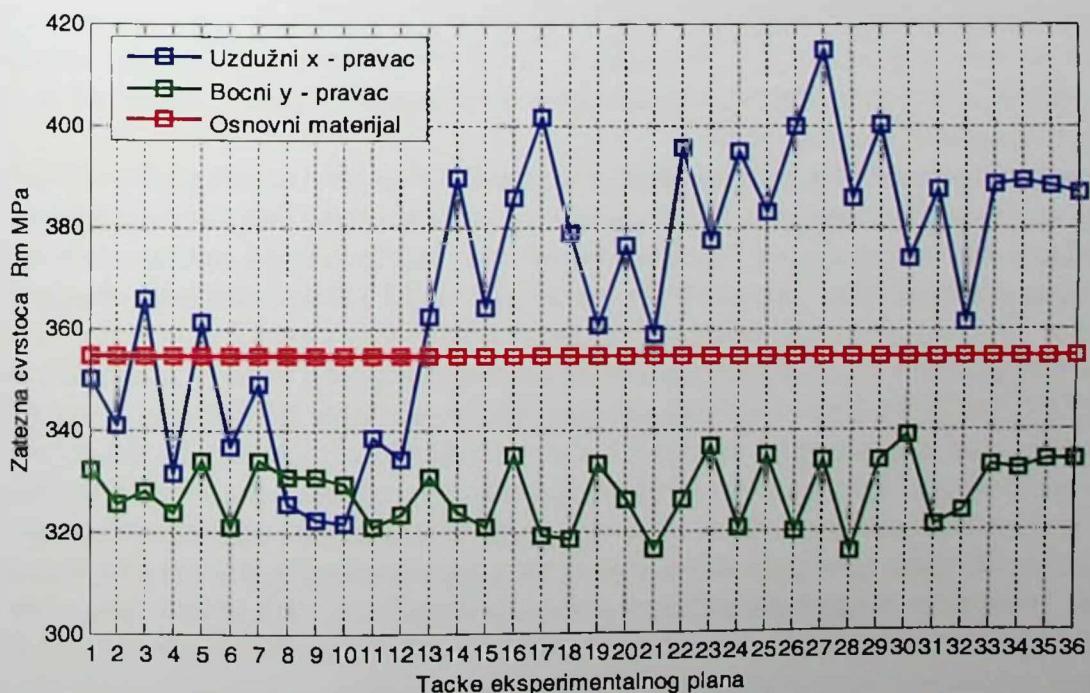
Generalno gledano možemo konstatovati da svako odstupanje od optimalnih vrijednosti temperature, prouzrokuje šav lošeg kvaliteta. Optimalna temperatura se dobija usklađenim odnosima geometrijskih i kinematskih faktora procesa FSW. Ovo se može potvrditi analizom mehaničkih i mikrostrukturnih parametara.

8.4. ANALIZA REZULTATA DOBIJENIH MEHANIČKIH ISPITIVANJA

8.4.1. ANALIZA ZATEZNE ČVRSTOĆE

Prilikom izvođenja eksperimentalnih istraživanja izvršena su mehanička ispitivanja zavarenog materijala postupkom FSW i dobijeni su dijagrami istezanja osnovnog materijala, u svih 36 tačaka eksperimentalnog plana. Kao što je poznato ispitivanje zatezanjem je urađeno u dva pravca: y - pravcu, koji je normalan na pravac zavarivanja i x - pravcu, koji se poklapa sa pravcem zavarivanja, odnosno epruveta je uzeta iz zone TMAZ („grumen“ zone).

Na Slici 8.40 prikazane su vrijednosti zatezne čvrstoće x i y - pravca, za sve tačke eksperimentalnog plana, kao i srednja vrijednost zatezne čvrstoće osnovnog materijala, koja je dobijena ispitivanjem četiri epruvete osnovnog materijala.



Slika 8.40. Pregledni dijagram dobijenih vrijednosti zatezne čvrstoće R_m

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

Kada su u pitanju dobijene vrijednosti zatezne čvrstoće x - pravca, sa Slike 8.40 može se jasno zaključiti da najveći uticaj na zateznu čvrtoću ima prečnik čela alata, pa se analizirani dijagram može podijeliti na tri zone. Prva zona je od tačke 1 do tačke 12 eksperimentalnog plana gdje se vidi da za vrijednosti prečnika čela alata od 28 mm dobijamo male vrijednosti zatezne čvrstoće. Samo tačke broj 3 i 5 eksperimentalnog plana imaju vrijednosti Rm_x veće od vrijednosti Rm osnovnog materijala. Ovako dobijene male vrijednosti zatezne čvrstoće mogu se objasniti relativno velikim uticajem toplote na zavarivani materijal koja nastaje kao posledica uticaja većeg prečnika čela alata. Najmanja vrijednost dobijene zatezne čvrstoće je u 10. tački eksperimentalnog plana $Rm_x = 321.4922 \text{ MPa}$. Za 13, 14, 15. i 16. tačku eksperimentalnog plana vidimo da manji trn alata prečnika od 5 mm i manji ugao nagiba trna alata od 3° , smanjuju površinu kontakta alata i materijala, a samim tim i generisani toplotu pa imamo veće vrijednosti zatezne čvrstoće od osnovnog materijala koje se kreću do 389.6902 MPa . Drugu zonu razmatranog dijagrama karakterišu vrijednosti prečnika čela alata od 25 mm. Manji prečnik čela alata podrazumijeva i manju količinu generisane toplote, pa u tačkama od 16 do 32 eksperimentalnog plana imamo veće vrijednosti zatezne čvrstoće. U 27. tački eksperimentalnog plana imamo najveću vrijednost zatezne čvrstoće $Rm_x = 414.7970 \text{ MPa}$. Ovoj tački odgovaraju vrijednosti variranih parametara $v=200 \text{ mm/min}$, $\omega=630 \text{ o/min}$, $\alpha=5^\circ$, $d=5 \text{ mm}$ i $D=25 \text{ mm}$. Ako primijenimo izraz (4.1) iz Poglavlja 4.1.8.1, dobijamo odnos 0.1270. Treću zonu razmatranog dijagrama karakteriše prečnik čela alata od 26.46 mm . Ovo je zona centralne tačke eksperimentalnog plana, gdje je ponavljanje izvršeno četiri puta i u ovim tačkama dobijamo ujednačene vrijednosti Rm_x .

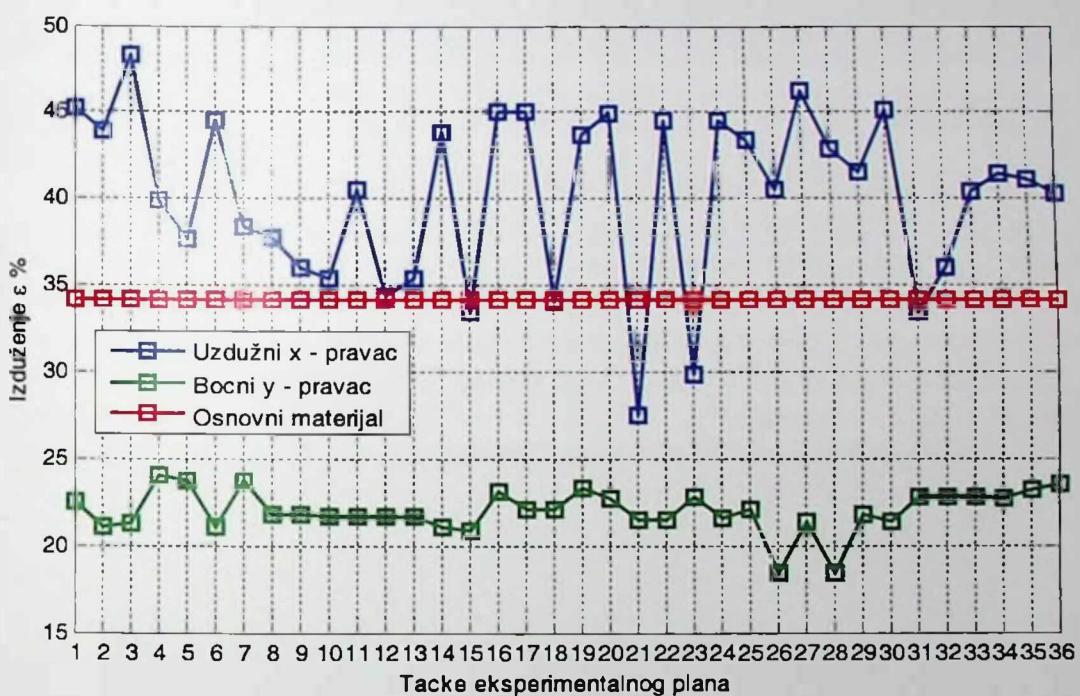
Kada su u pitanju dobijene vrijednosti zatezna čvrstoće u y - pravcu situacija je drugačija, jer se u ispitnom dijelu epruvete nalaze sve mikrostruktурне zone. Za ove epruvete je karakteristična zona uticaja toplote - HAZ, koja nije pretrpjela deformisanje materijala, ali su se pod uticajem toplote promjenile mehaničke osobine. Kao što je poznato ova zona je kritična za sve procese zavarivanja materijala, pa i za proces FSW, samo što je kod procesa FSW njen uticaj manji jer se tokom postupka zavarivanja trenjem materijal ne topi, nego se spajanje vrši u čvrstom stanju. Očekivati je da se ispitne epruvete kidaju u ovoj zoni.

Negativna pojava koja se javlja kod procesa FSW je tzv. „tunel“ efekat. Ova pojava može da se izbjegne pravilnim izborom faktora koji karakterišu proces FSW, a to su ulazni faktori koji su varirani u eksperimentalnom planu: brzina zavarivanja, ugaona brzina okretanja alata, kao i geometrijski parametri alata. Tokom odvijanja eksperimenta ova pojava je u nekoj tački eksperimentalnog plana manje zastupljena, u nekoj više, a negdje i nije prisutna. Kod tačaka eksperimentalnog plana kod kojih je došlo do pucanja epruveta na 1/3 ispitne dužine, odnosno u HAZ zoni, tunel efekat nije prisutan ili je zanemarljivo mali a to su epruvete broj 1, 4, 5, 7, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35 i 36. Kod ostalih epruveta uzetih iz y - pravca do kidanja je došlo na sredini ispitne dužine epruvete i ove epruvete imaju najmanje vrijednosti zatezne čvrstoće Rm_y . Najveći tunel efekat se javio u eksperimentalnoj tački broj 17 i 18, gdje su dobijene i najmanje vrijednosti zatezne čvrstoće $Rm_{y17}=319.1773 \text{ MPa}$ i $Rm_{y18}=318.5541 \text{ MPa}$. Kao što je ranije analizirano u ovim tačkama eksperimentalnog plana, su dobijene i najmanje vrijednosti temperature, tako da su u zoni miješanja dobijene velike plastične deformacije jer se materijal nije dovoljno zagrijao. Kako „tunel“ efekat nema uticaja na

epruvete iz x - pravca, jer se ne nalazi u ispitnoj dužini epruvete dobijene su velike vrijednosti zatezne čvrstoće $Rm_{x,17}=401.4423 \text{ MPa}$ i $Rm_{y,18}=378.6503 \text{ MPa}$.

Kada je u pitanju izduženje epruveta, zbog efekta rekristalizacije, koji se javlja kao posledica velikih plastičnih deformacija u „grumen” zoni, dobija se sitnozrna mikrostruktura, pa se ovako nastali rekristalizovani materijal ponaša super-plastično.

Na Slici 8.41 prikazane su vrijednosti izduženja epruveta iz x i y - pravca, za sve tačke eksperimentalnog plana, kao i srednja vrijednost izduženja epruveta osnovnog materijala, koja je dobijena ispitivanjem četiri epruvete osnovnog materijala.



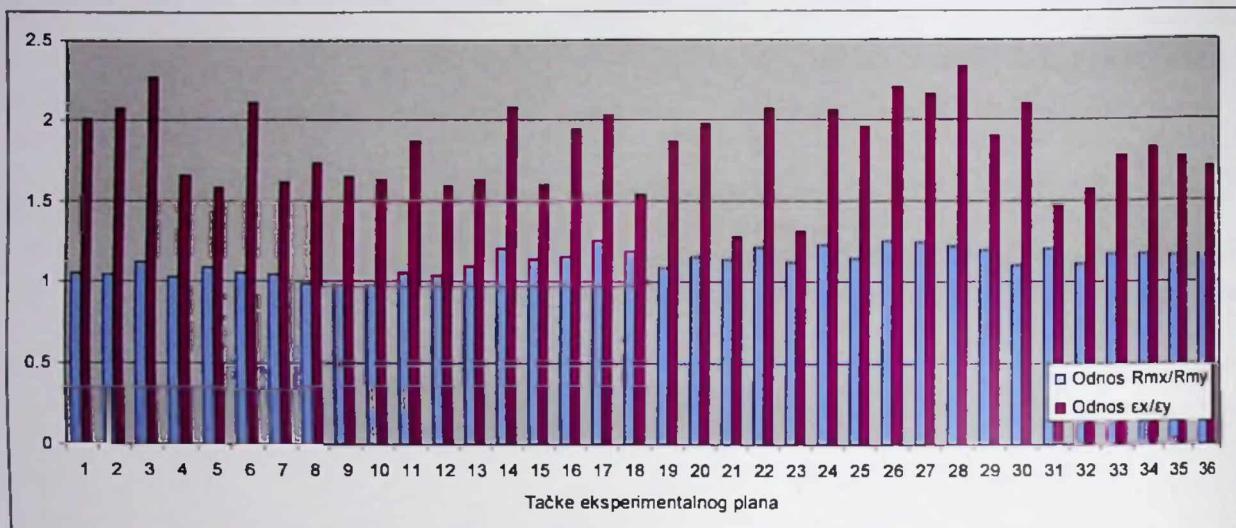
8.41. Pregledni dijagram dobijenih vrijednosti izduženja ϵ

Sa Slike 8.41 vidimo da su epruvete iz x - pravca duplo više istegnute nego iz y - pravca, čak više i od epruveta osnovnog materijala. Sa preglednog dijagraama se jasno vidi da izduženje ima najmanje vrijednosti u 21. i 23. tački eksperimentalnog plana kada je u pitanju x - pravac, a u 26. i 28. tački eksperimentalnog plana kada je u pitanju y - pravac.

Na Slici 8.42 dat je grafikon, gdje su prikazani dobijeni odnosi zateznih čvrstoća Rm_x/Rm_y i izduženja i ϵ_x/ϵ_y , za sve tačke eksperimentalnog plana.

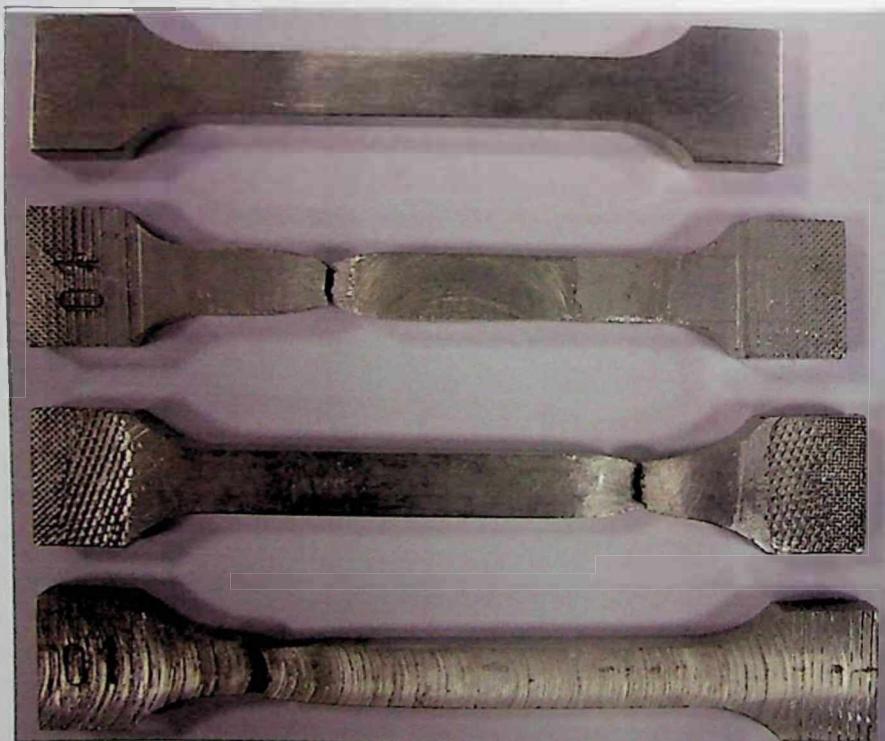
Sa grafikona (Slika 8.42) vidimo da su vrijednosti odnosa dobijenih zateznih čvrstoća veće od 1 sem u tačkama 8, 9 i 10 eksperimentalnog plana. Najveći relativni odnos je u 27. tački eksperimentalnog plana i on iznosi 1.2501. Kod procentualnog izduženja epruveta u pojedinim tačkama eksperimentalnog plana relativni odnos je veći od 2. Najmanja vrijednost se dobija u 23. tački eksperimentalnog plana i iznosi 1.3114.

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.42. Grafikon dobijenih odnosa Rm_x/Rm_y i $\varepsilon_x/\varepsilon_y$

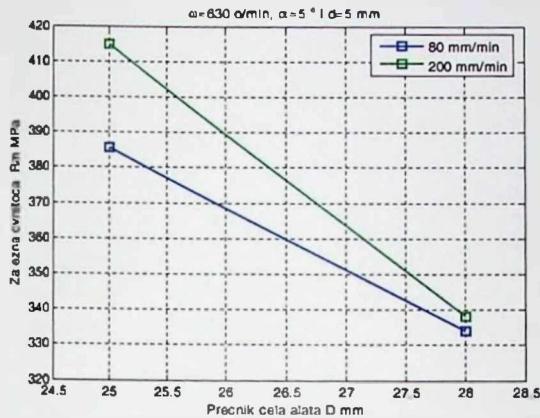
Na Slici 8.43 dato je upoređenje istezanja epruveta za 1. tačku eksperimentalnog plana. Na vrhu slike prikazana je neistegnuti epruveta, zatim epruveta iz y -pravca koja je najmanje istegnuta. Ispod nje je prikazana epruveta osnovnog materijala, a na dnu slike je prikazana epruveta iz x -pravca koja je najviše istegnuta.



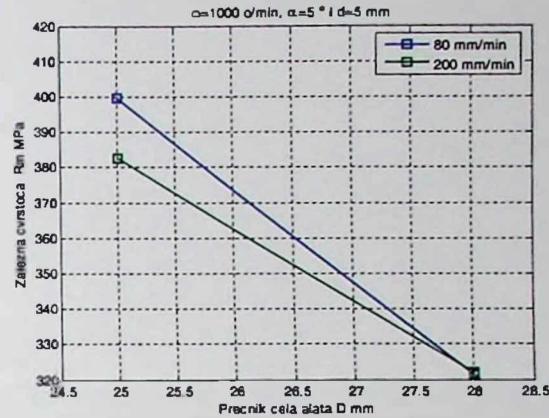
Slika 8.43. Prikaz odnosa izduženja istegnutih epruveta za 1. tačku eksperimentalnog plana i osnovnog materijala

Sa prethodno prikazanih dijagrama i grafikona, generalno gledano vidimo, da su dobijene vrijednosti Rm_x , veće od vrijednosti Rm_y . Ovo je posledica toga, što su epruvete

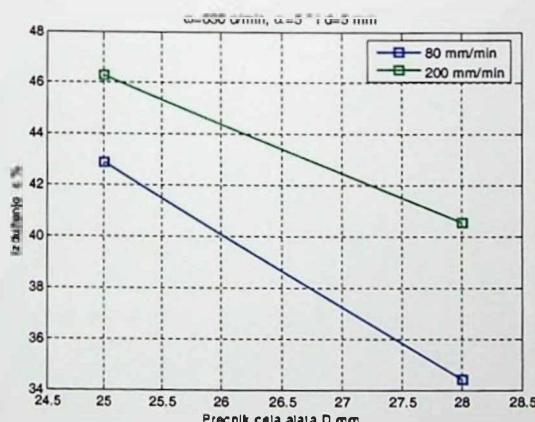
\times - pravca uzete iz dinamički rekristalizirane „grumen“ zone, koja je pretrpjela velike plastične deformacije. Najveći uticaj na vrijednosti zatezne čvrstoće ima geometrija alata, pa su na sledećim slikama prikazane vrijednosti zatezne čvrstoće i izduženja za $\omega=630 \pm 1000 \text{ o/min}$, $\alpha=5^\circ$ i $d=5 \text{ mm}$ (Slika 8.44, Slika 8.45, Slika 8.46 i Slika 8.47).



Slika 8.44. Dijagram zatezne čvrstoće u funkciji prečnika čela alata za 630 o/min



Slika 8.45. Dijagram zatezne čvrstoće u funkciji prečnika čela alata za 1000 o/min



Slika 8.46. Dijagram procentualnog izduženja u funkciji prečnika čela alata za 630 o/min

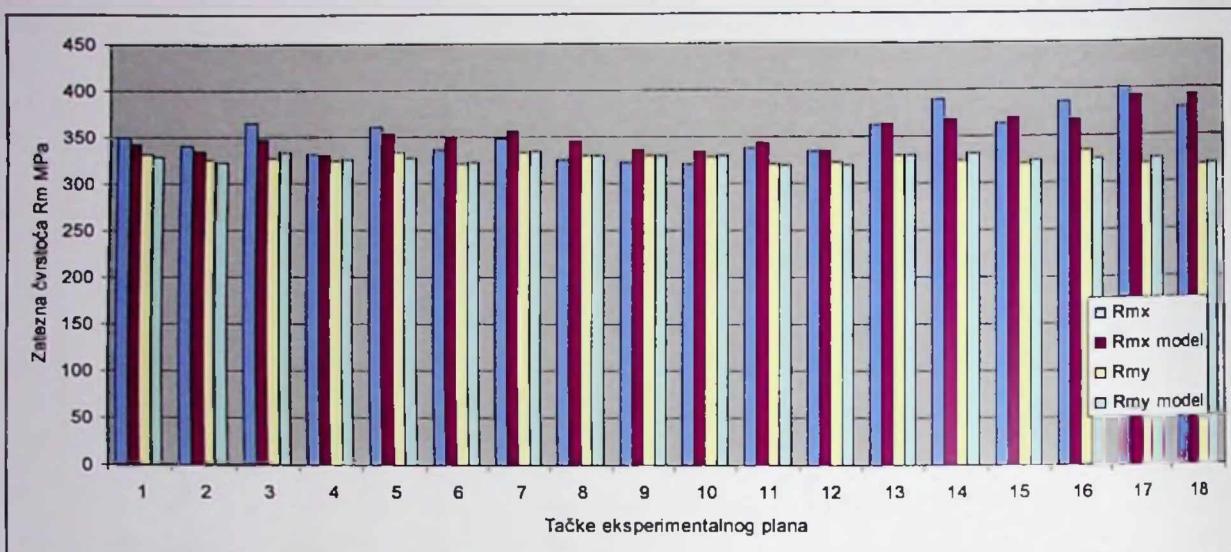


Slika 8.47. Dijagram procentualnog izduženja u funkciji prečnika čela alata za 1000 o/min

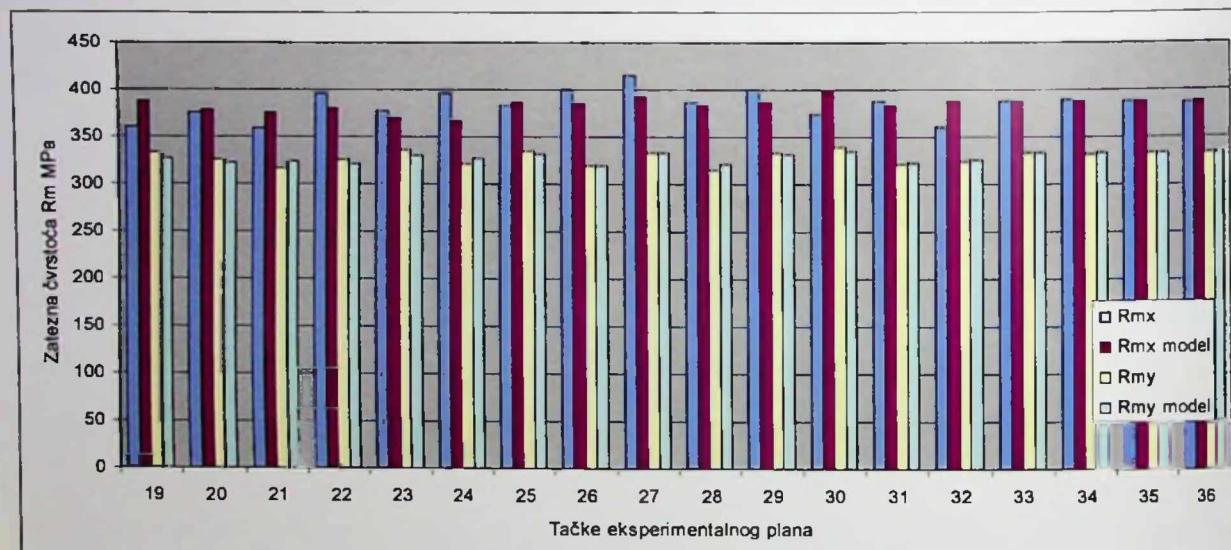
Na slikama vidimo da za manje vrijednosti prečnika čela alata imamo veće vrijednosti zatezne čvrstoće i izduženja, veće vrijednosti su dobijene pri manjoj ugaonoj brzini okretanja alata $\omega=630 \text{ o/min}$ i većoj brzini zavarivanja $v=200 \text{ mm/min}$.

Prilikom modeliranja parametara procesa FSW, regresionom analizom određeni su parametri modela sa kvadratnom funkcijom odziva na osnovu kojih su dobijeni grafikoni prikazani na Slici 8.48 i Slici 8.49. Poređenjem modelski dobijenih vrijednosti i vrijednosti dobijenih eksperimentalnim putem, uočava se da postoje izvjesna odstupanja. Rezultati se relativno dobro poklapaju u centralnoj tački eksperimentalnog plana. Ovo poklapanje je posledica ponavljanja u centralnoj tački plana, pri čemu su dobijeni dijagrami istezanja koji su slični, pa su i vrijednosti zatezne čvrstoće za iste uslove zavarivanja približno iste.

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



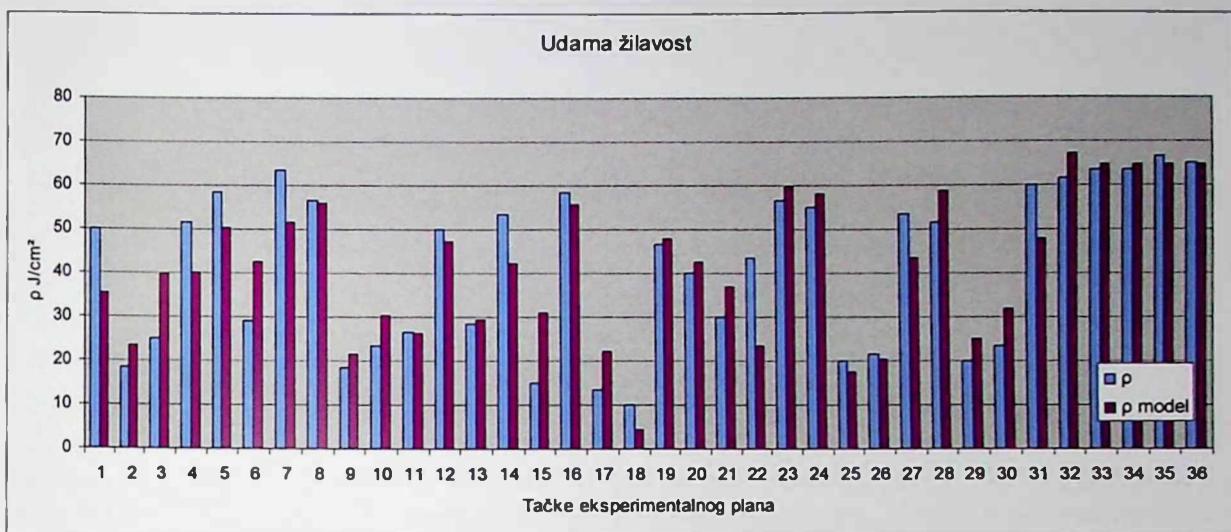
Slika 8.48. Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18



Slika 8.49. Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36

8.4.2. ANALIZA UDARNE ŽILAVOSTI

Kao što je poznato prilikom izvođenja mehaničkih ispitivanja, izvršeno je određivanje udarne žilavosti uzoraka, na Šarpijevom klatnu. Zatim su regresionom analizom dobijene modelske vrijednosti udarne žilavosti sa kvadratnom funkcijom odziva. Na Slici 8.50 prikazan je grafikon poređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima.



Slika 8.50. Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za sve tačke eksperimentalnog plana

Sa grafikona (Slika 8.50) primjećujemo izvjesna odstupanja u nekim tačkama eksperimentalnog plana. U 1, 4, 5, 7, 14. i 27. tački eksperimentalnog plana odstupanja su značajnija. U centralnoj tački eksperimentalnog plana odstupanja su minimalna. Ova odstupanja su posljedica postojanja „tunel“ efekta. U onim tačkama eksperimentalnog plana, kod kojih je „tunel“ efekat prisutan dobijaju se male vrijednosti udarne žilavosti, zbog manje površine poprečnog presjeka, koji je oslabljen šupljinom „tunel“ efekta. Ove vrijednosti ne odgovaraju realnim, kao za slučaj da nema šupljine u poprečnom presjeku, odnosno postojanja „tunel“ efekta kod procesa FSW.

Najmanje vrijednosti udarne žilavosti se javljaju u 17. i 18. tački eksperimentalnog plana i iznose $\rho_{17}=13.33 \text{ J/cm}^2$ i $\rho_{18}=10 \text{ J/cm}^2$. Najveća vrijednost udarne žilavosti se dobija za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35 i iznosi $\rho_{35}=66.66 \text{ J/cm}^2$. Sve dobijene vrijednosti udarne žilavosti su manje od dobijene vrijednosti osnovnog materijala koja iznosi $\rho_{\text{om}}=70 \text{ J/cm}^2$.

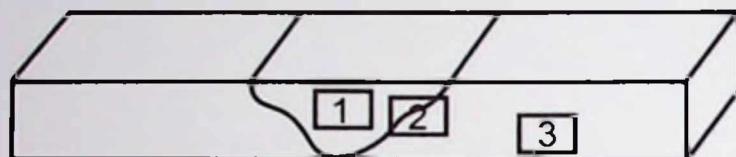
8.5. METALOGRAFSKA ANALIZA

Za analizu mikrostrukturalnih promjena kod procesa FSW, uzorci koji su isječeni iz poprečnog presjeka tretirani su odgovarajućim metodama i nagrizani pogodnim reagensom kao što je objašnjeno u Poglavlju 6.8, a ispitivanje mikrostukture izvršeno je metodom svjetlosne mikroskopije.

Kod legure aluminijuma 6082-T6 glavni legirajući elementi su: silicijum, magnezijum i mangan. Aluminijumske legure uvijek sadrže neke nečistoće, uglavnom željeza i silicijuma [157], a često pored željeza i silicijuma, ima i mangana, bakra i hroma. Ovi elementi utiču na mikrostrukturu i doprinose formiranju vrlo fine skale tvrdoće materijala.

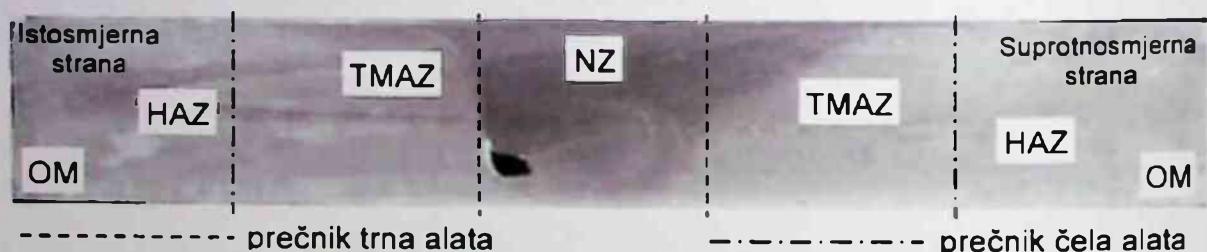
Suština metalografske analize je identifikacija mikrostrukturalnih promjena kod procesa FSW. Na Slici 8.51 prikazana je šema mikrostrukturne analize koja je usaglašena sa međunarodnim istraživanjima procesa FSW.

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

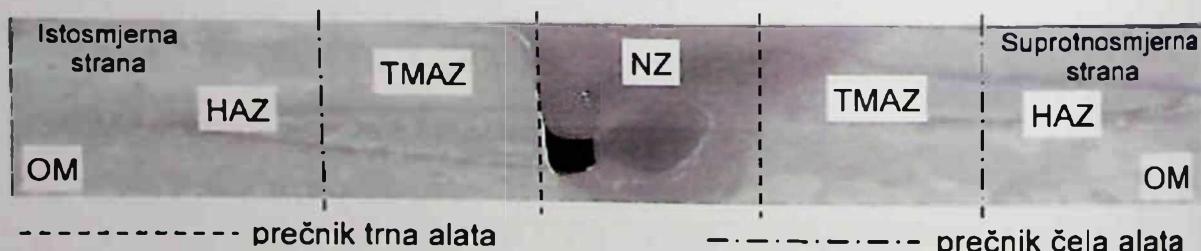


Slika 8.51. Šema mikrostrukturmne analize

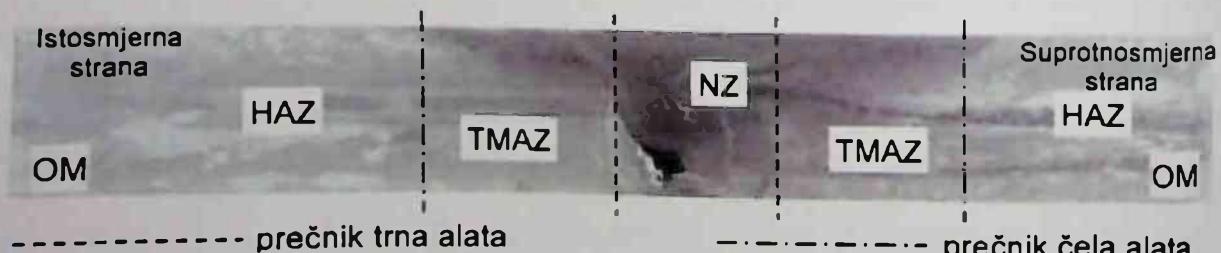
Mikrostrukturne promjene su stečene u različitim zonama: prelaz između zavarenog i osnovnog materijala (pozicija 2 na Slici 8.51), zavareni materijal (pozicija 1 na Slici 8.51) i osnovni materijal (pozicija 3 na Slici 8.51). Na Slici 8.52 do Slike 8.55 predstavljena je makrostruktura procesa FSW za uzorke legure aluminijuma 6082-T6 u 1, 17, 30. i 36. tački eksperimentalnog plana. U svakom ispitivanom uzorku, identifikovane su različite mikrostrukturne zone: zona osnovnog materijala - OM, zona uticaja topline - HAZ (Heat Affect Zone), zona termo-mehaničkih uticaja - TMAZ (Thermo-Mechanical Affect Zone) i „grumen“ zona - NZ (Nugget Zone). Takođe, na suprotosmjernej strani zavarivanja, odnosno na desnoj strani svake makrostrukture, prisutan je i „bljesak“, mjesto niže vrijednosti tvrdoće.



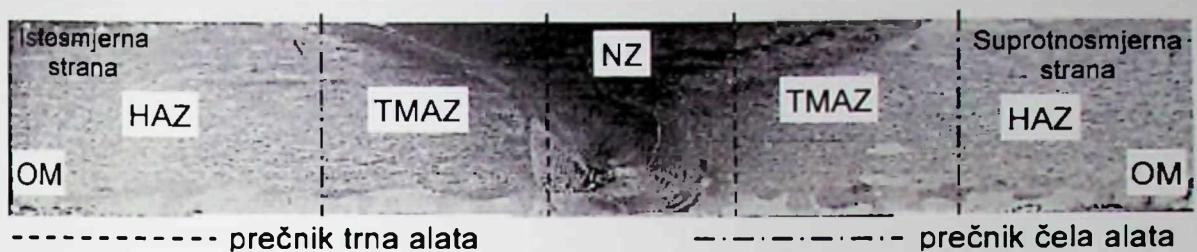
Slika 8.52. Makrostruktura uzorka broj 1



Slika 8.53. Makrostruktura uzorka broj 17



Slika 8.54. Makrostruktura uzorka broj 30



Slika 8.55. Makrostruktura uzorka broj 36

Budući da su postupkom FSW zavarena dva radna komada od istog materijala, na krajevima posmatranih uzoraka, zapaža se struktura istog osnovnog materijala. Osnovni materijal ima strukturu sa izduženim oblikom zrna (Slika 8.56).



Slika 8.56. Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka broj 30

Kod zone uticaja toplote - HAZ, zapaža se slična veličina zrna, gdje je jasno uočljiva prelazna zona. Na Slici 8.57 prikazana je mikrostruktura zone osnovnog materijala, prelazna zona i zona uticaja toplote. U zoni uticaja toplote takođe su prisutna usmjerenja zrna, za koje se pretpostavlja da nastaju zbog uticaja zaostalih napona od procesa FSW.

Zona termo-mehaničkog uticaja - TMAZ zavisi od veličine prečnika čela alata i ona je na Slici 8.52 ograničena linijom „crtta tačka“. Mikrostrukturalni detalji ove zone TMAZ su prikazani na Slici 8.58. Na izgled ove zone utiče samo generisana toplota nastala tokom odvijanja procesa FSW. U zoni termo-mehaničkog uticaja, struktura je sa deformisanim zrnima.

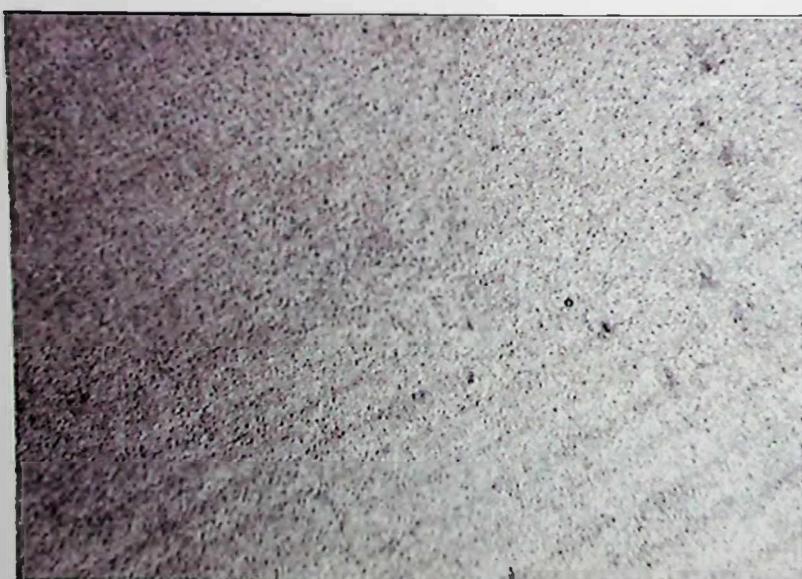
8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.57. Mikrostruktura HAZ - OM uzorka broj 17

U centru zone miješanja javlja se tzv. „grumen“ zona, odnosno mješavina materijala od dva radna komada legure aluminijuma 6082-T6. Ovu zonu je lako identifikovati. Na Slici 8.52 ograničena je isprekidanom linijom. To je zona koja je pretrpjela najveće deformacije i odvaja se od drugih zona po finozrnoj strukturi rekristalizovanog materijala, odnosno to je zona kuda je prošao trn alata (Slika 8.59).

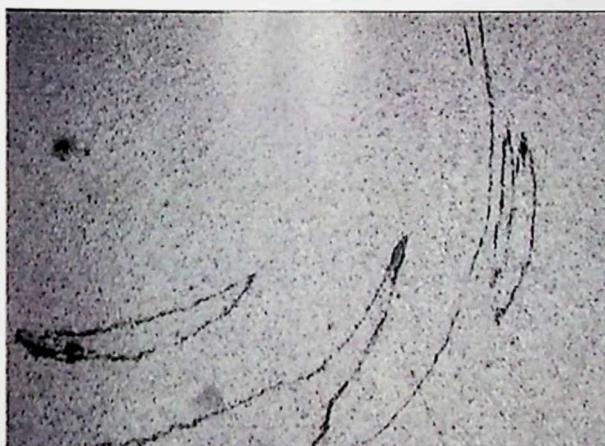
Detalji strukture nastali usled rotacije trna alata zapažaju se na svim uzorcima. Ovi detalji prouzrokovani rotacijom trna alata dati su na Slici 8.60 do Slike 8.63.



Slika 8.58. Mikrostruktura TMAZ zone uzorka broj 36



Slika 8.59. Mikrostruktura „grumen“ zone uzorka broj 1



Slika 8.60. Mikrostruktura uzorka broj 9,
nastala uticajem trna alata



Slika 8.61. Mikrostruktura uzorka broj 10,
nastala uticajem trna alata



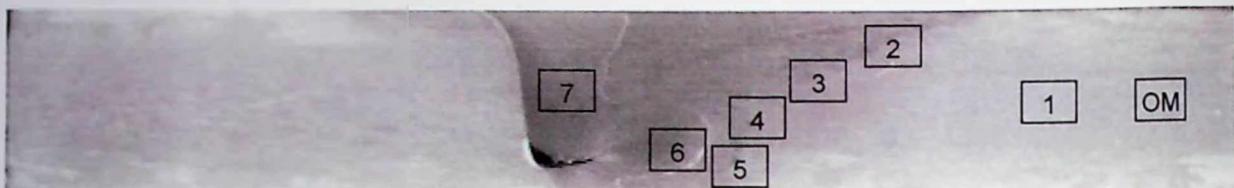
Slika 8.62. Mikrostruktura uzorka broj 15,
nastala uticajem trna alata



Slika 8.63. Mikrostruktura uzorka broj 19,
nastala uticajem trna alata

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW

Mikrostrukturalna analiza izvršena je u određenim karakterističnim pozicijama. Na Slici 8.64 prikazana je mikrostruktura uzorka broj 3, sa odabranim mjestima. Sa slike se jasno izdvajaju mikrostrukturne zone, gdje je prisutan u manjoj mjeri i „tunel“ efekat. Na Slici 8.65 do Slike 8.72 prikazane su mikrostrukturne zone odabranih mjeseta.



Slika 8.64. Makrostruktura uzorka broj 3



Slika 8.65. Mikrostruktura uzorka broj 3,
osnovni materijal



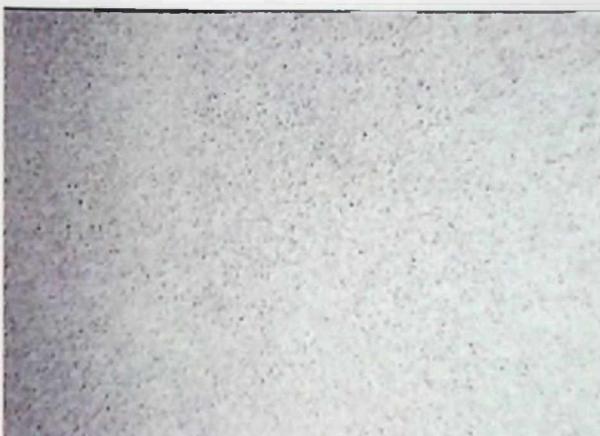
Slika 8.66. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 1



Slika 8.67. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 2



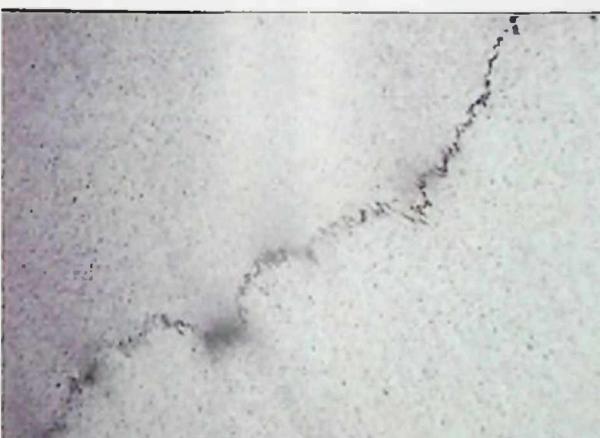
Slika 8.68. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 3



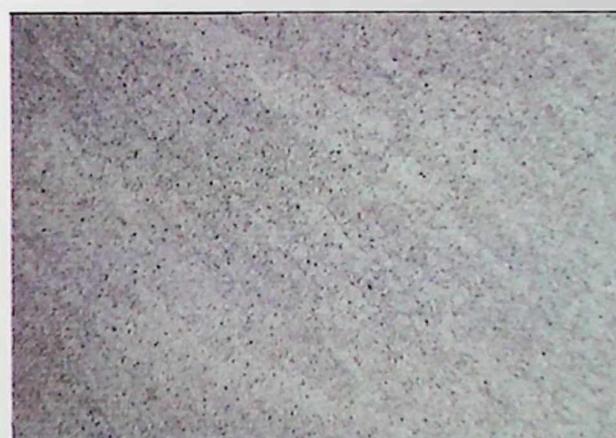
Slika 8.69. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 4



Slika 8.70. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 5



Slika 8.71. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 6



Slika 8.72. Mikrostruktura uzorka broj 3,
pozicija 7

Kako je u tački eksperimentalnog plana broj 3 dobijena najveća vrijednost vertikalne sile F_z i eksperimentalnim putem i numeričkom simulacijom, a iz analize temperature vidimo i veliki uticaj toplote, ovo rezultira formiranjem mikrostrukture prikazane na prethodnim slikama. Ovako dobijena mikrostruktura dovodi do malih vrijednosti zatezne čvrstoće i udarne žilavosti.

Na Slici 8.73 prikazana je makrostruktura uzorka broj 27, sa odabranim mjestima, gdje se jasno izdvajaju mikrostrukturalne zone, a na Slici 8.74 do Slike 8.79 prikazane su mikrostrukturalne zone odabranih mesta.



Slika 8.73. Makrostruktura uzorka broj 27

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



Slika 8.74. Mikrostruktura uzorka broj 27,
osnovni materijal



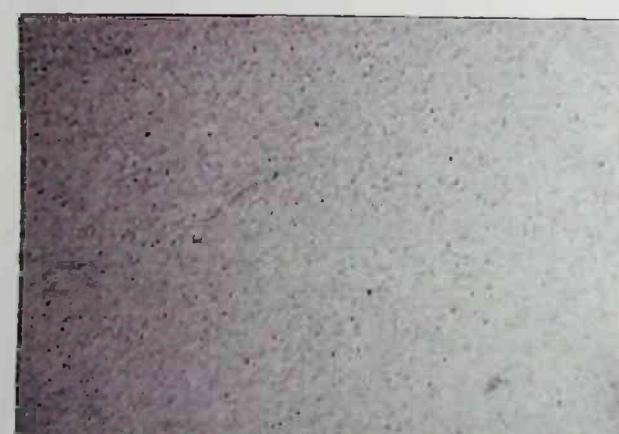
Slika 8.75. Mikrostruktura uzorka broj 27,
pozicija 1



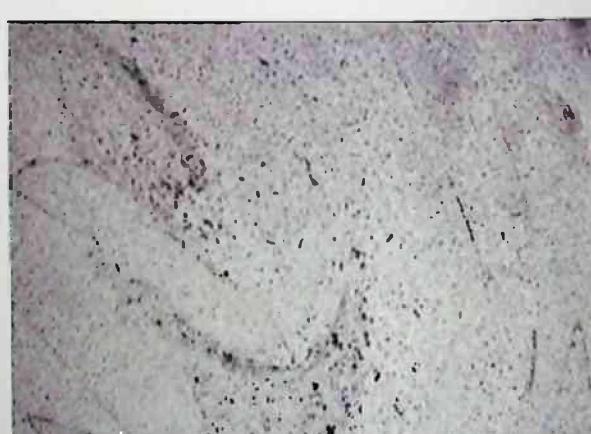
Slika 8.76. Mikrostruktura uzorka broj 27,
pozicija 2



Slika 8.77. Mikrostruktura uzorka broj 27,
pozicija 3



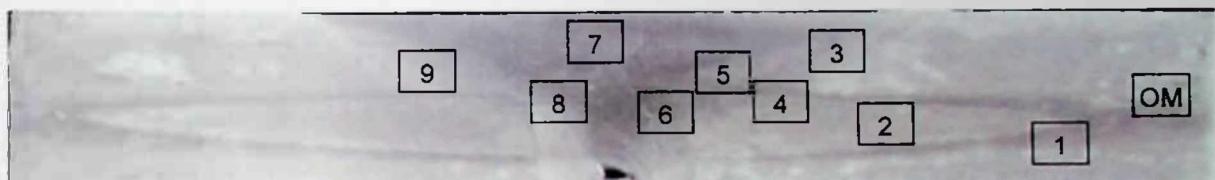
Slika 8.78. Mikrostruktura uzorka broj 27,
pozicija 4



Slika 8.79. Mikrostruktura uzorka broj 27,
pozicija 5

Tačka eksperimentalnog plana broj 27, je pokazala najbolje vrijednosti zatezne čvrstoće, uz optimalan unos topline i male vrijednosti vertikalne sile, što dovodi do formiranja mikrostrukture koja je prikazana na prethodnim slikama. Sa slike se jasno vidi promjena u mikrostrukturi između uzorka broj 3 i uzorka broj 27.

Na Slici 8.80 prikazana je mikrostruktura uzorka broj 31, sa odabranim mjestima. Kod ovog uzorka se jasno izdvajaju mikrostrukturne zone. Na Slici 8.81 do Slike 8.90 prikazane su mikrostrukturne zone odabranih mesta.



Slika 8.80. Makrostruktura uzorka broj 31



Slika 8.81. Mikrostruktura uzorka broj 31,
osnovni materijal



Slika 8.82. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 1



Slika 8.83. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 2



Slika 8.84. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 3

8. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA PROCESA FSW



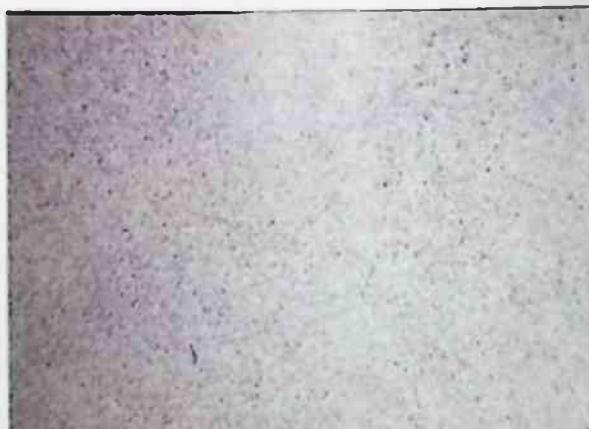
Slika 8.85. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 4



Slika 8.86. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 5



Slika 8.87. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 6



Slika 8.88. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 7



Slika 8.89. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 8



Slika 8.90. Mikrostruktura uzorka broj 31,
pozicija 9

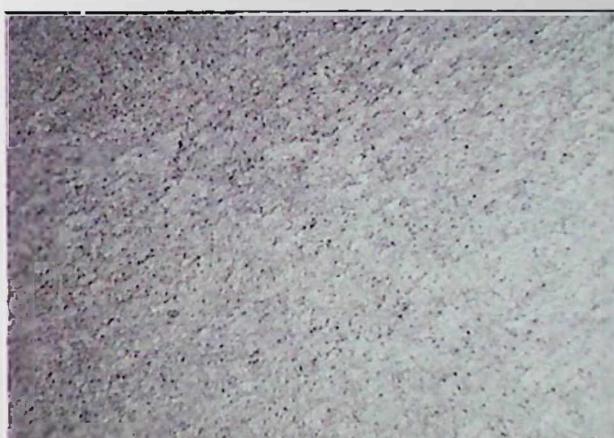
Na Slici 8.91 prikazana je makrostruktura uzorka broj 34, iz centralne tačke plana, sa dva odabrana mesta. To su pozicija prelaza zone uticaja toplote u zonu termomehaničkog uticaja (Slika 8.92) i pozicija „grumen” zone (Slika 8.93).



Slika 8.91. Makrostruktura uzorka broj 34



Slika 8.92. Mikrostruktura uzorka broj 34,
pozicija 1



Slika 8.93. Mikrostruktura uzorka broj 34,
pozicija 2

Zbog obimnosti dobijenih rezultata iz metalografske analize ostali rezultati makro i mikrostrukture uzorka su dati u Prilogu 4. Na osnovu dobijenih slika i rezultata koji su prezentirani u ovom poglavlju primijećuje se da je „tunel” efekat prisutan u određenom broju uzoraka. U tačkama eksperimentalnog plana koje su bile izložene malim uticajima topline, sa stanovišta mikrostrukture je rezultiralo djelimičnom rekristalizacijom. Metalografska analiza je pokazala veliki stepen saglasnosti rezultata sa prethodno izvršenim ispitivanjima, koji su karakteristični za procese spajanja materijala legura aluminijuma, odnosno legure 6082-T6.

Sa stanovišta izvršenih mehaničkih ispitivanja i korišćenjem poznatog odnosa: brzine zavarivanja, ugaone brzine okretanja alata i poluprečnika trna alata v/wr , na osnovu koga se definiše translatorna brzina alata odnosno brzina zavarivanja, možemo izvršiti sledeću analizu. Ako hoćemo da dobijemo najvišu vrijednost zatezne čvrstoće u grumen zoni, najpovoljnija je 27. tačka eksperimentalnog plana, a za zonu uticaja topline najpovoljnija je 31. tačka eksperimentalnog plana. Ako je zavareni materijal opterećen na savijanje, odnosno kada je u pitanju udarna žilavost, najpovoljnija je 35. tačka eksperimentalnog plana. Spojevi najlošijeg kvaliteta po parametrima mehaničkih i metalografskih ispitivanja dobijaju se za 17. i 18. tačku eksperimentalnog plana.

8.6. ANALIZA OBLIKA TRNA I ČELA ALATA

Kako je čitavo istraživanje urađeno sa alatima za zavarivanje osnovnog cilindričnog oblika, koji je karakterističan za zavarivanje legura aluminijuma zbog lakog dizajna i izrade, moguće je postupak FSW unaprijediti, konstruisanjem alata različitih oblika trna i čela. Karakteristični oblici su i zarubljena kupa, ovalni poprečni presjek, ne okrugli poprečni presjek, kupasta spirala itd. Ovi alati bi bili pogodni za zavarivanja ploča veće debljine. Ovako profilisani alati obezbjeđuju dobro trenje i miješanje materijala radnih komada koji se zavaruju i guraju ga na dolje, tako da se dobijaju spojevi visokog kvaliteta. Multi-spiralni alati o kojima je bilo riječi u Poglavlju 4.1.8.3 imaju zaštitni žig MX *Trifluete* od Instituta za zavarivanje - TWI. On ima tri kosa ugaona žlijeba, odnosno spirale, objedinjena sa tri spiralna grebena [86, 191]. Ovako konstruisani trn omogućava da se smanji masa alata, obezbijedi bolje miješanje materijala i da se bolje razbijje oksidna površina sa ploče koja se zavaruje.

Čelo alata pored ravne površine može da bude sa profilisanom površinom: sa lopaticama, žlebovi sa koncentričnim krugovima, žlebovi spiralnog oblika itd. Prednosti alata sa profilisanim čelom u odnosu na alate sa ravnim čelom sagledavaju se u intenzivnjem trenju između alata i materijala, što dovodi do generisanja veće količine topline, odnosno do boljeg miješanja materijala. S obzirom da je trenje intenzivnije, za isti materijal se može koristiti alat manjeg prečnika u odnosu na alat sa ravnim čelom. Profilisano čelo alata ima na sebi udubljenja u obliku žlijeba. Udubljenje treba da bude dizajnirano da obezbijedi rezervoar materijala iznad površine lica metala šava, olakša prenos materijala oko alata i smanji „bljesak“ na suprotnosmjernoj strani.

U poslednje vrijeme su dizajnirani alati sa trnom koji imaju mogućnost da se uvlače u tijelo alata, kao i alati sa promjenjivim trnom, koji se mijenja kada se pohaba.

Prilikom izrade ovog rada razvile su se ideje, za buduće pravce istraživanja, u smislu unapređenja geometrije alata, na osnovu obavljenih istraživanja.

Na Slici 8.94 dat je osnovni oblik trna i čela alata, a na Slici 8.95 profilisano čelo alata sa koncentričnim kružnim žlebovima polukružnog oblika.

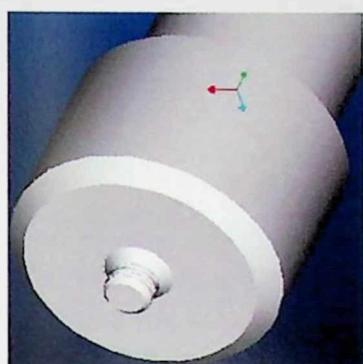


Slika 8.94. Osnovni oblik alata

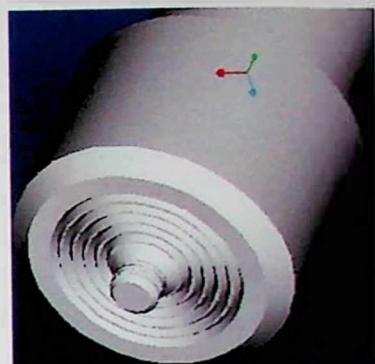


Slika 8.95. Profilisano čelo alata

Na Slici 8.96 dat je prikaz trna alata sa zavojnicom trougaonog oblika, a na Slici 8.97 trna sa zavojnicom i profilisano čelo sa koncentričnim kružnim žlebovima trougaonog oblika.



Slika 8.96. Trn sa zavojnicom

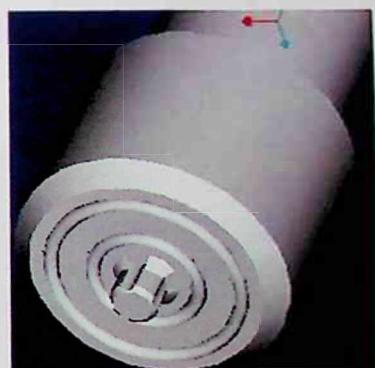


Slika 8.97. Profilisano čelo alata i tm sa zavojnicom

Na Slici 8.97 dat je prikaz trna alata sa četiri paralelna žlijeba polukružnog oblika, a na Slici 8.99 trn sa četiri žlijeba i profilisano čelo sa koncentričnim kružnim žljebovima polukružnog oblika.

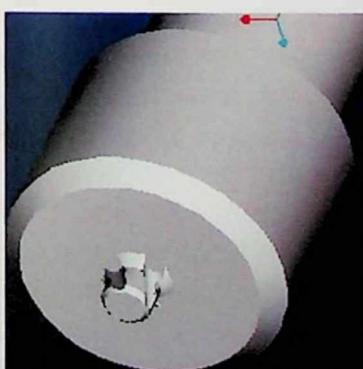


Slika 8.98. Trn sa četiri paralelna žlijeba

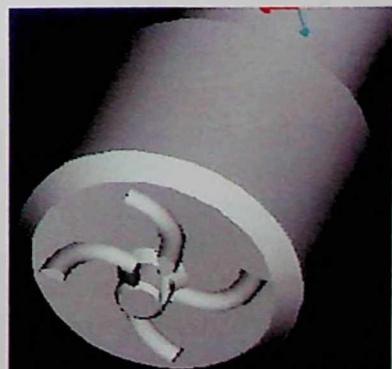


Slika 8.99. Profilisano čelo alata i tm sa četiri paralelna žlijeba

Na Slici 8.100 dat je prikaz trna alata sa četiri žlijeba zaokrenuta za određeni ugao suprotan smjeru okretanja alata, a na Slici 8.101 trn sa četiri zaokrenuta žlijeba i profilisano čelo sa četiri žlijeba karakterističnog oblika.



Slika 8.100. Trn sa četiri zaokrenuta žlijeba Slika 8.101. Profilisano čelo alata i tma sa četiri zaokrenuta žlijeba





9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U okviru procesa spajanja materijala deformisanjem, svojom složenošću posebno se izdvaja proces FSW. Zbog prirode fizičkih procesa, koji se javljaju tokom izvođenja postupka, značajan je broj nedovoljno istraženih parametara koji karakterišu sam proces FSW. To je uslovilo da je postupak FSW interesantan i aktuelan za istraživače. Za uspješnu primjenu postupka FSW potrebno je detaljno poznavanje, prije svega, termo-mehaničkih i mikrostrukturnih parametara.

U radu je izvršeno eksperimentalno određivanje i modeliranje značajnih termo-mehaničkih parametara koji karakterišu sam proces FSW. Radi praćenja mikrostrukturnih transformacija urađena su i metalografska ispitivanja. U cilju realizovanja traženih ispitivanja, bilo je neophodno odraditi eksperiment na realnom objektu, uraditi modeliranja, a zatim za iste početne parametre izvršiti numeričku simulaciju procesa FSW, koja je bazirana na metodi konačnih elemenata. Data je kompletan analiza, kao i poređenje svih dobijenih rezultata.

Na početku rada data je opsežna analiza svih dosadašnjih istraživanja iz ove, kao i iz srodnih oblasti. U teorijskim postavkama postupka FSW, obrađene su najbitnije osnove iz teorije, kao i savremene metode iz istraživane oblasti, koje su se koristile u ovom radu. Konstruisana je pomoćna oprema bez koje se ne bi moglo izvršiti istraživanje, kao ni mjerjenje relevantnih, na proces uticajnih veličina. Akcenat je stavljen na specijalne držače na koje su ljepljene mjerne trake i na sistem za stezanje radnih komada sa oslonom fino brušenom pločom. Rad takođe sadrži, izradu velikog broja neophodnih alata, pripremu ispitivanog materijala od legure aluminijuma 6082-T6, kao i pripremu materijala za mjerjenje temperature, od iste legure i samo Izvođenje eksperimenta. Eksperimentalna istraživanja se sastoje iz četiri faze. U prvoj fazi izvršeno je spajanje radnih komada od legure aluminijuma 6082-T6 i izmjerene su vrijednosti komponenata sila koje se javljaju tokom procesa FSW (vertikalna sila - F_z , uzdužna sila - F_x i bočna sila - F_y), gdje su dobijeni dijagrami u funkciji vremena. Druga faza se odnosi na mjerjenje temperature T , gdje su dobijeni dijagrami u šest izabranih mernih pozicija preko termo-parova u poprečnom presjeku gornje i donje zone radnog komada, sa istosmjerne strane zavarivanja. U trećoj fazi su izvršena mehanička ispitivanja zavarenog spoja i dobijeni dijagrami istezanja, odnosno vrijednosti zatezne čvrstoće u dva normalna pravca R_{m_x} i R_{m_y} , kao i vrijednosti udarne žilavosti ρ . Četvrta faza se odnosi na metalografska ispitivanja gdje su dobijene slike makro i mikrostrukture zavarenog spoja, na osnovu kojih je moguće uraditi određenu analizu. Nakon ovako dobijenih rezultata izvršena je optimizacija geometrijskih i kinematskih parametara na osnovu vertikalne sile F_z po standardnoj proceduri. Formiran je matematički model optimizacionog procesa, tj. regresionom analizom su određeni koeficijenti modela i izračunata disperzija, a zatim urađena provjera adekvatnosti modela i ocjena signifikantnosti koeficijenata regresije. Izvršeno je modeliranje eksperimentalno dobijenih parametara procesa FSW i određeni su koeficijenti regresije.

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U radu je urađena i numerička simulacija procesa FSW u softverskom paketu DEFORM-3D, gdje su dobijeni dijagrami sila zavarivanja i temperature za početne uslove identične eksperimentalnim istraživanjima. Da bi se dobili relevantni zaključci urađena je obrada podataka u programskom jeziku MATLAB.

Na osnovu prethodno urađenog, izvršena su poređenja i detaljne analize dobijenih rezultata, odakle se izvode određeni zaključci:

- ◆ Postupak zavarivanja FSW je relativno nova i aktuelna tehnologija. Karakterišu je složeni procesi koji se odvijaju u zoni zavarivanja, uslovjeni dejstvom mnogobrojnih uticajnih i međusobno povezanih faktora, kao što su geometrija alata, faktori režima zavarivanja (kinematski faktori), osobine materijala koji se zavaruju itd.
- ◆ Na osnovu analiziranih prednosti i nedostataka postupka FSW, možemo zaključiti da je proces FSW, ekološki jedan od najčistijih procesa zavarivanja bez štetnih dejstava na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Nema štetnih isparenja, ni svjetlosnog bljeska koji karakteriše sve konvencionalne postupke zavarivanja.
- ◆ Proces je složen, stohastičan sa malo do sada poznatih egzaktnih rezultata, te je bilo neophodno izvršiti precizna eksperimentalna mjerenja istraživanih parametara. U ovom radu je stvorena relativno dobra eksperimentalna, mjerna i informaciona osnova, koja obezbjeđuje pouzdane rezultate. Korišćena su dva posebna informaciona mjerna sistema: za mjerjenje komponenti sila zavarivanja i za mjerjenje temperature. Analogno-digitalna oprema koja je korišćena za mjerjenje komponenti sila koje se javljaju tokom procesa FSW, zajedno sa pomoćnim priborom, može se koristiti i za ispitivanja drugih procesa npr. procesa iz obrade rezanjem. Za mjerjenje temperature korišćen je pouzdan i praktičan informaciono mjerni sistem koji se može koristiti i za druge vrste mjerjenja u okviru navedenog procesa, ali i za slične tehnologije, kod kojih temperatura ima važnu ulogu u odvijanju samog procesa. Digitalni podaci dobijeni pomoću ovakvih informacionih mjernih sistema, pogodni su za dalje korišćenje i obradu putem savremenih softvera kao što je MATLAB, pa se obrada podataka može automatizovati.
- ◆ U eksperimentalnim istraživanjima izvršeno je uspješno spajanje legure aluminijuma 6082-T6 debljine 7.8 mm, korišćenjem postupka spajanja deformisanjem - FSW i utvrđeno je da na kvalitet spoja veliki uticaj imaju dimenzije alata (prečnik čela alata, prečnih trna alata i ugao nagiba trna alata) i režimi zavarivanja (brzina zavarivanja i ugaona brzina okretanja alata).
- ◆ Na osnovu svih dosadašnjih i sopstvenih istraživanja koja su izvršena u ovom radu može se generalno reći da proces FSW karakterišu sledeće osobenosti tečenja materijala: kompleksno, trodimenzionalno tečenje materijala (translacija, rotacija i vertikalno tečenje); pojava fenomena miješanja i istiskivanja materijala; neki djelovi materijala radnog komada rotiraju oko vrha trna alata više puta; javlja se tačka stagnacije ispred vrha trna alata; odvija se dinamička rekristalizacija; javlja se visko-plastična deformacija; deformacija oko alata nije osnosimetrična; deformacija zavisi od karakteristika materijala, geometrije alata i parametara procesa; javlja se velika brzina deformacije u blizini vrha trna i čela alata.

- ◆ Prilikom izvođenja eksperimentalnih istraživanja u nekim tačkama eksperimentalnog plana prisutan je „tunel“ efekat, koji se javlja samo na strani gdje se smjer zavarivanja poklapa sa smjerom okretanja alata. To je zapreminska greška koja se najčešće javlja pri velikoj brzini zavarivanja ali i zbog neusklađenih odnosa prečnika trna alata i prečnika čela alata. Dobija se kao rezultat nedovoljnog transporta materijala oko trna alata do istosmrne strane. Zbog osobine kontinuiteta procesa FSW, „tunel“ efekat je neprekidan. „Tunel“ efekat se može izbjegći relativno jednostavno, pravilnim izborom odnosa parametara zavarivanja.
- ◆ Prilikom odvijanja procesa FSW na suprotnosmjernoj strani formira se i efekat koji je poznat pod imenom „bljesak“. On može biti minimiziran (ali ne i eliminisan) pravilnim izborom istraživanih polaznih parametara. Prisutan je na svim zavarenim radnim komadima u manjoj ili većoj mjeri. Dizajniranjem alata sa profilisanim čelom i optimalnom vertikalnom silom F_z koja pritiska zavarivane radne komade može se svesti na minimum.
- ◆ Kod procesa FSW moži biti prisutan manjak penetracije korjene strane šava, koja je obično rezultat većeg rastojanja između vrha trna alata i oslone ploče. Da bi razdaljina mogla biti veća potrebno je da se unese veća količina toplote u zavarivani materijal. Ovo rastojanje uglavnom zavisi od legure koja se zavaruje i od oblika trna alata.
- ◆ Prilikom primjene programa DEFORM-3D, na numeričko simuliranje procesa FSW, potrebno je uključiti niz specifičnosti vezanih za istraživani slučaj, što iziskuje osim poznavanja metode konačnih elemenata i poznavanje fizikalnosti problema:
 1. U oblasti razmekšanog materijala zbog složene geometrije alata i velikih deformacija, javlja se visoka nelinearost.
 2. Usled interakcije, površine alata sa hladnim osnovnim materijalom, javlja se visko-plastično tečenje. Ovo dovodi do potrebe za hibridnom formulacijom, koja je u mogućnosti da modelira oba fenomena: mehaniku čvrstog tijela i mehaniku fluida.
 3. Prilikom odvijanja procesa FSW dolazi do gubljenja viskoziteta, što može značajno da utiče na stvaranje topline, pa je i predviđanje visko-plastičnog tečenja izuzetno značajno.
 4. Toplota koja se stvara tokom odvijanja procesa FSW zavisi od koeficijenta trenja, koji može da varira u zavisnosti od stanja površine, vertikalne sile i temperature.
 5. Tokom odvijanja procesa mora se uzeti u obzir i protok topline kroz alat i oslonu ploču, jer značajno utiču na termička polja u materijalima i na termičku efikasnost postupka FSW.
- ◆ Ulagani parametri zavarivanja (geometrijski i kinematski) utiču na temperaturu, naponska stanja i mikrostrukturu zavarenog spoja, koji su od značaja za upravljanje procesom FSW. Pomoću dobijenih modela se takođe mogu procijeniti karakteristike procesa, koje se eksperimentalnim putem teško mogu odrediti: deformacije, brzine deformacija i naponi. Modeli se mogu koristiti za izbor

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

geometrijskih odnosa alata, kao i dobijanje optimalnih parametara odnosa brzine zavarivanja i ugaone brzine okretanja alata.

- ◆ Sprovedenom vizuelnom analizom, utvrđeno je da su u najvećoj mjeri dobijeni šavovi dobrog oblika, bez površinskih nedostataka sa gornje i sa donje strane zavarenih radnih komada. U 17. tački eksperimentalnog plana vidno je prisutan „tunel“ efekat, zbog velike brzine zavarivanja od 200 mm/min i neusklađenih odnosa prečnika čela alata i trna alata uz veliki ugao nagiba trna alata, što je rezultiralo šavom dosta lošeg kvaliteta. Ovaj efekat je izražen i u tačkama eksperimentalnog plana broj 2, 6, 18 i 22.
- ◆ Kod dobijenih vrijednosti vertikalne sile zavarivanja F_z , za sve ulazne parametre jasno se izdvajaju tri oblasti. Oblast uticaja većeg prečnika čela alata od 28 mm, gdje se dobijaju najveće vrijednosti vertikalne sile F_z . Oblast uticaja manjeg prečnika čela alata od 25 mm gdje se dobijaju najmanje vrijednosti vertikalne sile i oblast u centralnim tačkama plana za vrijednost prečnika čela alata od 26.46 mm. Ove tri oblasti se izdvajaju i kod rezultata dobijenih eksperimentalnim i kod rezultata dobijenih numeričkim putem. Slično se dešava i kod temperature, gdje se takođe izdvajaju tri temperaturne oblasti u odnosu na prečnik čela alata. U oblasti gdje je prečnik čela alata 28 mm zbog velike površine kontakta alata i materijala, dobijaju se najveće vrijednosti temperature, dok se u oblasti uticaja čela alata od 25 mm dobijaju najmanje vrijednosti temperature.
- ◆ Poređenjem komponenata sila F_z , F_x i F_y , dobijenih eksperimentalnim putem i numeričkom simulacijom, vidimo da sve komponente imaju sličan karakter promjene i dobijene vrijednosti su istog reda veličine. Maksimalne vrijednosti vertikalne sile F_z se dobijaju kada se alat ukopava u materijal. Kod eksperimentalnih istraživanja na samom početku kada alat ostvari konatakt sa radnim komadima sila naglo poraste, potom blago opada dok čelo alata ne dohvati radne komade kada se dobija maksimalna vrijednost. Odstupanja su vidljiva kod DEFORM rezultata, gdje u zoni ukopavanja materijala sila blago raste, a maksimum dostiže kada čelo alata dohvati simulirane radne komade. Kada alat počne da se kreće konstantnom brzinom zavarivanja sve komponente zadržavaju svoje vrijednosti koje su pozitivne. Možemo zaključiti da numerička simulacija uspješno modelira sile zavarivanja.
- ◆ Poređenjem izmjerene temperature u šest mjernih pozicija eksperimentalnim putem i numeričkom simulacijom možemo konstatovati da dijagrami za sve tačke eksperimentalnog plana imaju sličan karakter promjene. Na rastojanju 7 mm od linije spajanja sve dobijene vrijednosti temperature numeričkom simulacijom su veće od eksperimentalnih. Kako se rastojanje od linije spajanja povećava tako se dobijaju sve manje vrijednosti. Na rastojanju od 20 ± 2 mm dobijene vrijednosti temperature se poklapaju sa eksperimentalnim, a na rastojanju od 27 mm su niže od eksperimentalnih. Zaključuje se da se generisanje toplotne kod postupka FSW uspješno može simulirati korišćenjem softvera DEFORM-3D.
- ◆ Poređenjem dobijenih eksperimentalnih i modelskih vrijednosti, korišćenjem modela sa kvadratnom funkcijom odziva, može se konstatovati da postoje manja odstupanja, ali je modeliranje sila, temperature, zatezne čvrstoće i udarne žilavosti relativno uspješno realizovano.

- ◆ Na vrijednosti zatezne čvrstoće najveći uticaj ima prečnik čela alata, pa su se izdvojile tri oblasti vrijednosti zatezna čvstoće. U drugoj oblasti gdje su vrijednosti sile i temperature najmanje, doble su se najveće vrijednosti zatezne čvrstoće i obrnuto, gdje su vrijednosti sile i temperaturre velike doble su se male vrijednosti zatezne čvrstoće. Za vrijednosti parametara zavarivanja $v=200$ mm/min, $\omega=630$ o/min, $\alpha=5^\circ$, $d=5$ mm i $D=25$ mm dobila se najveća vrijednost zatezne čvrstoće Rm_x . Karakteristično je i to da su dobijene vrijednosti izduženja u uzdužnom pravcu veće od osnovnog materijala, što je posledica dinamički rekristalizovanog materijala u „grumen“ zoni, pa se materijal ponaša kao superplastičan. U bočnom pravcu uzorci se uglavnom kidaju u zoni uticaja toplote - HAZ, zbog prisustva zaostalih napona, koji su oslabili mehaničke karakteristike materijala.
- ◆ Kod ispitivanja udarne žilavosti najmanje vrijednosti se dobijaju u uzorcima kod kojih je zastupljen „tunel“ efekat, a sve dobijene vrijednosti udarne žilavosti su manje od vrijednosti dobijenih ispitivanjem osnovnog materijala. Na osnovu izvedene analize, možemo zaključiti da se najbolje vrijednosti udarne žilavosti dobijaju u centralnim tačkama eksperimentalnog plana.
- ◆ Ispitivanjem makrostruktture FSW uzorka utvrđeno je postajanje nekoliko mikrostrukturnih zona: zone osnovnog materijala - OM, zone uticaja toplote - HAZ (*Heat Affect Zone*), zone termo-mehaničkog uticaja - TMAZ (*Thermo-Mechanically Affect Zone*) i „grumen“ zone - NZ (*Nugget Zone*).
- ◆ Izvršena je optimizacija parametara procesa na osnovu vertikalne sile zavarivanja - F_z , sa ciljem da se minimizira utrošak energije. Gradijentnom metodom se dolazi do vrijednosti geometrijskih faktora alata $D=25.8$ mm, $d=5.8$ mm i $\alpha=3.4^\circ$, za definisane početne uslove, kao i kinematskih faktora $v=230$ mm/min i $\omega=840$ o/min. Možemo zaključiti da je proces uspješno optimiziran primjenom Boks-Vilsonovog gradijentnog metoda u konkretnim uslovima zavarivanja.
- ◆ Može se zaključiti da je za zavarivanje legure aluminijuma 6082-T6 postupkom FSW pogodnije koristiti veću brzinu zavarivanja pri manjoj ugaonoj brzini, što ima za posledicu automatsko povećanje produktivnosti uz šav zadovoljavajućeg kvaliteta. Takođe se može zaključiti da je bolji manji ugao nagiba trna alata, kao i manji odnos prečnika trna i čela alata, za razmatrane intervale varijacije ulaznih parametara.
- ◆ Budućnost procesa FSW je u kompleksnom međusobno spregnutom istraživanju: teorije, eksperimenta i simulacije.
- ◆ Dalji razvoj procesa FSW treba da bude usmjeren u više pravaca. Treba istraživati mogućnosti primjena i na druge materijale, a posebno na raznorodne. Poboljšanja u vezi konstrukcije alata, oblika trna i čela. Težnja je da se proces FSW automatizuje odnosno robotizuje i da se otklone određeni nedostaci kako bi se povećao kvalitet zavarenog spoja i produktivnost, a samim tim proširila industrijska primjena uz smanjenje potrošnje energije.
- ◆ Formirani numerički model je moguće primijeniti na rješavanje praktičnih industrijskih problema. Model je pogodan kada je u pitanju familija sličnog oblika

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

alata, pa je pravac budućih istraživanja formiranje generalizovanog modela za razne oblike trna i čela alata.

- ◆ Jedan od budućih pravaca je i eksperimentalno određivanje naponsko deformacionog stanja procesa FSW, korišćenjem nekog od metoda fizičke diskretizacije.
- ◆ U ovom radu je formirana baza podataka, na osnovu koje je moguće formiranje ekspert sistema za automatsko projektovanje procesa FSW, dakle, stvorena je osnova koja se može dorađivati i dopunjavati novim podacima, savremeno istraživačko mjesto, pokrivenost najsavremenijim softverima i velika raznovrsnost u pogledu korišćenih materijala.
- ◆ Na ovaj način su u disertaciji potvrđene postavljene hipoteze, a samim tim i opravdanost sprovedenih opsežnih istraživanja.

LITERATURA

1. Aalberg A., Langseth M., Larsen P.: Stiffened Aluminium Panels Subjected to Axial Compression. *Thin-Walled Structures*, 2001. 39(10): p. 861-885.
2. Ajvaz V.: Merenje deformacija i naprezanja u strojarstvu i građevinarstvu. Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.
3. Arbegast J. W.: Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Welding Journal*. March 2006.
4. Askari A., Silling S., London B., Mahoney M.: Modeling and Analysis of FSW Processes. The Minerals, Metals and Materials Society, Indianapolis, U.S.A., 2001, pp. 43-54. Edition: 06/2003 Page 10 of 14.
5. Benavides S., Li Y., Murr L., Brown D., McClure J.: Low-Temperature Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum. *Scripta Materialia*, 1999. 41(8): p. 809-815.
6. Bendzsak G., North T., Smith C.: An Experimentally Validated 3D Model for Friction Stir Welding. *Proceedings of the 2nd. International Symposium, Gothenburg on Friction Stir Welding*, Sweden, 2000.
7. Bendzsak J. G., North H. T., Li Z.: Numerical Model for Steady-State Flow in Friction Welding. *Acta Mater*, 45(4), pp. 1735-1745, 1997.
8. Bjorneklett B., Frigaard O., Grong O., Myhr O., Midling O.: Modelling of Local Melting During FSW. *Aluminum Alloys*, Vol. 3, 1998, pp.1531 - 1536.
9. Bjorneklett I. B., Grong O., Myhr R. O., Kluken O. A.: A Process Model for the Heat- Affected Zone Microstructure Evolution in Al-Zn-Mg Weldments. *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 30A, 1999, pp.2667 - 2677.
10. Booth D., Sinclair I.: Fatigue of Friction Stir Welded 2004-T351 Aluminium Alloy. *Material Science Forum*, 396-402: p. 1671-1676 (2002).
11. Bruggemann G., Mahrle A., Benziger T.: Comparison of Experimental Determined and Numerical Simulated Temperature Fields for Quality Assurance at Laser Beam Welding of Steels and Aluminium Alloyings. *NDT & E International*, 2000. 33(7): p. 453-463.
12. Burford D. A., Tweedy B., Widener C.: Influence of Shoulder Configuration and Geometric Features on FSW Track Properties. *6th International Symposium on Friction Stir Welding* D.A. Burford, Canada, October 10-13, 2006.
13. Chanda T., Zhou J., Kowalski L.: 3D FEM Simulation of the Thermal Events during AA6061 Aluminium Extrusion. *Scripta Materialia*, 41(2), pp. 195-202, 1999.
14. Chao Y., Xinhai Q.: Thermal and Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6. *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, 7 (10), 1998, pp. 215 to 233.
15. Chen C., Kovacevic R.: Wavelet Transform Analysis of Acoustic Emission in Monitoring Friction Stir Welding of 6061 Aluminum. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003. 43(13): p. 1383-1390.

LITERATURA

16. Chen C., Kovacevic R.: Thermo-Mechanical Modeling and Force Analysis of Friction Stir Welding by Finite Element Method. *Journal Mechanical Engineering Science.* Vol. 218 Part C.
17. Chen C., Kovacevic R.: Finite Element Modeling of Friction Stir Welding-Thermal and Thermo-Mechanical Analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1319-1326.
18. Chen C., Kovacevic R.: Joining of Al 6061 Alloy to AISI 1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding. *International Journal of machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 1205-1214.
19. Cho J., Boyce E. D., Dawson R. P.: Modeling Strain Hardening and Texture Evolution in Friction Stir Welding of Stainless Steel. October 2004.
20. Colegrove P.: 3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process. In proceedings of the 2nd International Symposium on FSW. Sweden. August 2000.
21. Colegrove P.: Steady State and Transient Thermal Modelling of Thick Section Friction Stir Weld Aluminium Alloys. Proceedings of the IIW Asian Pacific Welding Congress, Australia, 2000.
22. Colligan K.: Dynamic Material Deformation during FSW of Aluminium. Proceedings of the 1st International Symposium on FSW, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
23. Colligan K.: Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium. *Welding Journal*, july 1999.
24. Crawford R., Bloodworth T., Cook G. E., Strauss A. M., Hartman D. A.: High Speed FSW Process Modeling. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
25. Čamagić I., Burzić Z., Cvetković S.: Primena mehanike loma u određivanju parametara rasta zamorne prsline za karakteristične oblasti zavarenog spoja. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (3/2008), str. 97-103.
26. Ćirić R., Odanović Z., Grabulov V., Raić K.: Strukturne promene kod rotacionog zavarivanja trenjem različitih čelika. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (2/2007), str. 43-53.
27. Davis J.: Aluminum and Aluminum Alloys. *ASM Specialty Handbook*. 1993,
28. Dawes C., Thomson W.: Friction stir joining of aluminium alloys, *TWI Bulletin* 6, 1995, pp. 124-127.
29. Defalco J.: Friction Stir Welding VS. Fusion Welding. *Welding Journal*. March 2006.
30. DEFORM Manual - SFTC.
31. Deng X., Xu S.: Solid Mechanics Simulation of Friction Stir Welding Process. *Transactions of NAMRI/SME*, SME Vol. XXIX, p. 631-638, 2001, Society of Manufacturing Engineers.
32. Dickerson T. Przydatek J.: Fatigue of Friction Stir Welds in Aluminium Alloys that Contain Root Flaws. *International Journal of Fatigue*, 2003. 25(12): p. 1399-1409.
33. Dickerson T., Shi Q., Shercliff H.: Heat Flow Into Friction Stir Welding Tools. in 4th International Symposium on Friction Stir Welding. May 2003. Park City, Utah, USA.

34. Ding J., Carter R., Lawless K., Nunes A., Russell C., Suits M., Schneider J.: Friction Stir Welding Flies High at NASA. *Welding Journal*. March 2006.
35. Domazetovic V., Janjic M., Savicevic S., Vukcevic M.: The Information Measuring System for Recording Workingpiece Contour fnd its Computer Modelling for Bulk Metal Forming in Open Die. *WSEAS Transactions on Computers*, Issue 11, Volume 4, November 2005.
36. Domazetović V., Janjić M., Šibalić N.: Određivanje faktora trenja metodom optimizacije. *Tehnika*. Beograd. 4/2006.
37. Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Prilog istraživanju zapreminskog deformisanja primjenom metoda diskretizacije. 27. savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Niš, 1998.
38. Dong P., Lu F., Hong J., Cao Z.: Analysis of Weld Formation Process in FSW. *Proceedings of the 1st International Symposium on FSW*, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
39. Dong P., Lu F., Hong J., Cao Z.: Coupled Thermomechanical Analysis of Friction Stir Welding Process Using Simplified Models. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6 (5), 2001, pp.281- 287.
40. Donne Dalle C., Lima E., Wagener J., Pyzalla A., Buslaps T.: Investigations on Residual Stresses in Friction Stir Welds. *3rd International Symposium of Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 27 and 28 September. 2001. TWI (UK).
41. Du H., Hu L., Liu J., Hu X.: A Study on the Metal Flow in Full Penetration Laser Beam Welding for Titanium Alloy. *Computational Materials Science*, 2004. 29(4): p. 419-427.
42. Dubourg L., Dacheux P.: Design and Properties of FSW Tools: a literature review. *6th International Symposium on Friction Stir Welding* D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
43. Dubourg L., Gagnon F. O., Nadeau F., Georges L., Jahazi M.: Process Window Optimization for FSW of Thin and Thick Sheet Al Alloys Using Statistical Methods. *6th International Symposium on Friction Stir Welding* D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
44. Đurđanović M. B.: Perspektiva primene toplove generisane trenjem u obradi metala, *Tehnika* 6/2003, Mašinstvo 52 (2003) 6, st. 1- 7.
45. Đurđanović M. B., Mijajlović M. M., Milčić D. S., Stamenković D. S.: Heat generation during friction stir welding process. *Tribology in industry*. 2009, vol. 31, br. 1-2, str. 8-14.
46. Ericsson M., Sandstrom R.: Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Weld, and Comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*, 2003. 25(12): p. 1379-1387.
47. Flores V. O., Kennedy C., Murr E. L., Brown D., Pappu S., Nowak M. B., McClure C. J.: Microstructural Issues in a Friction-Stir-Welded Aluminium Alloy. *Scripta Materialia*, 38(5), pp. 703-708, Elsevier Science Ltd, 1998.
48. Fonda W. R., Lambrakos S. G.: Analysis of Friction Stir Welds Using an Inverse - Problem Approach. *The Minerals, Metals and Materials Society*, Indianapolis, U.S.A., 2001, pp.131 – 137.
49. Fonda W. R., Bingert F. J., Colligang J. K.: Microstructural Development in Friction Stir Welding. *Chemical/Biochemical Research* 2005 NLR Review, 121-122.

LITERATURA

50. Fratini L., Zuccarello B.: An Analysis of Through-Thickness Residual Stresses in Aluminium FSW Butt Joints. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. 46(6): p. 611-619.
51. Frigaard O., Grong O., Bjorneklett B., Midling T. O.: Modelling of Thermal and Microstructure Fields During Stir Welding of Aluminium Alloys. Proceedings of the 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
52. Frigaard O., Grong O., Midling T. O.: A Process Model for FSW of Age Hardening Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 32A, 2001, pp. 1189-1200.
53. Frigaard O., Grong O., Midling T.: Modelling of Heat Flow Phenomena in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. Proceedings of the INALCO'98, Cambridge, U.K., 1998, pp. 208- 218.
54. Frigaard O.: A Process Model for FSW of Age Hardening Aluminium Alloys. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 1999.
55. Fujii H., Kato H., Nakata K., Nogi K.: FSW of High Temperature Materials (Mo, Ti). 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
56. Ganev N., Marek J., Slama P.: Structure Characteristics of Al-Plate Joined by Friction Stir Welding. Materials Structure, vol. 12, no. 2 (2005).
57. Gercekioglu E., Eren T., Yildizli K., Salamci E.: The Application of FSW Method to the Al Alloy of AA 6063-T6 Pipe Using Milling Machine. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
58. Goetz L. R., Jata V. K.: Modeling FSW of Titanium and Aluminium Alloys. The Minerals, Metals and Materials Society, Indianapolis, U.S.A., 2001, pp. 35- 41.
59. Gould J. E., Feng, Z.: Heat Flow Model for FSW of Aluminum Alloys. Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 7, 1998, pp.185 – 194.
60. Gould J. E., Chuko W.: Investigating Resistance and Friction Stir Welding Processes for Joining Magnesium. Welding Journal, march 2006.
61. Graham G., Steffen D.: Pro/Engineer 2001. Komputer biblioteka, 2002.
62. Guerdoux S., Fourment L.: Ale Formulation for the Numerical Simulation of Friction Stir Welding. VIII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VII. Barcelona, 2005.
63. Guerra M., McClure J., Murr L., Nunes: Metal Flow during FSW. Proceedings of the Friction Stir Welding and Processing, 2001, pp. 25 - 34.
64. Guerra M., Schmidt J., McClure J., Murr L., Nunes A.: Flow Patterns During Friction Stir Welding. Materials Characterization 49 (2003) 95-101.
65. Hartley P., Pillinger I., Sturgess C.: Numerical Modelling of Material Deformation. Springer-Verlag, London, 1992.
66. Hashimoto T., Takeda J., Miyamichi T., Namba K.: Studies on Characteristics of FSW Joints in Structural Aluminium Alloys - Part 3. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, Canada, October 10-13, 2006.
67. Heinemann J., Tuchfeid J.: Ispitivanje spojeva različitih metala šava. Zavarivanje i zavarene konstrukcije (4/2008), str. 165-175.

68. Hoffman E., Harley R., Wagner J., Jegley D., Pecquet R., Blum C., Arbegast W.: Compression Buckling Behavior of Large-Scale Friction Stir Welded and Riveted 2090-T83 A1-Li Alloy Skin-Stiffener Panels, in NASA/TM-2002- 211770. 2002.
69. Hori H., Tanikawa H., Seo N., Namba K.: Studies on Characteristics of FSW Joints in Structural Al Alloys - Part 2. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
70. Ishikawa T., Fuji H., Iwaki S., Matsuoka S., Nogi K.: High-Speed Friction Stir Welding of 304 Stainless Steel. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
71. Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Experimental-Numerical Determination of Factor Friction. 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, UK, 2004.
72. Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Određivanje faktora trenja metodom konačnih elemenata. XXX JUPITER Konferencija, Beograd, april 2004.
73. Janjić M., Vukčević M., Hartley P.: Comparing of Modeling Metal Forming Processes by Finite Element Method and Experimental-Theoretical Discretization Method. First National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering - ASME Greek Section, Patras, Greece, 2001.
74. Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: Determination of Kinematics State by Physical Discretization Method at Bulk Metal Forming. 12th International Research/Expert conference TMT 2008. İstanbul, Turkey. 2008.
75. Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: Mjerenje temperature kod procesa zavarivanja trenjem. KOD - 2008. Tivat. 2008.
76. Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: Strain modeling at Axi-Symmetrical Deformation in Open Dies. 11th International Research/Expert conference TMT 2007. Tunis. 2007.
77. Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: Temperature Measurement in FSW Process. 7th International scientific conference on production engineering. RIM 2009. Cairo.
78. Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: The Information Measuring System for Recording Free Workingpiece Contour and Deformation Force for Bulk Metal Forming. Tehnička dijagnostika (Broj 3. 2007 godina) ISSN 1451-1975.
79. Janjić M.: Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja - Doktorska disertacija. Mašinski fakultet, Podgorica, 2005.
80. Jata K., Mahoney M., Mishra R., Lienert T.: Friction Stir Welding and Processing III, TMS 2005. 0-87339-584-0.
81. Jata K., Semiatin S.: Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. Scripta Materialia, 2000. 43(8): p. 743-749.
82. Jiang H. W., Kovacevic R.: Feasibility Study of Friction Stir Welding of 6061-T6 Aluminium Alloy with AISI 1018 Steel. Proceedings of the I MECH E PART B Journal of Engineering Manufacture, Volume 218, Number 10, 1 October 2004. pp. 1323-1331
83. Jun J.H., Ayer R.: Precipitation Behavior of Ni Base Alloys during Friction Stir Welding. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.

LITERATURA

84. Kalajdžić M.: Metod konačnih elemenata. Institut za alatne mašine i alate, Beograd, 1978.
85. Kallee S., Nicholas D.: Friction and Forge Welding Processes for the automotive industry. in International Body Engineering. September 1999. Detroit, USA.
86. Kallee S., Nicholas E., Thomas W.: Friction Stir Welding - Invention, Innovations and Applications. in INALCO 2001 - 8th International Conference on Joints in Aluminium. March 2001. Munich, Germany.
87. Kalpakjian S.: Manufacturing Engineering and Technology. Addison-Wesley Publishing Company, USA 1992.
88. Kamioka M., Okubo K., Namba K.: Studies on Characteristics of FSW Joints in Structural Aluminium Alloys -Part 4. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
89. Kasi S., Murr L.: Complex Flow Phenomena Associated with FSW of Aluminium Alloys. Proceedings of the FSW and Processing, 2001, pp. 139 - 150.
90. Khan A. J., Xu L., Chao Y., Broach K.: numerical Simulation of Resistance Spot Welding Process. Journal of Numerical Heat Transfer, Part A., Vol. 37, No. 5, pp. 425-446.
91. Khandkar M., Khan J.: Thermal Modelling of Overlap FSW for Al-Alloys. Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, vol. 10, no. 2, 2001, pp. 91-105.
92. Kulekci K. M., Mendi F., Sevim I., Bastuk O.: Fracture Toughness of Friction Stir Welding Joints of AlCu₄SiMg Aluminium Alloy. Metalurgija 44 (2005) 3. 209-213.
93. Laković R., Nikolić B.: Primijenjena statistika 2. dio, Eksperiment. Univerzitet Crne Gore, Podgorica 1999.
94. Leal R., Loureiro A.: Defects Formation in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. Advanced Materials Forum II, 2004. 455-456: p. 299-302.
95. Li Y., Murr L., McClure J.: Solid-State Flow Visualization in the Friction Stir Welding of 2024 al to 6061 al, Scripta materialia 40 (9) (1999) 1041-1046.
96. Lienert T., Gould, J.: FSW of Mild Steel. Proceedings of the 1st International Symposium on FSW, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
97. Lienert T., Stellwag W., Grimmett B., Warke R.: Friction Stir Welding Studies on Mild Steel - Process Results, Microstructures, and Mechanical Properties are Reported. Welding Journal, 2003. 82(1): p. 1S-9S.
98. Lienert T., Tang W., Hogeboom J., Kvidahl L.: Friction Stir Welding of DH-36 Steel. in AWS 2003 Professional Program & Poster Session. 2003.
99. Liu G., Murr L., Niou C., McClure J., Vega F.: Microstructural Aspects of the Friction-Stir Welding of 6061-T6 Aluminum. Scripta Materialia, 1997. 37(3): p. 355-361.
100. Lockwood W., Tomaz B., Reynolds A.: Mechanical Response of Friction Stir Welded AA2024: Experiment and Modeling. Materials Science and Engineering, A323, 2002, pp. 348- 353.
101. Lohwasser D.: FSW for A350 Aircraft. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
102. London B., Mahoney M., Bingel W., Calabrese M., Waldron D.: Experimental Methods for Determining Material Flow in Friction Stir Welds. Third International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe. Japan. 27-28 Sept. 2001. 7 pp. 2002.

103. Luan G., Ji Y., Jian B.: Primary Study on FSW of the Lightweight Aircraft Structures. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
104. Lumsden B. J., Mahoney W. M., Pollock G., Rhodes G.C.: Intergranular Corrosion Following Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 7075-T651. Corrosion - Vol. 55, No. 12.
105. Mandić V.: Fizičko modeliranje i numerička simulacija kao osnova novog koncepta projektovanja alata za topnu zapreminsku obradu - Doktorska disertacija. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002.
106. McClure J., Tang W., Murr L., Guo X., Feng Z., Gould J.: A Thermal Model of Friction Stir Welding. Proceedings of the 5th. International Conference, Trends in Welding Research, U.S.A., 1999, pp.590 – 595.
107. Midling O. T., Rorvik G.: Effect of Tool Shoulder Material on Heat Input During FSW. Proceedings of the 1st International Symposium on FSW, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
108. Midling O.: Material Flow Behavior and Microstructural Integrity of Friction Stir Butt Weldments. Proceedings of the 4th International Conference on Aluminum Alloys, Atlanta, Georgia, USA, 1994, pp.451-458; Edition: 06/2003 Page 11 of 14.
109. Mishra S. R., Mahoney W. M.: Friction Stir Welding and Processing. ASM International, 2007.
110. Mononen J. T.: FSW of PH 15-7 Stainless Steel Sheet. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
111. Murr L., Li Y., McClure: Flow Visualization and Residual Microstructures Associated with the Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum. Materials Science and Engineering, vol. A271, 1999, pp. 213 - 223.
112. Musafija B.: Primijenjena teorija plastičnosti, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 1973.
113. Negre P., Steglich D., Brocks W., Kocak M.: Numerical Simulation of Crack Extension in Aluminium Welds. Computational Materials Science, 2003. 28(3-4): p. 723-731.
114. Nicholas E., Kallee S.: Friction Stir Welding - a decade on. in IIW Asian Pacific International Congress. 2000. Sydney.
115. North H. T., Bendzsak J. G., Smith C.: Material Properties Relevant to 3- D FSW Modelling. Proceedings of the 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000.
116. Oertelt G., Babu S., David S., Kenik E.: Effect of Thermal Cycling on Friction Stir Welds of 2195 Aluminum Alloy. Welding Journal, 2001. 80(3): p. 71S-79S.
117. Okada T., Kida K., Iwaki S., Eguchi N., Ishikawa T., Oiwa N., Namba K.: Studies on Characteristics of FSW Joints in Structural Al Alloys - Part 1. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
118. Ouyang H. J., Kovacevic R.: Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the Same and Dissimilar Aluminum Alloys. Journal of Materials Engineering and Performance. Volume 11(1) February 2002-1.

LITERATURA

119. Paik J., van der Veen S., Duran A., Collette M.: Ultimate Compressive Strength Design Methods of Aluminum Welded Stiffened Panel Structures for Aerospace, Marine and Land-Based Applications. A benchmark study. *Thin-Walled Structures*, 2005. 43(10): p. 1550-1566.
120. Panneerselvam K., Aravindan S., Noorul Haq A., Karthikeyan: Investigation and Analysis of Friction Stir Welding Parameters on Metal Matrix Composite (Al-SiC). International Conference on Advanced Materials and Composites (ICAMC-2007), Oct 24-26, 2007. Organized by National Institute for interdisciplinary Science & Technology, CSIR, Trivandrum.
121. Paris P., Gomez P., Anderson W.: A Rational Analytic Theory of Fatigue. *The Trend in Engineering*, 1961. 13(1): p. 9-14.
122. Pavlović A.: Osnovi teorije planiranja faktornog eksperimenta. Niš, 1980.
123. Pechiney R.: Aluminium semi-finished product.
124. Plančak M.: Naponsko-deformaciono stanje u procesima hladnog istiskivanja čelika. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 1984.
125. Plančak M.: Pojmovnik iz obrade deformisanjem, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
126. Prangnell B. P., Heason P. C.: Grain Structures in Al-Alloy Friction Stir Welds Observed by Stop-Action Technique. *International Journal of Offshore and polar Engineering*. Vol. 14, No. 4. December 2004 (ISSN 1053-5381).
127. Prevey P., Hornbach D., Mason P., Mahoney M.: Improving Corrosion Fatigue Performance of AA 2219 Friction Stir Welding Low Plasticity Brushing, International Surface Engineering Conference, Oct. 7-10, 2002, Columbus, OH.
128. Quyang J. Kovacevic R.: Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the same and Dissimilar Aluminium Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol.11, 2002, pp. 51 - 63.
129. Reynolds A., Seidel U.T.: Visualization of Material Flow in an Autogenous Friction Stir Weld", Proceedings of the 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
130. Reynolds A.: Visualization of Material Flow in Autogenous Friction Stir Welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol.5, no.2, 2000, pp. 120 - 124.
131. Rhodes C., Mahoney M., Bingel W., Spurling R., Bampton C.: Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum. *Scripta Materialia*, 1997. 36(1): p. 69-75.
132. Runčev D.: Friction Welding of Aluminium and Alumilium Alloys. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (1/2002), str. 11 - 14.
133. Russell J. M., Shercliff R. H.: Analytical Modelling of FSW. *Proceedings of the INALCO'98*, Cambridge, U. K., 1998, pp 197 – 207.
134. Russell J. M., Shercliff R. H.: Analytical Modelling of Microstructure Development in FSW", Proceedings of the 1st International Symposium on FSW, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
135. Sato T., Otsuka D., Watanabe Y.: Designing of FSW Parameters with Finite Element Flow Simulation. *6th International Symposium on Friction Stir Welding* D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.

136. Schmidt H., Hattel J.: Analysis of the Velocity Field in the Shear Layer in FSW - Experimental and Numerical modelling. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
137. Seidel T., Reynolds A.: Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction-Stir Welds using a Marker Insert Technique. Metallurgical and Materials transactions, vol.32A, no.11, 2001, pp. 2879 - 2884.
138. Sekulović M.: Metod konačnih elemenata. Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
139. Shukla A. K., Baeslack III W. A.: Effect of Process Conditions on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of FSW Thin Sheet 2024-T3. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
140. Simar A., de Meester B., Brechet Y., Pardoen T.: Microstructural Evolution and Local Mechanical Properties Evolution Throughout FSW in Al 6005A. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
141. Song M., Kovacevic R.: Numerical and Experimental Study of the Heat Transfer Process in Friction Stir Welding. Journal Engineering Manufacture. Vol. 217 Part B.
142. Song M., Kovacevic R.: Thermal Modeling of Friction Stir Welding in a Moving Coordinate System and its Validation. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 605-615.
143. Soundararajan V., Kovacevic R.: FSW of Steel to Al Alloy. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
144. Soundararajan V., Zekovic S., Kovacevic R.: Thermo-Mechanical Model with Adaptive Boundary Conditions for Friction Stir Welding of Al 6061. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1577-1587.
145. Stahl A., Sorensen C.: Experimental Measurements of Load Distributions on Friction Stir Weld Pin Tools. Friction Stir Welding and Processing III. A Publication TMS 2005. ISBN 0-87339-584-0
146. Stamenković D., Đurđanović M., Mitić D.: Zavarivanje postupkom "FSW". Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2/2006), str. 59-66.
147. Standard: MEST EN 10002-1:2008. Metalni materijali - Ispitivanje zatezanjem - Dio 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi.
148. Standard: MEST EN 10045-1:1993. Mehanička ispitivanja metala - ispitivanje udarom po Šarpiju - Dio 1: Metoda ispitivanja.
149. Standard: MEST EN 573-1:2008. Aluminijum i legure aluminijuma - Hemski sastav i oblik plastično prerađenih proizvoda - Dio 1: Sistem brojčanog označavanja.
150. Stanić J.: Matematičke osnove tehn-ekonomiske optimizacije obradnih procesa. Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
151. Stanić J.: Metod inženjerskih merenja, uvod u matematičku teoriju eksperimenta, boks vilsonov metod. Mašinski fakultet Beograd, 1975.
152. Stanić J.: Metod inženjerskih mjeranja. Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
153. Stanković Lj., Uskoković Z.: PC MATLAB. Epsilon-Montex, Titograd, 1991.

LITERATURA

154. Steuwer A., Peel M. J., Withers P. J.: Influence of Welding Speed on the Properties of AA5083-AA6082 Dissimilar FSWs. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
155. Stewart, M. B., Adams, G. P., Nunes Jr A. C., Romine, P.: A Combined Experimental and Analytical Modeling Approach to Understanding Friction Stir Welding. Proceedings of the 43rd. International SAMPE Symposium, Anaheim, CA, 1998.
156. Sutton M., Yang B., Reynolds A., Taylor R.: Microstructural Studies of Friction Stir Welds in 2024-T3 Aluminum. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2002. 323(1-2): p. 160-166.
157. Svensson L., Karlsson L., Larsson H., Karlsson B., Fazzini M., Karlsson J.: Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Alloys with Special Reference to AA 5083 and AA 6082. Science and Technology of Welding & Joining, 2000. 5(5): p. 285-296(12).
158. Šibalić N., Janjić M., Vukčević M.: Modelling of Strain and Kinematic Parameters at Axi-Symmetrical Deformation Process in Open Dies. 7th International scientific conference on production engineering. RIM 2009. Cairo, Egypt. 2009.
159. Šibalić N., Vukčević M., Janjić M.: Friction Factor Optimization at bulk Deformation Process. 12th International Research/Expert conference TMT 2008. Istanbul, Turkey. 2008.
160. Šibalić N.: Modeliranje procesa zapreminskog deformisanja korišćenjem metoda fizičke diskretizacije i numeričke simulacije - Magistarski rad. Mašinski fakultet, Podgorica, 2007.
161. Šibalić N.: Modeliranje zapreminskog oblikovanja metala u otvorenim kalupima primjenom metode konačnih elemenata - Diplomski rad. Mašinski fakultet, Podgorica, 2002.
162. Tartakovsky A. M.: Lagrangian Particle Model of Friction Stir Welding. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
163. Thomas M. W., Andrews E. R.: High Performance Tools For Friction Stir Welding. International Patent Application, WO 99/52669.
164. Thomas W., Threadgill P., Nicholas E.: Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Sience and Technology of Welding and Joining, 1999, Vol. 4, No 6, pp. 365-372.
165. Thomas W., Dolby R.: Friction Stir Welding Developments. in 6th International Conference on Trends in Welding Research. April 2002. Georgia, USA.
166. Thomas W., Nicholas E., Needham J., Murch M., Temple-Smith P., Dawes C.: Patent - Friction Stir Butt Welding, International Patent No. PCT/GB92/02203, Editor. 1995: GB Patent No. 9125978.8 (1991), US Patent No. 5.460.317.
167. Thomas M. W.: et al 1991 Friction Stir Butt Welding international Patent Application No PCT/GB92/02203. Thomas M. W. et al 1995 Friction Stir Butt Welding GP Patent Application No 9125978.8. Thomas M. W. et al 1995 Friction Stir Butt Welding UP Patent 5.460.317.
168. Totten E. G., MacKenzie D. S.: Handbook of Aluminum. Volume 2, Alloy Production and Materials Manufacturing, 2003. str. 579-601.

169. Threadgill L. P.: Terminology in Friction Stir Welding. Friction Stir Welding Licensees Association. April 2002.
170. Tweedy B., Arbegast W., Allen C.: Friction Stir Welding of Ferrous Alloys Using Induction Preheating. Friction Stir Welding and Processing III. A Publication TMS 2005. ISBN 0-87339-584-0
171. Uematsu Y., Tokaji K., Murata S.: Fatigue Behaviour of FSSW Joints in Al-Mg-Si Alloy. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
172. Ulysse P.: Three-Dimensional Modeling of the Friction Stir-Welding Process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1549-1557.
173. Uyyuru K. R., Kailas V. S.: Numerical Analysis of Friction Stir Welding Process. Journal of Materials Engineering and Performance. Volume 15(5) Octobel 2006-505.
174. Veljić M. D.: Tehnologija zavarivanja aluminijumskih legura trenjem pomoću alata - Magistarski rad. Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
175. Vilaca P., Fraga, E., Correa de Sa J., Quintino L.: Pregled stanja modeliranja zavarivanja trenjem sa alatom - FSW (Friction Stir Welding). Zavarivanje i zavarene konstrukcije (3/2004), str. 141-148.
176. Vukčević M., Hartley P., Domazetović V., Janjić M.: Trodimenzionalno modeliranje procesa deformisanja metodom konačnih elemenata. 28. savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kraljevo - Mataruška Banja, 2000.
177. Vukčević M., Hartley P.: Elastic-Plastic Finite-Element in Metal Forming Analysis, Journal for Technology of Plasticity, N 1-2, 1993.
178. Vukcevic M., Janjic M., Sibalic N.: Deformation Modeling at Bulk Process Forming. 11th International Research/Expert conference TMT 2007. Tunis. 2007.
179. Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Measurement of Forces in a Friction Stir Welding Process. 33rd. Conference on Production Engineering of Serbia 2009, Belgrade, 16-17.06.2009.
180. Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Measurement of Welding Force in a FSW Process. 7th International scientific conference on production engineering. RIM 2009. Cairo. Egypat. 2009.
181. Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Numerical Simulation in Bulk Forming Process. Journal for Technology of Plasticity, Vol. 32 (2007), Number 1-2.
182. Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Stress FEM Simulations of Axis Symmetrical Element. 12th International Research/Expert conference TMT 2008. Istanbul. Turkey. 2008.
183. Vukcevic M., Janjic M., Sibalic N.: Stress Modeling in Metal Forming Process. RaDMI 2008.
184. Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Zavarivanje trenjem (FSW) - suština procesa, terminologija i pregled istraživanja. Tehnika. Beograd 2/2008.
185. Vukčević M., Janjić M.: On Modeling the Metal Forming Processes. Journal for Technology of Plasticity, Vol. 25, Number 1-2, Novi Sad, 2000.
186. Vukčević M., Plančak M., Janjić M., Šibalić N.: Research and Analysis of Friction Stir Welding Parameters on Aluminium Alloys (6082-T6). Journal for Technology of Plasticity, Vol. 34 (2009), Number 1-2.

LITERATURA

187. Vukčević M., Savićević S., Janjić M.: FEM and Experimental Contour Modelling at Die Forging, Conference Advanced Engineering and Techology. Sevastopol, Ukraina, 2004.
188. Vukčević M.: Uvod u proizvodne tehnologije I. Izdavački centar „Cetinje“, Podgorica, 1994.
189. Wang S., Wei M., Tsay L.: Tensile Properties of LBW Welds in Ti-6Al-4V Alloy at Evaluated Temperatures Below 450 Degrees C. Materials Letters, 2003. 57(12): p. 1815-1823.
190. Website HBM: <http://hbm.com/>
191. Website TWI: <http://twi.co.uk/>. Friction Stir Welding - Superior Weld Quality.
192. Website Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding/.
193. Website Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Friction/>.
194. Williams S. W., Colegrove P. A., Shercliff H., Pragnell P., Robson J., Withers P., Richards D., Sullivan A., Kamp N., Lohwasser D., Poad M.: Integrated Modelling of the FSW Process. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
195. Williams S. W.: FE Modelling of Mechanical Tensioning for Controlling Residual Stresses in FSW. 6th International Symposium on Friction Stir Welding D.A. Burford, et al. Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.
196. Williamson M. K.: A Pressure Partition Model for Estimating Tool Efficiency During FSW. The Minerals, Metals and Materials Society, Indianapolis, U.S.A., 2001, pp.173 - 179.
197. Xu L., Khan A. J.: Nugget Growth Model for Aluminium Aloys during Resistance Spot Welding. Welding Journal, 78(11), 367-s to 372-s.
198. Xu S., Deng X., Reynolds A., Seidel U. T.: Finite Element Simulation of Material Flow in FSW. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, Number 3, 2001, pp.191 - 193.
199. Xu S.: Microstructure Analysis and Solid Mechanics Modeling of Friction Stir Welding, PhD Dissertation, Dept. of Mech. Engg., University South Carolina, 2003.
200. Yu B., Chao J. Y., Qi H. X.: Heat transfer and Thermo-Mechanical Analysis of Friction Stir Joining of AA6061-T6 Aluminium Alloy Plates. Proceedings of the 1st International Symposium on FSW, Thousand Oaks, California, U.S.A., 1999.
201. Yuh J. C., Xinhai Q.: Thermal and Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Welding of Aluminium Alloz 6061-T6. Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 7-October 1998.
202. Zah M., Eireiner D.: Friction Stir Welding Using NC Milling Machines. Welding and Cutting 3. 4: p. 220-223.
203. Zhang H., Zhang Z., Chen J.: The Finite Element Simulation of the Friction Stir Welding Process. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2005. 403(1-2): p. 340-348.
204. Zhu K. X., Chao J. Y.: Numerical Simulation of Transient Temperature and Residual Stresses in Friction Stir Welding of 304L Stainless Steel. Journal of Materials Processing Technology 146 (2004) 263-272.

SPISAK SLIKA

<i>Slika 4.1.</i>	<i>Prikaz alata i radnih komada (limova) prije početka procesa zavarivanja ..</i>	<i>14</i>
<i>Slika 4.2.</i>	<i>Prikaz alata i radnih komada (limova) u toku procesa zavarivanja.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 4.3.</i>	<i>Faze procesa FSW: (a), (b) i (c) - prva faza; (d) - druga faza.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 4.4.</i>	<i>Struktura zavarenog spoja kod procesa FSW.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 4.5.</i>	<i>Distorzije limova zavarenih elektrolučno i postupkom FSW [40].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 4.6.</i>	<i>Vrste zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW: (a) sučeoni spoj; (b) kombinovani sučeoni i preklopni spoj; (c) višestruki preklopni spoj; (d) upušteni preklopni spoj; (e) T spoj dva elementa; (f) T spoj tri lementa; (g) ugaoni-sučeoni spoj; (h) ugaoni spoj [109, 146]</i>	<i>22</i>
<i>Slika 4.7.</i>	<i>Prikaz sila F_x, F_y i F_z, kao i brzina v i ω.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 4.8.</i>	<i>Prodiranje čela alata u materijal i ugao nagiba ose alata [192].....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 4.9.</i>	<i>Sistem za kontrolu dubine prodiranja čela alata u materijal koji se sastoji od dva pomoćna valjka [86]</i>	<i>26</i>
<i>Slika 4.10.</i>	<i>Prikaz tečenja materijala oko trna alata u toku procesa FSW</i>	<i>27</i>
<i>Slika 4.11.</i>	<i>Šematski prikaz tvrdoće postupka FSW za različite tipove legura aluminijuma [168].....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 4.12.</i>	<i>Prikaz otpornosti na zamor spojeva zavarenih postupkom FSW [168]</i>	<i>32</i>
<i>Slika 4.13.</i>	<i>Zavarivanje palube broda korišćenjem postupka FSW [191]</i>	<i>33</i>
<i>Slika 4.14.</i>	<i>Proizvodnja poda željezničkih vagona korišćenjem postupka FSW [191]..</i>	<i>33</i>
<i>Slika 4.15.</i>	<i>Zavarivanje trupa aviona korišćenjem postupka FSW [191]</i>	<i>34</i>
<i>Slika 4.16.</i>	<i>Zavarivanje rezervoara rakete korišćenjem postupka FSW [191]</i>	<i>34</i>
<i>Slika 4.17.</i>	<i>Mašina za zavarivanje postupkom FSW, za duge šavove proizvedena u „ESAB”-u</i>	<i>35</i>
<i>Slika 4.18.</i>	<i>Manja mašina za zavarivanje postupkom FSW proizvedena u „ESAB”-u ..</i>	<i>35</i>
<i>Slika 4.19.</i>	<i>Boks-Vilsonov gradijentni metod</i>	<i>37</i>
<i>Slika 4.20.</i>	<i>Glavni interfejs DEFORM-3D sistema</i>	<i>46</i>
<i>Slika 5.1.</i>	<i>Horizontalna glodalica: 1 - nosač glavnog vretena, 2 - kućište glodalice, 3 - glavno vreteno, 4 - stezna glava, 5 - alat za FSW, 6 - stezač radnih komada, 7 - radni komadi, 8 - pomoćni pribor (osnovna ploča), 9 - specijalni nosači osnovne ploče, 10 - otpornički davači za mjerjenje sila, 11 - za uzdužno pomjeranje, 12 - radni sto glodalice, 13 - za bočno pomjeranje, 14 - za vertikalno pomjeranje, 15 - nosač radnog stola, 16 - postolje glodalice</i>	<i>51</i>
<i>Slika 5.2.</i>	<i>Istraživačko mjesto: 1 - osnovna ploča, 2 - oslona ploča, 3 - stezač, 4 - radni komadi od legure 6082-T6, 5 - alat za FSW, 6 - stezna glava glodalice, 7 - specijalni nosač sa nalijepljenim mjerim trakama, 8 - mjerni most, 9 - BAS, 10 - PC računar sa A/D karticom i programom GLOBAL LAB, 11 - radni sto glodalice</i>	<i>52</i>

SPISAK SLIKA

<i>Slika 5.3.</i>	<i>Pomoćni pribor za FSW: 1 - odstojnik, 2 - oslona ploča, 3 - radni komad, 4 - radni komad, 5 - stezač radnih komada, 6 - šaraf sa podloškom, 7 - osnovna ploča, 8 - mjesto za specijalni nosači osnovne ploče.....</i>	53
<i>Slika 5.4.</i>	<i>3D prikaz pomoćnog pribora: 1 - osnovna ploča, 2 - oslona ploča, 3 - radni komad, 4 - stezač radnog komada</i>	54
<i>Slika 5.5.</i>	<i>3D prikaz osnovne ploče</i>	54
<i>Slika 5.6.</i>	<i>Osnovna ploča</i>	55
<i>Slika 5.7.</i>	<i>Oslona ploča</i>	55
<i>Slika 5.8.</i>	<i>Specijalni nosač pomoćnog pribora.....</i>	56
<i>Slika 5.9.</i>	<i>Specijalni nosači osnovne ploče pravougaonog poprečnog presjeka na koji su postavljeni davači (mjerme trake).....</i>	56
<i>Slika 5.10.</i>	<i>3D prikaz stezača radnih komada</i>	56
<i>Slika 5.11.</i>	<i>Blok dijagram informacionog mjernog sistema za mjerjenje sila</i>	57
<i>Slika 5.12.</i>	<i>Šema rasporeda i povezivanja mjernih traka za mjerjenje komponente sile F_z</i>	58
<i>Slika 5.13.</i>	<i>Davač tipa KMR/200kN.....</i>	59
<i>Slika 5.14.</i>	<i>Šema rasporeda i povezivanja mjernih traka za mjerjenje komponente sile F_x</i>	60
<i>Slika 5.15.</i>	<i>Šema rasporeda i povezivanja mjernih traka za mjerjenje komponente sile F_y</i>	61
<i>Slika 5.16.</i>	<i>Specijalni nosač sa nalijepljenim mjernim trakama</i>	61
<i>Slika 5.17.</i>	<i>Postupak baždarenja u x - pravcu</i>	61
<i>Slika 5.18.</i>	<i>Blok dijagram informacionog mjernog sistema za mjerjenje temperature ..</i>	62
<i>Slika 5.19.</i>	<i>Mjemi modul (oprema za mjerjenje temperature koja radi na principu termo-parova).....</i>	62
<i>Slika 5.20.</i>	<i>Prikaz istraživačkog mjeta: 1 - stegnuti radni komadi, 2 - alat za FSW, 3 - mjemi moduli, 4 - prikačeni termo-parovi, 5 - osmokanalni ulazni modul, 6 - računar</i>	63
<i>Slika 5.21.</i>	<i>Uređaj za zavarivanje termo-parova: 1 - mehanizam za fino podešavanje zazora između elektroda, 2 - kutija sa elektronskim komponentama, 3 - prekidač za punjenje i pražnjenje kondenzatora, 4 - gornja elektroda, 5 - donja elektroda.....</i>	64
<i>Slika 5.22.</i>	<i>Elektronska šema uređaja za zavarivanje termo-parova</i>	64
<i>Slika 6.1.</i>	<i>Familija alata za proces FSW: D - prečnik čela alata, d - prečnik tma alata i α - ugao nagiba tma alata</i>	68
<i>Slika 6.2.</i>	<i>Alat za FSW: (a) alat sa usvojenim dimenzijsama, (b) alat broj 9 dizajniran u Pro/ENGINEER-u, za centralne tačke plana broj 33, 34, 35 i 36.....</i>	72
<i>Slika 6.3.</i>	<i>Izrađeni set alata po planu eksperimenta</i>	72
<i>Slika 6.4.</i>	<i>Uzorci izvršene hamijske analize: (a) pogled sa prednje strane, (b) pogled sa zadnje strane</i>	73
<i>Slika 6.5.</i>	<i>Legura 6082-T6 dobijena ekstruzijom u obliku L-profila</i>	74
<i>Slika 6.6.</i>	<i>Crtež radnog komada sa dimenzijsama</i>	74
<i>Slika 6.7.</i>	<i>Radni komad koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima</i>	74
<i>Slika 6.8.</i>	<i>Radni komadi potrebni za izvođenje eksperimenta (72 komada)</i>	75
<i>Slika 6.9.</i>	<i>Izbušene rupe u radnom komadu, sa napravljenim upustom</i>	76

DOKTORSKA DISERTACIJA

Slika 6.10. Crtež rasporeda rupa u koje se smještaju termo-parovi.....	76
Slika 6.11. Postavljanje termo-parova na mjerne pozicije.....	76
Slika 6.12. Lijepljenje termo-parova dvokomponentnim ljepljivim materijalom.....	76
Slika 6.13. Postavljeni termo-parovi u radnim komadima	77
Slika 6.14. Prikaz početka procesa FSW.....	78
Slika 6.15. Prikaz završetka procesa FSW.....	78
Slika 6.16. Dijagram sila dobijen korišćenjem otporničkih davača (mjernih traka), u centralnoj tački plana broj 36.....	78
Slika 6.17. Izgled zavarenog spoja sa gornje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana broj 36.....	79
Slika 6.18. Izgled zavarenog spoja sa donje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana broj 36.....	79
Slika 6.19. Šema mjernih pozicija temperaturu u radnom komadu koji se zavaruje ...	80
Slika 6.20. Prikaz mjerjenja temperature kod procesa FSW.....	80
Slika 6.21. Softver Measurment & Automation Explorer.....	81
Slika 6.22. Eksperimentalno dobijena promjena temperature u funkciji vremena, u centralnoj tački plana broj 36.....	82
Slika 6.23. Dijagram temperature u 1. tački eksperimentalnog plana	82
Slika 6.24. Dijagram temperature u 2. tački eksperimentalnog plana	82
Slika 6.25. Dijagram temperature u 17. tački eksperimentalnog plana	83
Slika 6.26. Dijagram temperature u 20. tački eksperimentalnog plana	83
Slika 6.27. Dijagram temperature u 29. tački eksperimentalnog plana	83
Slika 6.28. Dijagram temperature u 34. tački eksperimentalnog plana	83
Slika 6.29. Šema isijecanja uzoraka iz zavarenih radnih komada dobijenih postupkom FSW.....	84
Slika 6.30. Prikaz isječenih uzoraka iz zavarenih radnih komada za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36	85
Slika 6.31. Epruveta za ispitivanje zatezanjem urađena po standardu MEST EN 10002-1:2008 [147]	86
Slika 6.32. Uzorak (epruveta), y - pravac normalan na pravac zavarivanja	86
Slika 6.33. Uzorak (epruveta), x - pravac koji se poklapa sa pravcem zavarivanja	86
Slika 6.34. Istegnuta epruveta, isječena iz y - pravca, za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36	87
Slika 6.35. Istegnuta epruveta, isječena iz x - pravca, za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36	87
Slika 6.36. Istegnuta epruveta osnovnog materijala broj 4.....	87
Slika 6.37. Ispitivanje epruveta zatezanjem	87
Slika 6.38. Postavljena epruveta.....	87
Slika 6.39. Dijagram istezanja za 27. tačku eksperimentalnog plana	88
Slika 6.40. Dijagram istezanja za 36. tačku eksperimentalnog plana	88
Slika 6.41. Korišćeno Šarpijevo klatno za ispitivanje udame žilavosti	90
Slika 6.42. Epruveta za ispitivanje udame žilavosti urađena po standardu MEST EN 10045-1:1993 [148]	91
Slika 6.43. Epruveta za ispitivanje udame žilavosti, y - pravac normalan na pravac zavarivanja u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36	91

SPISAK SLIKA

Slika 6.44. Ispitana epruveta u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 36	91
Slika 6.45. Isječeni uzorak za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35, pogled odozgo.....	93
Slika 6.46. Poprečni presjek isječenog uzorka za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 35.....	93
Slika 6.47. Uredaj za ručno brušenje materijala.....	94
Slika 6.48. Uredaj za poliranje sa sredstvima za poliranje	95
Slika 6.49. Prikaz obrađenog uzorka za tačku eksperimentalnog plana broj 28	95
Slika 6.50. Metalografski mikroskop korišćen za snimanje mikrostrukture zavarenog spoja	96
Slika 6.51. Makrostruktura uzorka broj 5.....	96
Slika 6.52. Makrostruktura uzorka broj 8.....	96
Slika 6.53. Makrostruktura uzorka broj 14.....	96
Slika 6.54. Makrostruktura uzorka broj 21.....	96
Slika 6.55. Makrostruktura uzorka broj 35.....	97
Slika 6.56. Mikrostruktura osnovnog materijala, uvećanje 200 x.....	97
Slika 6.57. Mikrostruktura osnovnog materijala, uvećanje 300 x.....	98
Slika 6.58. Mikrostruktura HAZ, uvećanje 200 x	98
Slika 6.59. Mikrostruktura HAZ - TMAZ zone 100 x	99
Slika 6.60. Mikrostruktura „grumen“ zone, uvećanje 100 x	99
Slika 7.1. Kriva reagovanja F_z u funkciji v za odnose ω , a , d i D	105
Slika 7.2. Prikaz parametarski formirane geometrije alata za 36. tačku eksperimentalnog plana koja se učitava u program DEFORM-3D	113
Slika 7.3. Prikaz parametarski formirane geometrije radnog komada koji se učitava u program DEFORM-3D	113
Slika 7.4. Prikaz parametarski formirane geometrije osloane ploče koja se učitava u program DEFORM-3D.....	114
Slika 7.5. Formiran model procesa FSW.....	114
Slika 7.6. Prikaz podmodula Simulation Control	115
Slika 7.7. Šema kretanja alata tokom procesa FSW	116
Slika 7.8. Podmodul Inter Object.....	116
Slika 7.9. Radni komadi sa generisanom mrežom i alat.....	117
Slika 7.10. Vertikalna sila F_z (ukopavanje alata u materijal).....	117
Slika 7.11. Uzdužna sila F_x (ukopavanje alata u materijal)	118
Slika 7.12. Bočna sila F_y (ukopavanje alata u materijal)	118
Slika 7.13. Prikaz radnih komada u 117-om koraku pri zahvatu sa alatom	118
Slika 7.14. Prikaz radnog komada u 117-om bez alata	118
Slika 7.15. Prikaz generisanja topline u početnom koraku -1.....	119
Slika 7.16. Prikaz generisanja topline u 36-om koraku	119
Slika 7.17. Prikaz generisanja topline u 86-om koraku	119
Slika 7.18. Prikaz generisanja topline u 117-om koraku	119
Slika 7.19. Prikaz generisanja topline sa prednje (gornje) strane	120
Slika 7.20. Prikaz generisanja topline sa donje strane.....	120
Slika 7.21. Prikaz generisanja efektivne deformacije	120
Slika 7.22. Prikaz generisanja efektivnog napona.....	120

DOKTORSKA DISERTACIJA

Slika 7.23. Vertikalna sila F_z (proces spajanja).....	121
Slika 7.24. Uzdužna sila F_x (proces spajanja)	121
Slika 7.25. Bočna sila F_y (proces spajanja)	121
Slika 7.26. Prikaz deformisane mreže u 400-tom koraku.....	122
Slika 7.27. Prikaz deformisane mreže u 680-om koraku.....	122
Slika 7.28. Prikaz deformisane mreže u 960-om koraku.....	122
Slika 7.29. Prikaz deformisane mreže u 1240-om koraku.....	122
Slika 7.30. Prikaz deformisane mreže u 1520-om koraku.....	123
Slika 7.31. Prikaz deformisane mreže u 1805-om koraku.....	123
Slika 7.32. Prikaz podmodula Point Tracking sa definisanim koordinatama čvornih tačaka	123
Slika 7.33. Dobijeni dijagram temperature za 36. numeričku simulaciju u šest izabranih čvornih tačaka.....	124
Slika 8.1. Definicija površina zavarenih radnih komada.....	127
Slika 8.2. Vizuelni pregled FSW spoja, gornje površine zavarenih radnih komada..	128
Slika 8.3. Vizuelni pregled FSW spoja, donje korjene strane zavarenih radnih komada	128
Slika 8.4. Dijagram dobijenih sila za eksperimentalnu tačku broj 3.....	130
Slika 8.5. Dijagram dobijenih sila za eksperimentalnu tačku broj 28.....	130
Slika 8.6. Dijagram dobijenih sila za centralnu tačku plana broj 33	131
Slika 8.7. Vrijednosti vertikalne sile F_z u funkciji prečnika čela alata	132
Slika 8.8. Dijagram sile dobijen numeričkom simulacijom broj 3.....	133
Slika 8.9. Dijagram sile dobijen numeričkom simulacijom broj 28.....	133
Slika 8.10. Dijagram sile dobijen numeričkom simulacijom u centralnim tačkama plana	134
Slika 8.11. Vrijednosti vertikalne sile F_z u funkciji prečnika čela alata za izvršene numeričke simulacije	135
Slika 8.12. Grafikon - vertikalne sile F_z za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	135
Slika 8.13. Grafikon - vertikalne sile F_z za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	136
Slika 8.14. Grafikon - uzdužne sile F_x za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	137
Slika 8.15. Grafikon - uzdužne sile F_x za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	137
Slika 8.16. Grafikon - bočne sile F_y za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	138
Slika 8.17. Grafikon - bočne sile F_y za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36, dobijene eksperimentalno, modeliranjem i DEFORM simulacijom	138
Slika 8.18. Šema mjernih tačaka temperature sa pozicijama prejeka D i G.....	140
Slika 8.19. Konturni dijagram temperature za presjek G i poziciju alata I	141
Slika 8.20. Konturni dijagram temperature za presjek D i poziciju alata II.....	141
Slika 8.21. Konturni dijagram temperature za presjek G i poziciju alata I	141
Slika 8.22. Konturni dijagram temperature za presjek D i poziciju alata II.....	142
Slika 8.23. Šematski prikaz poprečnog presjeka zavarenih radnih komada	143

SPISAK SLIKA

Slika 8.24. Kontumi dijagrami izmjerene temperature u poprečnom presjeku	143
Slika 8.25. Pregledni dijagram izmjerene temperature eksperimentalnim putem za sve tačke eksperimentalnog plana	144
Slika 8.26. Osjenčeni dijagram temperature u gornjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 3.....	145
Slika 8.27. Osjenčeni dijagram temperature u donjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 3.....	146
Slika 8.28. Osjenčeni dijagram temperature u gornjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 4.....	146
Slika 8.29. Osjenčeni dijagram temperature u donjoj zoni dobijen numeričkom simulacijom broj 4.....	146
Slika 8.30. Osjenčeni dijagram izmjerene temperature u poprečnom presjeku.....	147
Slika 8.31. Pregledni dijagram dobijene temperature za sve numeričke simulacije ..	147
Slika 8.32. Presječni dijagrami temperature u gornjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 3	149
Slika 8.33. Presječni dijagram temperature u donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 3	149
Slika 8.34. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 4	149
Slika 8.35. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 17	149
Slika 8.36. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 18	150
Slika 8.37. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 27	150
Slika 8.38. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 28	150
Slika 8.39. Presječni dijagrami temperature u gornjoj i donjoj zoni za tačku eksperimentalnog plana broj 36	150
Slika 8.40. Pregledni dijagram dobijenih vrijednosti zatezne čvrstoće R_m	151
Slika 8.41. Pregledni dijagram dobijenih vrijednosti izduženja ϵ	153
Slika 8.42. Grafikon dobijenih odnosa R_{m_x}/R_{m_y} i ϵ_x/ϵ_y	154
Slika 8.43. Prikaz odnosa izduženja istegnutih epruveta za 1. tačku eksperimentalnog plana i osnovnog materijala.....	154
Slika 8.44. Dijagram zatezne čvrstoće u funkciji prečnika čela alata za 630 o/min	155
Slika 8.45. Dijagram zatezne čvrstoće u funkciji prečnika čela alata za 1000 o/min....	155
Slika 8.46. Dijagram procentualnog izduženja u funkciji prečnika čela alata za 630 o/min	155
Slika 8.47. Dijagram procentualnog izduženja u funkciji prečnika čela alata za 1000 o/min	155
Slika 8.48. Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za tačke eksperimentalnog plana od 1 do 18....	156
Slika 8.49. Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za tačke eksperimentalnog plana od 19 do 36..	156

DOKTORSKA DISERTACIJA

<i>Slika 8.50.</i>	<i>Grafikon upoređenja eksperimentalno dobijenih vrijednosti sa modelski dobijenim vrijednostima, za sve tačke eksperimentalnog plana.....</i>	157
<i>Slika 8.51.</i>	<i>Šema mikrostruktурне analize.....</i>	158
<i>Slika 8.52.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 1.....</i>	158
<i>Slika 8.53.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 17.....</i>	158
<i>Slika 8.54.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 30.....</i>	158
<i>Slika 8.55.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 36.....</i>	159
<i>Slika 8.56.</i>	<i>Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka broj 30.....</i>	159
<i>Slika 8.57.</i>	<i>Mikrostruktura HAZ - OM uzorka broj 17.....</i>	160
<i>Slika 8.58.</i>	<i>Mikrostruktura TMAZ zone uzorka broj 36</i>	160
<i>Slika 8.59.</i>	<i>Mikrostruktura „grumen“ zone uzorka broj 1.....</i>	161
<i>Slika 8.60.</i>	<i>Mikrostruktura uzorka broj 9, nastala uticajem trna alata</i>	161
<i>Slika 8.61.</i>	<i>Mikrostruktura uzorka broj 10, nastala uticajem trna alata</i>	161
<i>Slika 8.62.</i>	<i>Mikrostruktura uzorka broj 15, nastala uticajem trna alata</i>	161
<i>Slika 8.63.</i>	<i>Mikrostruktura uzorka broj 19, nastala uticajem trna alata</i>	161
<i>Slika 8.64.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 3.....</i>	162
<i>Slika 8.65.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, osnovni materijal</i>	162
<i>Slika 8.66.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 1</i>	162
<i>Slika 8.67.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 2</i>	162
<i>Slika 8.68.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 3</i>	162
<i>Slika 8.69.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 4</i>	163
<i>Slika 8.70.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 5</i>	163
<i>Slika 8.71.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 6</i>	163
<i>Slika 8.72.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 3, pozicija 7</i>	163
<i>Slika 8.73.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 27.....</i>	163
<i>Slika 8.74.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, osnovni materijal</i>	164
<i>Slika 8.75.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, pozicija 1</i>	164
<i>Slika 8.76.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, pozicija 2</i>	164
<i>Slika 8.77.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, pozicija 3</i>	164
<i>Slika 8.78.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, pozicija 4</i>	164
<i>Slika 8.79.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 27, pozicija 5</i>	164
<i>Slika 8.80.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 31.....</i>	165
<i>Slika 8.81.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, osnovni materijal</i>	165
<i>Slika 8.82.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 1</i>	165
<i>Slika 8.83.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 2</i>	165
<i>Slika 8.84.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 3</i>	165
<i>Slika 8.85.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 4</i>	166
<i>Slika 8.86.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 5</i>	166
<i>Slika 8.87.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 6</i>	166
<i>Slika 8.88.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 7</i>	166
<i>Slika 8.89.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 8</i>	166
<i>Slika 8.90.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 31, pozicija 9</i>	166
<i>Slika 8.91.</i>	<i>Makrostruktura uzorka broj 34.....</i>	167
<i>Slika 8.92.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 34, pozicija 1</i>	167
<i>Slika 8.93.</i>	<i>Mikrostuktura uzorka broj 34, pozicija 2</i>	167

SPISAK SLIKA

<i>Slika 8.94. Osnovni oblik alata</i>	168
<i>Slika 8.95. Profilisano čelo alata</i>	168
<i>Slika 8.96. Tm sa zavojnicom</i>	169
<i>Slika 8.97. Profilisano čelo alata i tm sa zavojnicom</i>	169
<i>Slika 8.98. Tm sa četiri paralelna žlijeba</i>	169
<i>Slika 8.99. Profilisano čelo alata i tm sa četiri paralelna žlijeba</i>	169
<i>Slika 8.100. Tm sa četiri zaokrenuta žlijeba</i>	169
<i>Slika 8.101. Profilisano čelo alata i tma sa četiri zaokrenuta žlijeba</i>	169

SPISAK TABELA

Tabela 4.1. <i>Usvojeni termini i definicije [169]</i>	15
Tabela 6.1. <i>Nivoi varijacije ulaznih faktora plana eksperimenta</i>	70
Tabela 6.2. <i>Plan matrica višefaktornog eksperimentalnog plana</i>	70
Tabela 6.3. <i>Set od devet alata za FSW, potreban za eksperimentalna istraživanja</i>	71
Tabela 6.4. <i>Hemski sastav korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)</i>	73
Tabela 6.5. <i>Mehaničke osobine korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)</i>	75
Tabela 6.6. <i>Fizičke osobine korišćene legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)</i>	75
Tabela 6.7. <i>Dobijene vrijednosti zatezne čvrstoće i procentualnog izduženja</i>	89
Tabela 6.8. <i>Dobijene vrijednosti udarne žilavosti</i>	92
Tabela 7.1. <i>Prvi ciklus optimizacije procesa FSW</i>	103
Tabela 7.2. <i>Drugi ciklus optimizacije procesa FSW</i>	103
Tabela 7.3. <i>Treći ciklus optimizacije procesa FSW</i>	104
Tabela 7.4. <i>Četvrti ciklus optimizacije procesa FSW</i>	104
Tabela 7.5. <i>Koeficijenti regresije za uzdužnu silu F_x, bočnu silu F_y i vertikalnu silu F_z</i>	107
Tabela 7.6. <i>Eksperimentalne i modelske vrijednosti komponenti sila F_x, F_y i F_z</i>	108
Tabela 7.7. <i>Koeficijenti regresije temperature za mjera mesta T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 i T_6</i>	109
Tabela 7.8. <i>Eksperimentalne i modelske vrijednosti temperature za mjera mesta T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 i T_6</i>	109
Tabela 7.9. <i>Koeficijenti regresije za zateznu čvrstoću Rm_x, Rm_y i udarnu žilavost ρ</i>	111
Tabela 7.10. <i>Eksperimentalne i modelske vrijednosti za zateznu čvrstoću Rm_x, Rm_y i udarnu žilavost ρ</i>	111
Tabela 7.11. <i>Simulation Control</i>	115
Tabela 7.12. <i>Inter-Object</i>	116
Tabela 7.13. <i>DEFORM vrijednosti temperature u usvojenim čvormim tačkama</i>	125
Tabela 8.1. <i>Dobijeni relativni odnosi sila zavarivanja</i>	139



SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA

- v - brzina zavarivanja
 ω - ugaona brzina okretanja alata
 α - ugao nagiba trna alata
 d - prečnik trna alata
 D - prečnik čela alata
 r - poluprečnik trna alata
 R - poluprečnik čela alata
 μ - koeficijent trenja
 F_x - uzdužna sila
 F_y - bočna sila
 F_z - vertikalna sila
 T - temperatura
 Rm_x - zatezna čvrstoća u x - pravcu
 Rm_y - zatezna čvrstoća u y - pravcu
 ε_x - izduženje u x - pravcu
 ε_y - izduženje u y - pravcu
 ρ - udarna žilavost
 D_{tijela} - prečnik tijela alata
 H_{tijela} - visina tijela alata
 $H_{čela alata}$ - visina čela alata
 $H_{trna alata}$ - visina trna alata
 $r_{trna alata}$ - radijus trna alata
 $R_{trna alata}$ - radijus površine prelaza trna i čela alata
 P - međupovršinski pritisak
 τ - smicanje
 Q - toplosta
 U_d - promjena napona davača usled deformacije mjernih traka
 U_e - napon napajanja davača
 ε - deformacija
 n - broj aktivnih mjernih traka; eksponent deformacije
 σ - napon pri linijskoj elastičnoj deformaciji
 A - poprečni presjek specijalnog nosača
 b - širina poprečnog presjeka specijalnog nosača; širina epruvete
 h - debljina poprečnog presjeka specijalnog nosača
 W - otporni moment
 L_0 - početna mjerna dužina epruvete
 L_c - ispitna dužina epruvete
 L_t - ukupna dužina epruvete
 S_0 - početna površina poprečnog presjeka epruvete

SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA

a - deblijina epruvete

S_E - suma kvadrata greške u centralnoj tački plana

S_R - suma kvadrata odstupanja u centralnoj tački plana

S_{AD} - suma kvadrata vezana za adekvatnost modela

Y_M - model u prirodnim koordinatama

N - broj tačaka eksperimentalnog plana

n_0 - broj ponavljanja u centralnoj tački plana

X_i - ulazni faktori u prirodnim koordinatama

X_{gi} - gornji nivo varijacije faktora

X_{0i} - osnovni nivo varijacije faktora

X_{di} - donji nivo varijacije faktora

x_i - ulazni faktori u kodiranim koordinatama

w_i - interval varijacije ulaznih faktora

\hat{y} - funkcija odziva

a_i - koeficijenti regresije kod modela u kodiranim koordinatama

b_i - koeficijenti regresije kod modela u prirodnim koordinatama

β_i - koeficijenti regresije

B - matrica koeficijenata regresije

$\Delta\hat{y}$ - gradijentna funkcija

λ - parametar određivanja koraka na gradijentnoj liniji

Φ - funkcional

σ_u - intezitet napona

$\dot{\varepsilon}_u$ - intezitet brzine deformacije

λ - Lagranžova konstanta

M - broj konačnih elemenata

$K_{lm,jn}^c$ - deformaciona matrica krutosti

$K_{lm,jn}^\sigma$ - korekciona matrica nuponskog inkrementa

$K_{lm,jn}^\phi$ - korekciona matrica konstantne zapremine

N_I - interpolaciona funkcija

σ_{ij} - Košijev napon

δ_{ij} - simbol Kronekera

k - zapreminski modul materijala; broj faktora eksperimentalnog plana

$\bar{\sigma}$ - generalizovani naponi

σ_y - komponente devijatora napona

$d\bar{\varepsilon}^P$ - generalizovani inkrement plastične deformacije

$d\varepsilon$ - generalizovana plastična deformacija

R_{eH} - napon tečenja pri prostom istezanju

ε_y - komponente devijatora deformacija

G - modul smicanja

$d\lambda$ - faktor proporcionalnosti

σ_n - normalni naponi

ε_s - linijske deformacije

E - modul elastičnosti

ν - Poisson odnos

T_s - napon smicanja

T_{sh} - napon tečenja pri smicanju

c - konstanta materijala

m - eksponent brzine deformacije

SKRAĆENICE

FSW - zavarivanje trenjem

TWI - Institut za zavarivanje iz Velike Britanije

OM - osnovni materijal

HAZ - zona uticaja topote

TMAZ - zona termo-mehaničkih uticaja

NZ - „grumen“ zona

DXZ - dinamički rekristalizovana zona

HFSW - hibridno zavarivanje trenjem

AFSW - autogeno zavarivanje trenjem

FSSW - tačkasto zavarivanje trenjem

MKE - metoda konačnih elemenata

EN - Evropska norma (Evropski standard)

MEST - Crnogorski standard

JUS - Jugoslovenski standard

MIG - zavarivanje u zaštiti inertnog gasa

AE - akustička emisija

CAD - Kompjuterom podržano konstruisanje

PTC - *Parametric Technology Corporation*

STL - format parametarske geometrije

AD/DA - analogno-digitalno/digitalno-analogno



PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI



Slika P.1.1. Prikaz zavarenog spoja u
1. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.2. Prikaz zavarenog spoja u
1. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.3. Prikaz zavarenog spoja u
2. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



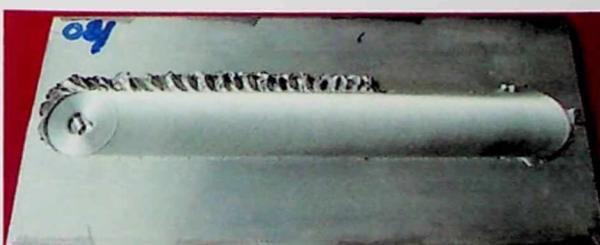
Slika P.1.4. Prikaz zavarenog spoja u
2. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



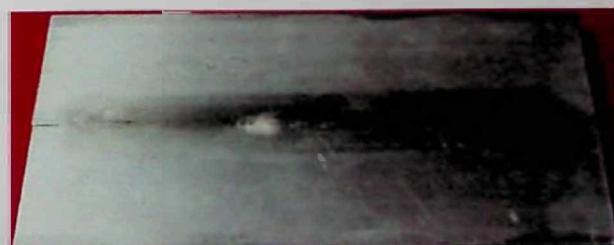
Slika P.1.5. Prikaz zavarenog spoja u
3. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.6. Prikaz zavarenog spoja u
3. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.7. Prikaz zavarenog spoja u
4. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.8. Prikaz zavarenog spoja u
4. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)

PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI



Slika P.1.9. Prikaz zavarenog spoja u
5. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



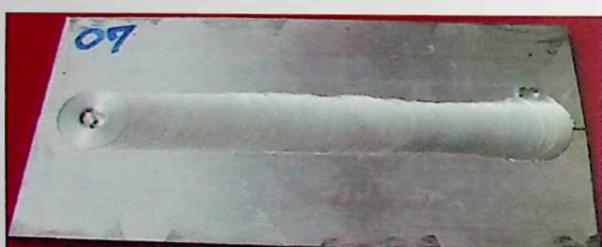
Slika P.1.10. Prikaz zavarenog spoja u
5. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.11. Prikaz zavarenog spoja u
6. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



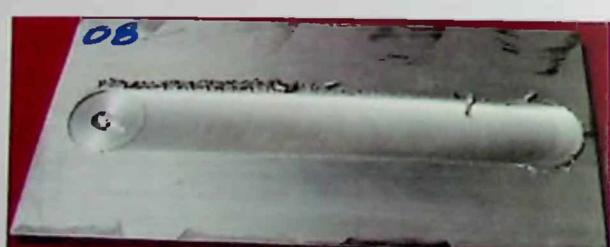
Slika P.1.12. Prikaz zavarenog spoja u
6. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.13. Prikaz zavarenog spoja u
7. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



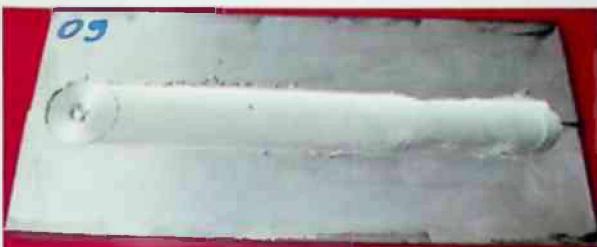
Slika P.1.14. Prikaz zavarenog spoja u
7. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.15. Prikaz zavarenog spoja u
8. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.16. Prikaz zavarenog spoja u
8. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.17. Prikaz zavarenog spoja u
9. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.18. Prikaz zavarenog spoja u
9. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.19. Prikaz zavarenog spoja u
10. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.20. Prikaz zavarenog spoja u
10. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.21. Prikaz zavarenog spoja u
11. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.22. Prikaz zavarenog spoja u
11. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.23. Prikaz zavarenog spoja u
12. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)

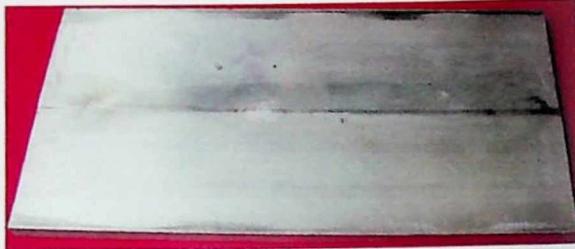


Slika P.1.24. Prikaz zavarenog spoja u
12. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)

PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI



Slika P.1.25. Prikaz zavarenog spoja u
13. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.26. Prikaz zavarenog spoja u
13. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.27. Prikaz zavarenog spoja u
14. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.28. Prikaz zavarenog spoja u
14. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.29. Prikaz zavarenog spoja u
15. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.30. Prikaz zavarenog spoja u
15. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.31. Prikaz zavarenog spoja u
16. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.32. Prikaz zavarenog spoja u
16. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.33. Prikaz zavarenog spoja u
17. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.34. Prikaz zavarenog spoja u
17. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.35. Prikaz zavarenog spoja u
18. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.36. Prikaz zavarenog spoja u
18. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.37. Prikaz zavarenog spoja u
19. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.38. Prikaz zavarenog spoja u
19. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.39. Prikaz zavarenog spoja u
20. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.40. Prikaz zavarenog spoja u
20. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)

PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI



Slika P.1.41. Prikaz zavarenog spoja u 21. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.42. Prikaz zavarenog spoja u 21. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.43. Prikaz zavarenog spoja u 22. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



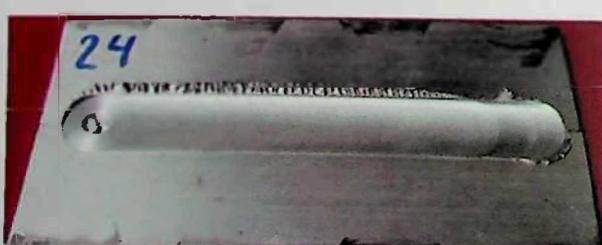
Slika P.1.44. Prikaz zavarenog spoja u 22. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.45. Prikaz zavarenog spoja u 23. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.46. Prikaz zavarenog spoja u 23. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.47. Prikaz zavarenog spoja u 24. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.48. Prikaz zavarenog spoja u 24. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.49. Prikaz zavarenog spoja u 25. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.50. Prikaz zavarenog spoja u 25. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.51. Prikaz zavarenog spoja u 26. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



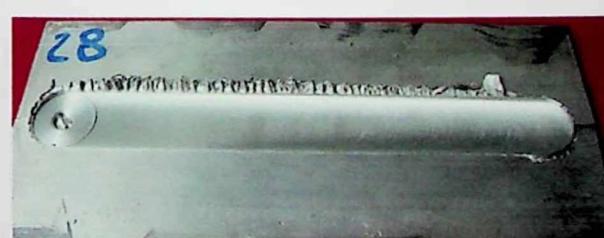
Slika P.1.52. Prikaz zavarenog spoja u 26. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.53. Prikaz zavarenog spoja u 27. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.54. Prikaz zavarenog spoja u 27. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)



Slika P.1.55. Prikaz zavarenog spoja u 28. tački eksperimentalnog plana (pogled odozgo)



Slika P.1.56. Prikaz zavarenog spoja u 28. tački eksperimentalnog plana (pogled odozdo)

PRILOG 1. ZAVARENI RADNI KOMADI



Slika P.1.57. Prikaz zavarenog spoja u
29. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.58. Prikaz zavarenog spoja u
29. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.59. Prikaz zavarenog spoja u
30. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.60. Prikaz zavarenog spoja u
30. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.61. Prikaz zavarenog spoja u
31. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



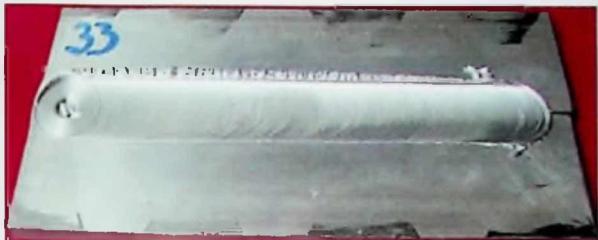
Slika P.1.62. Prikaz zavarenog spoja u
31. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.63. Prikaz zavarenog spoja u
32. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.64. Prikaz zavarenog spoja u
32. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.65. Prikaz zavarenog spoja u
33. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.66. Prikaz zavarenog spoja u
33. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.67. Prikaz zavarenog spoja u
34. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



Slika P.1.68. Prikaz zavarenog spoja u
34. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.69. Prikaz zavarenog spoja u
35. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)



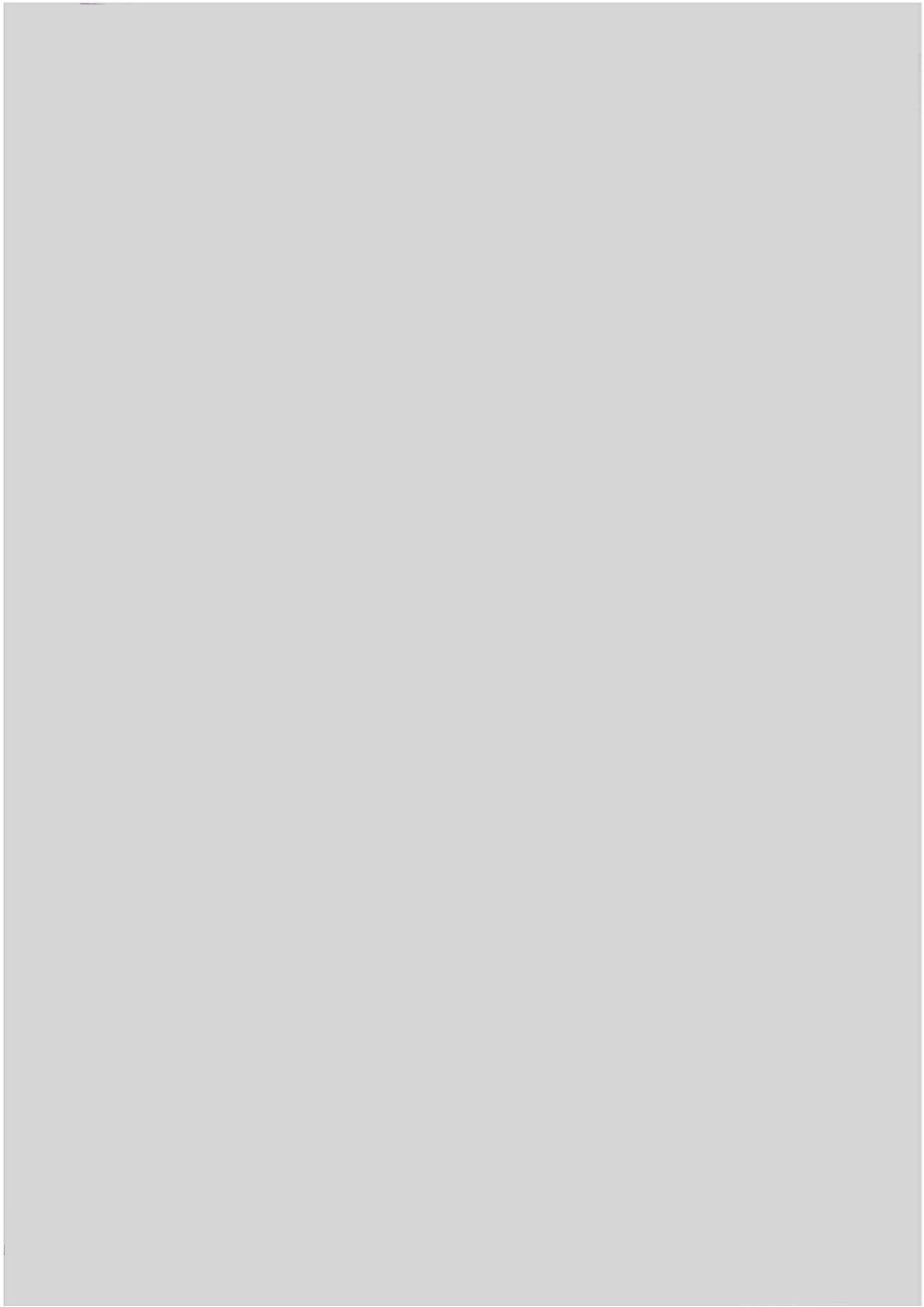
Slika P.1.70. Prikaz zavarenog spoja u
35. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)



Slika P.1.71. Prikaz zavarenog spoja u
36. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozgo)

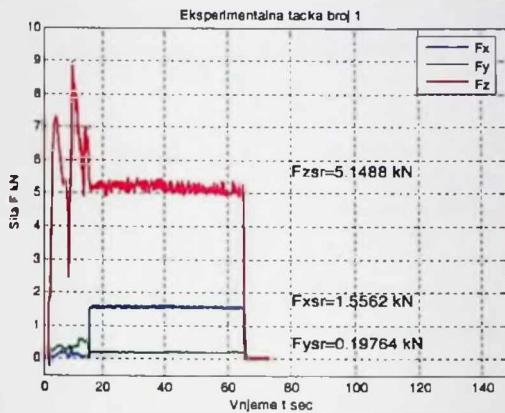


Slika P.1.72. Prikaz zavarenog spoja u
36. tački eksperimentalnog plana
(pogled odozdo)

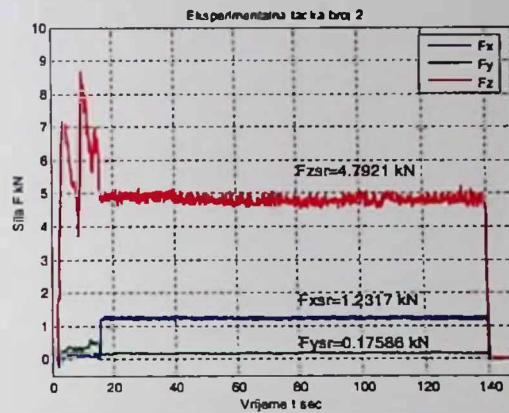


PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI

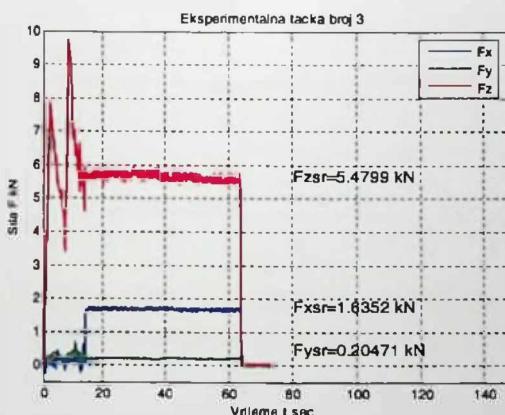
P 2.1. DIJAGRAMI SILA ZAVARIVANJA



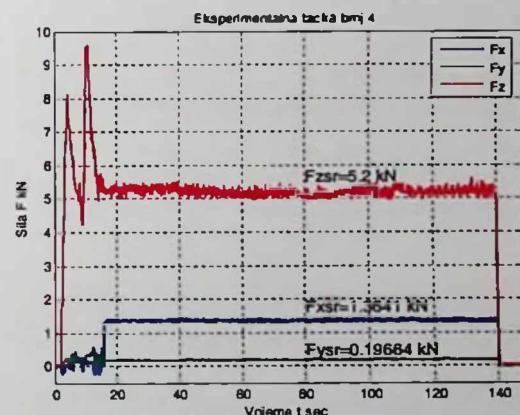
Slika P.2.1. Sile zavarivanja u 1. tački eksperimentalnog plana



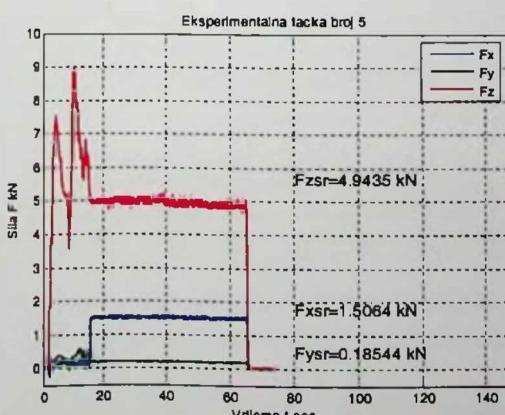
Slika P.2.2. Sile zavarivanja u 2. tački eksperimentalnog plana



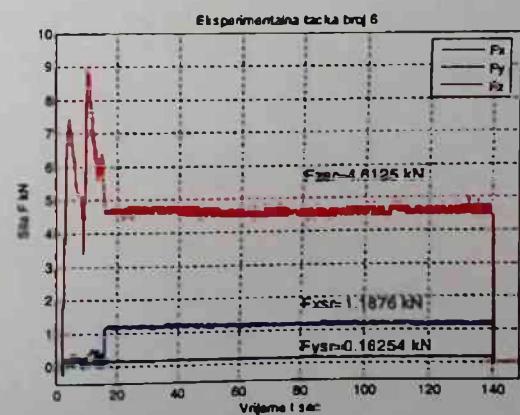
Slika P.2.3. Sile zavarivanja u 3. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.4. Sile zavarivanja u 4. tački eksperimentalnog plana

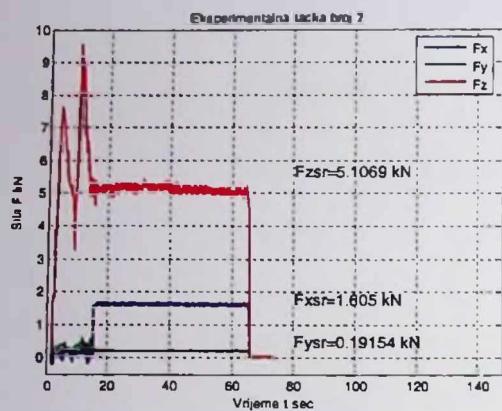


Slika P.2.5. Sile zavarivanja u 5. tački eksperimentalnog plana

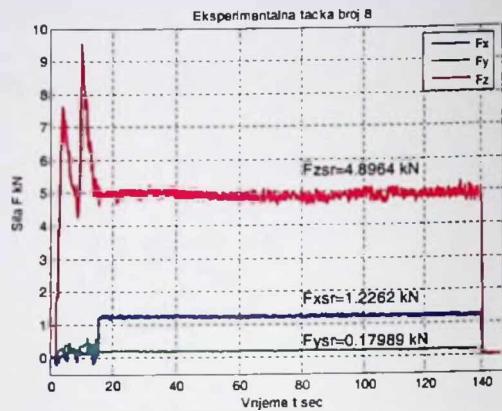


Slika P.2.6. Sile zavarivanja u 6. tački eksperimentalnog plana

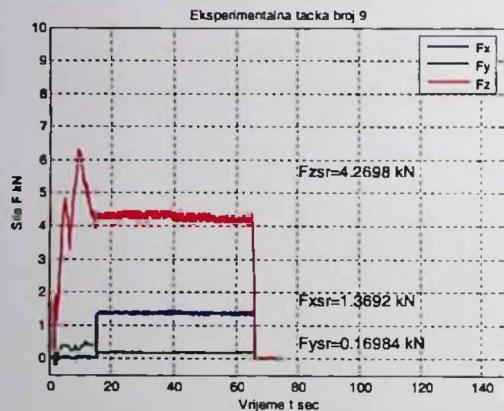
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI



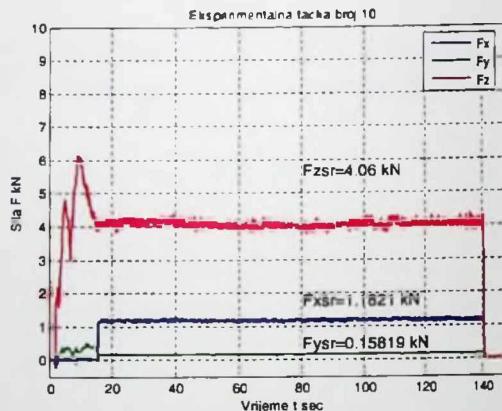
Slika P.2.7. Sile zavarivanja u 7. tački eksperimentalnog plana



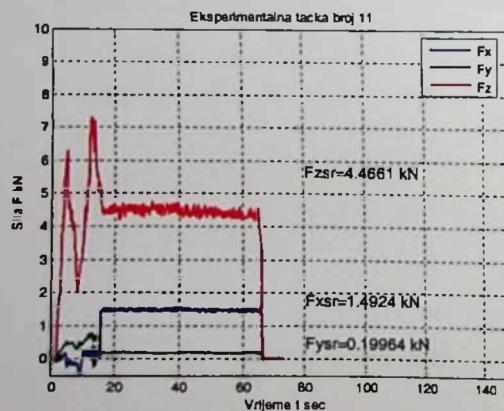
Slika P.2.8. Sile zavarivanja u 8. tački eksperimentalnog plana



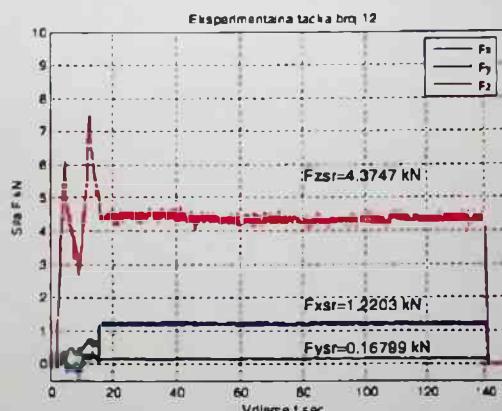
Slika P.2.9. Sile zavarivanja u 9. tački eksperimentalnog plana



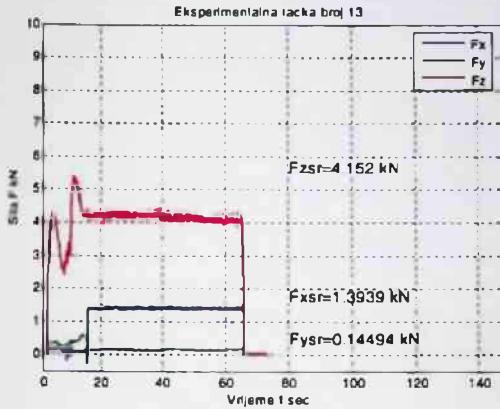
Slika P.2.10. Sile zavarivanja u 10. tački eksperimentalnog plana



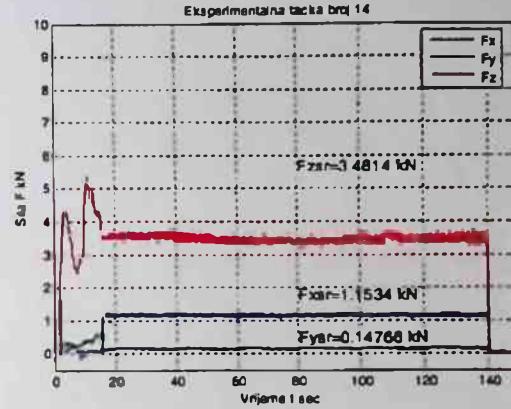
Slika P.2.11. Sile zavarivanja u 11. tački eksperimentalnog plana



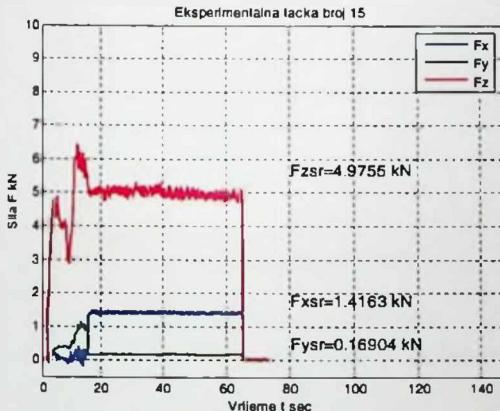
Slika P.2.12. Sile zavarivanja u 12. tački eksperimentalnog plana



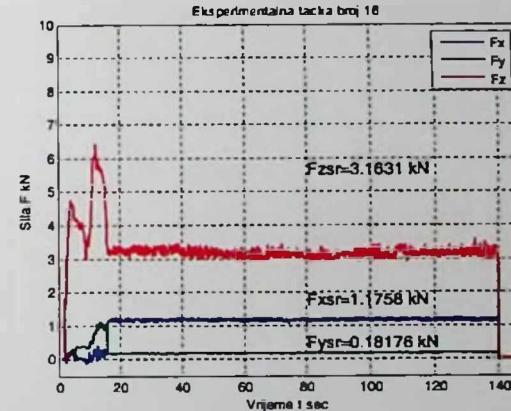
Slika P.2.13. Sile zavarivanja u 13. tački eksperimentalnog plana



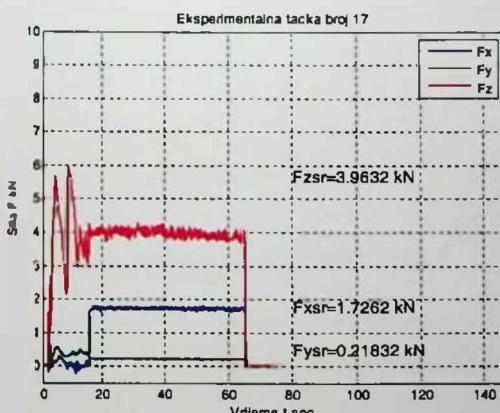
Slika P.2.14. Sile zavarivanja u 14. tački eksperimentalnog plana



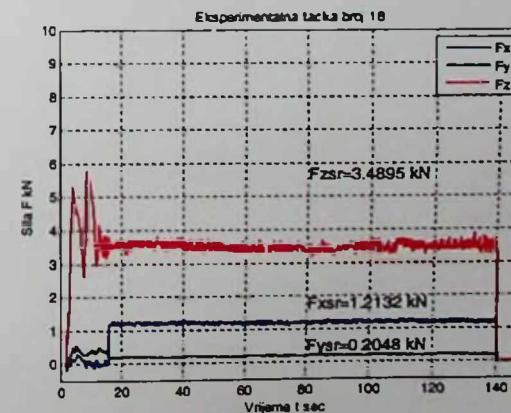
Slika P.2.15. Sile zavarivanja u 15. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.16. Sile zavarivanja u 16. tački eksperimentalnog plana

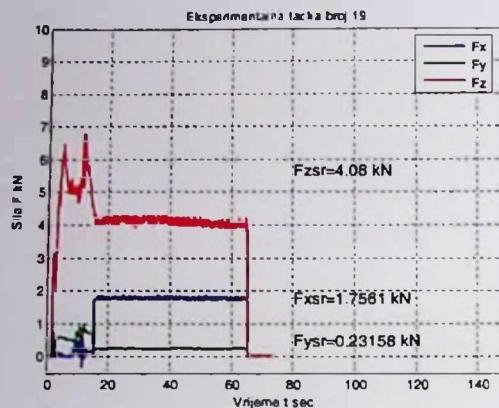


Slika P.2.17. Sile zavarivanja u 17. tački eksperimentalnog plana

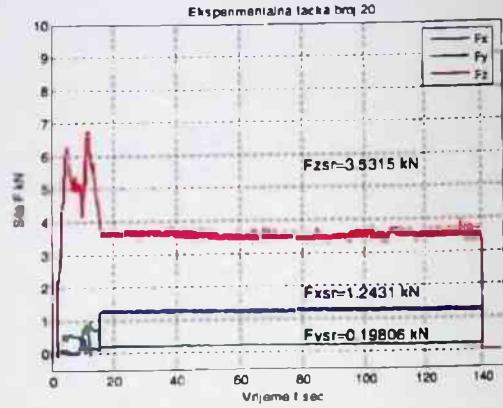


Slika P.2.18. Sile zavarivanja u 18. tački eksperimentalnog plana

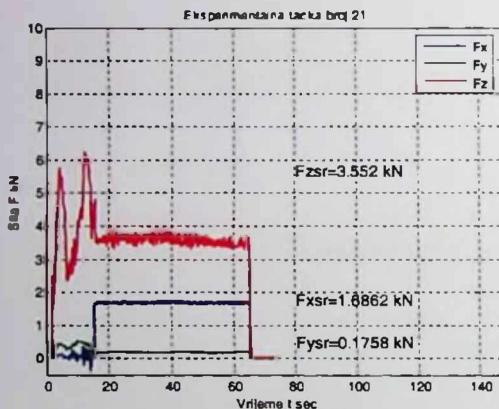
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI



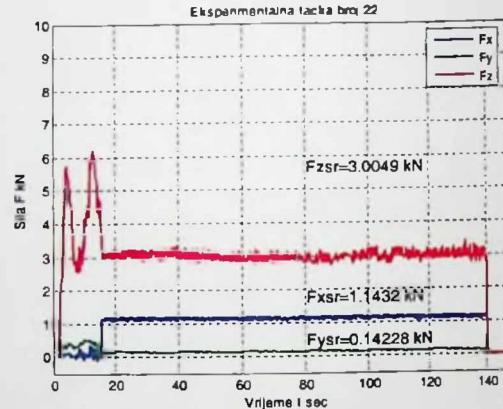
Slika P.2.19. Sile zavarivanja u 19. tački eksperimentalnog plana



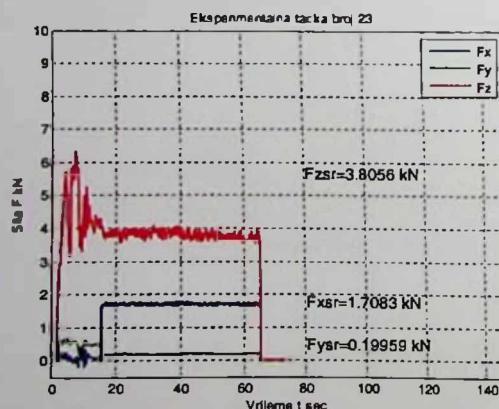
Slika P.2.20. Sile zavarivanja u 20. tački eksperimentalnog plana



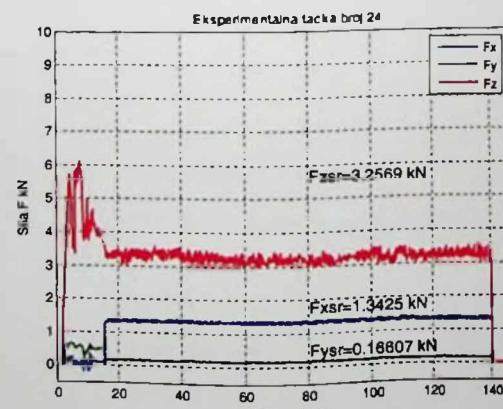
Slika P.2.21. Sile zavarivanja u 21. tački eksperimentalnog plana



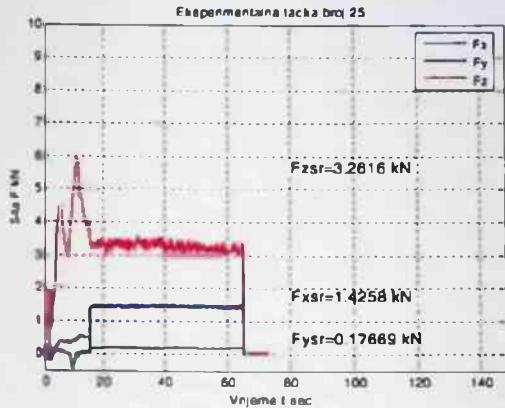
Slika P.2.22. Sile zavarivanja u 22. tački eksperimentalnog plana



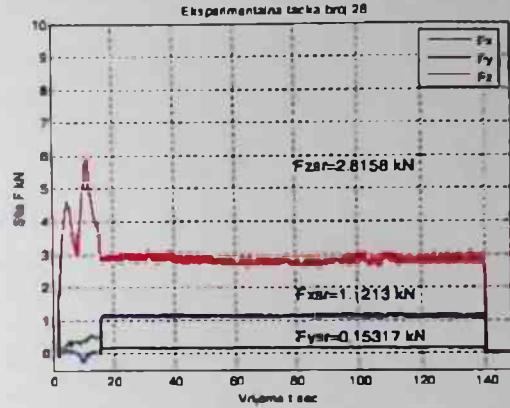
Slika P.2.23. Sile zavarivanja u 23. tački eksperimentalnog plana



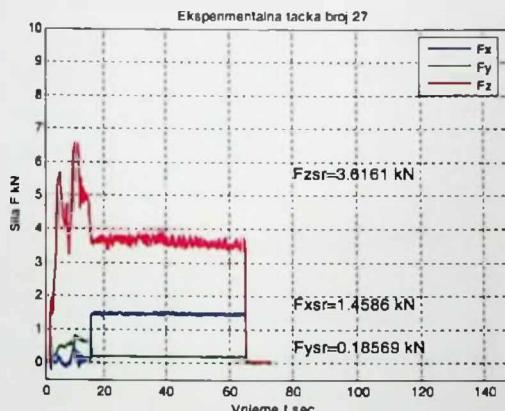
Slika P.2.24. Sile zavarivanja u 24. tački eksperimentalnog plana



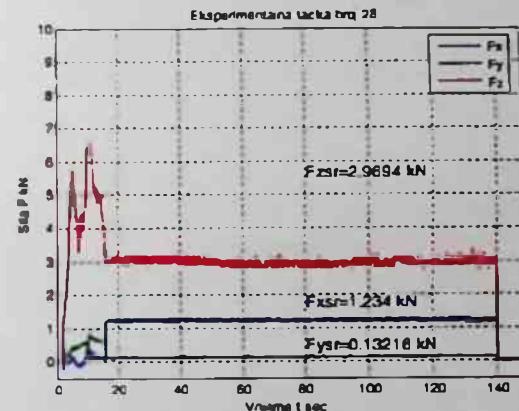
Slika P.2.25. Sile zavarivanja u 25. tački eksperimentalnog plana



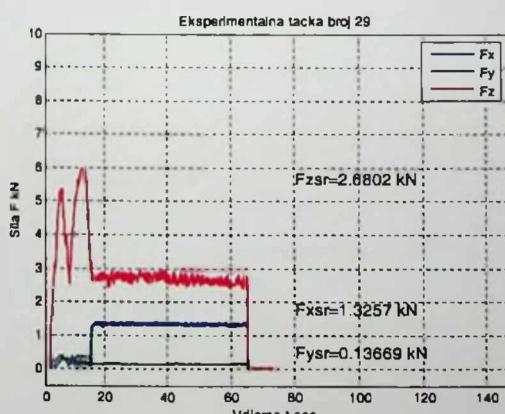
Slika P.2.26. Sile zavarivanja u 26. tački eksperimentalnog plana



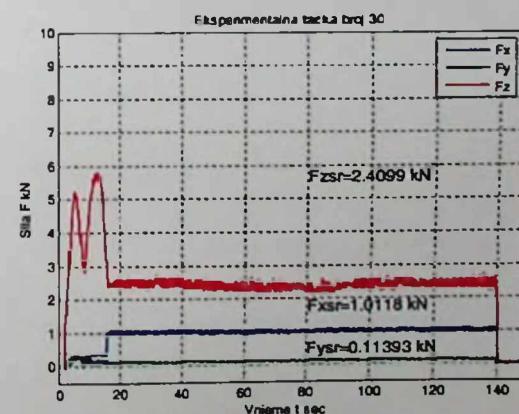
Slika P.2.27. Sile zavarivanja u 27. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.28. Sile zavarivanja u 28. tački eksperimentalnog plana

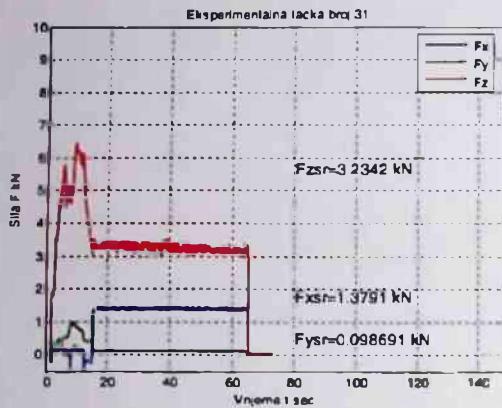


Slika P.2.29. Sile zavarivanja u 29. tački eksperimentalnog plana

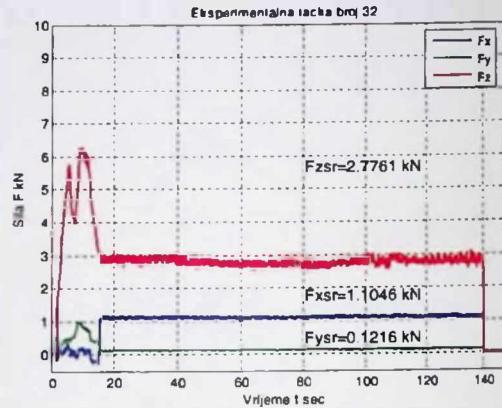


Slika P.2.30. Sile zavarivanja u 30. tački eksperimentalnog plana

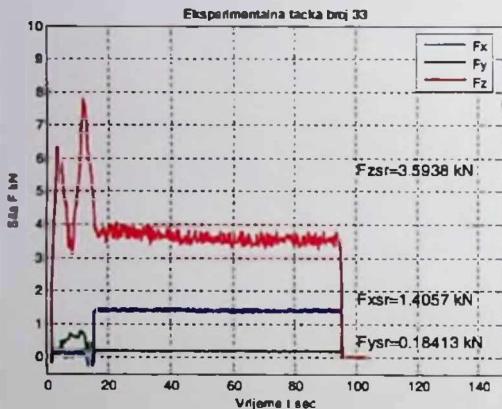
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI



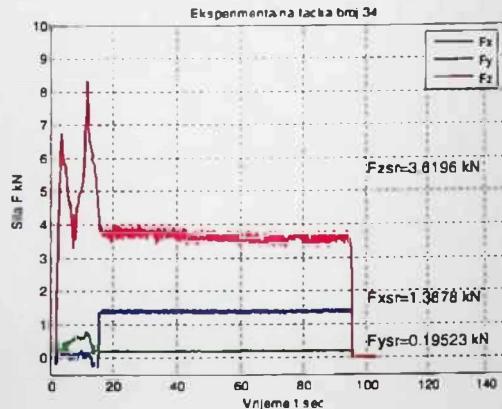
Slika P.2.31. Sile zavarivanja u 31. tački eksperimentalnog plana



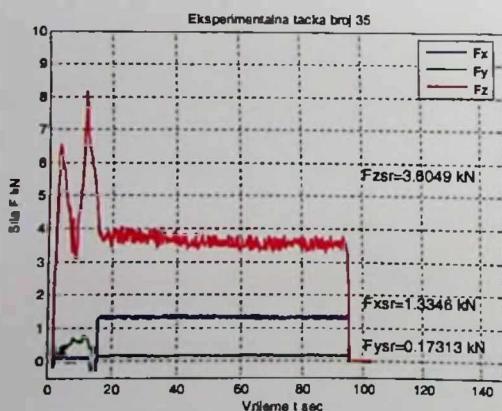
Slika P.2.32. Sile zavarivanja u 32. tački eksperimentalnog plana



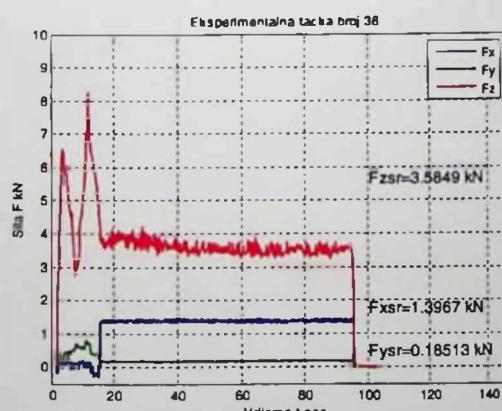
Slika P.2.33. Sile zavarivanja u 33. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.34. Sile zavarivanja u 34. tački eksperimentalnog plana

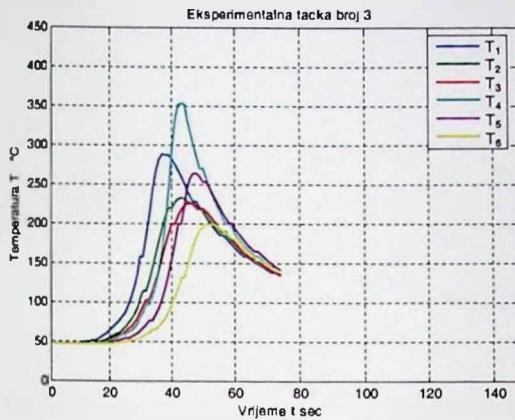


Slika P.2.35. Sile zavarivanja u 35. tački eksperimentalnog plana

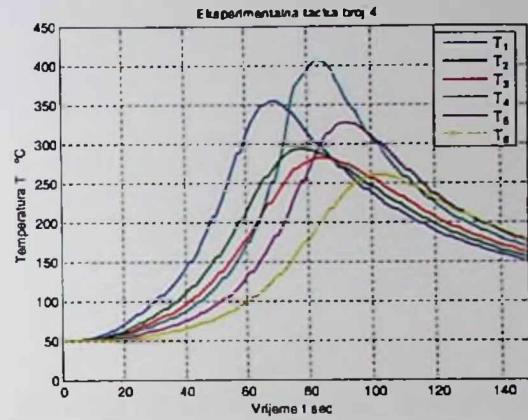


Slika P.2.36. Sile zavarivanja u 36. tački eksperimentalnog plana

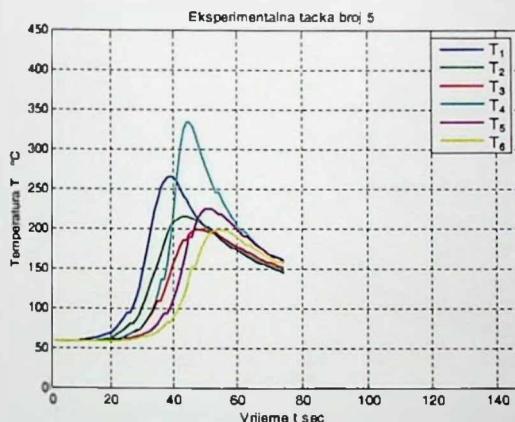
P.2.2. DIJAGRAMI TEMPERATURE



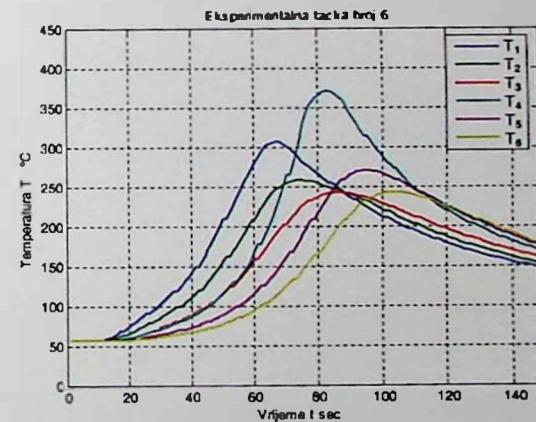
Slika P.2.37. Dijagram temperature u 3. tački eksperimentalnog plana



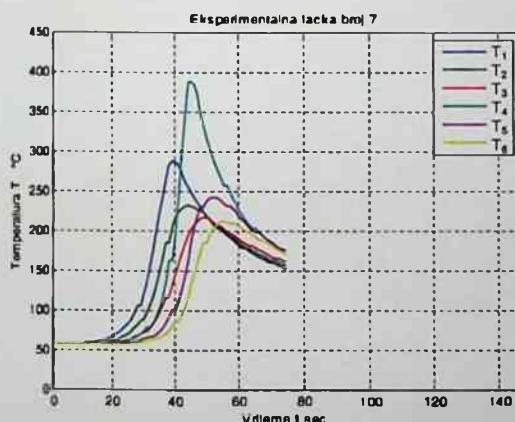
Slika P.2.38. Dijagram temperature u 4. tački eksperimentalnog plana



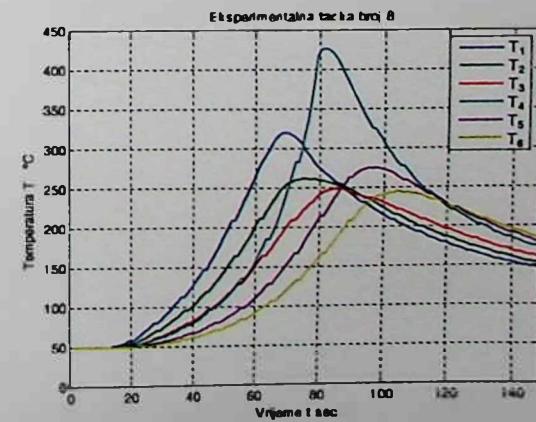
Slika P.2.39. Dijagram temperature u 5. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.40. Dijagram temperature u 6. tački eksperimentalnog plana

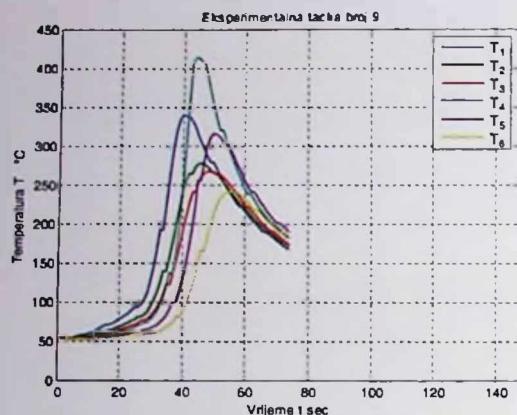


Slika P.2.41. Dijagram temperature u 7. tački eksperimentalnog plana

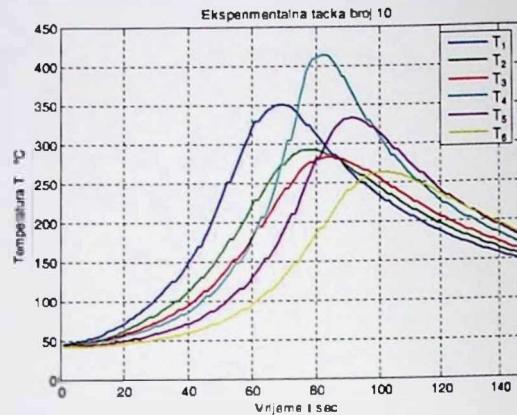


Slika P.2.42. Dijagram temperature u 8. tački eksperimentalnog plana

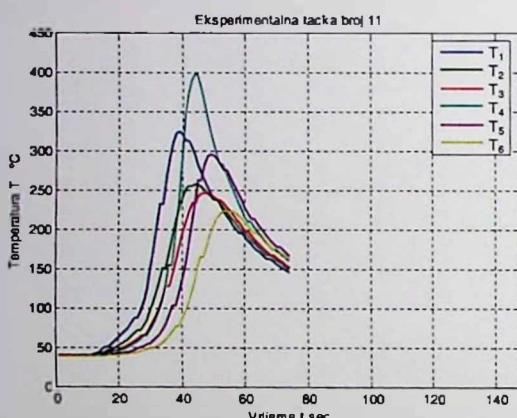
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI



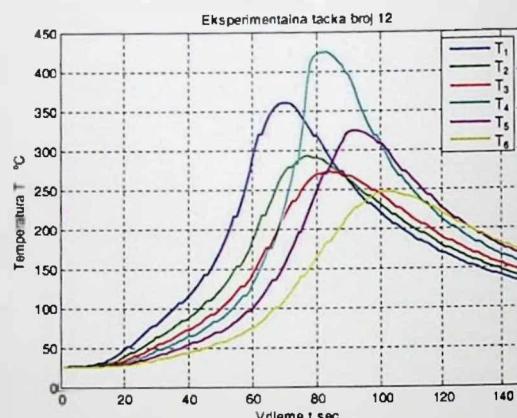
Slika P.2.43. Dijagram temperature u 9. tački eksperimentalnog plana



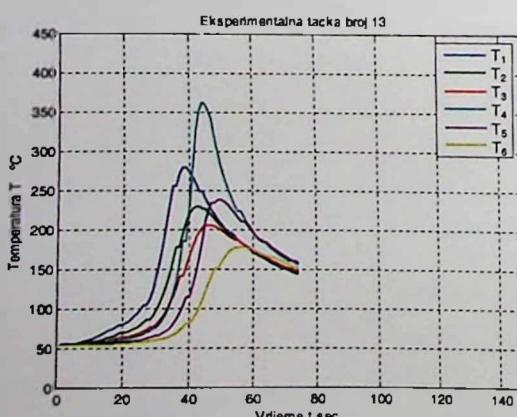
Slika P.2.44. Dijagram temperature u 10. tački eksperimentalnog plana



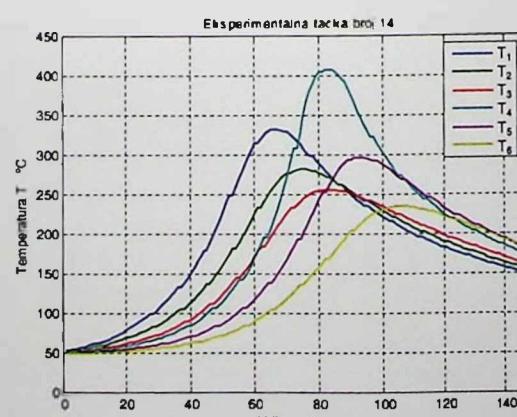
Slika P.2.45. Dijagram temperature u 11. tački eksperimentalnog plana



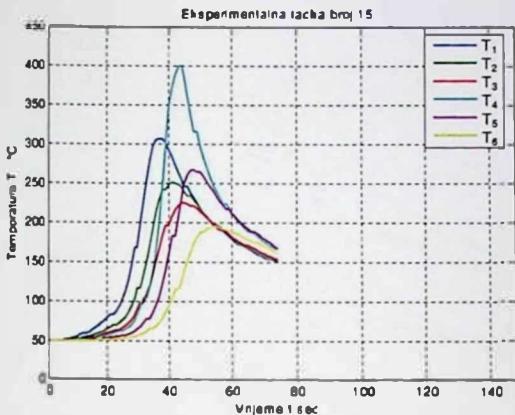
Slika P.2.46. Dijagram temperature u 12. tački eksperimentalnog plana



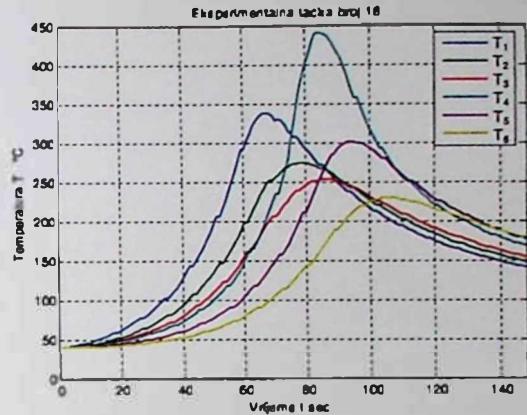
Slika P.2.47. Dijagram temperature u 13. tački eksperimentalnog plana



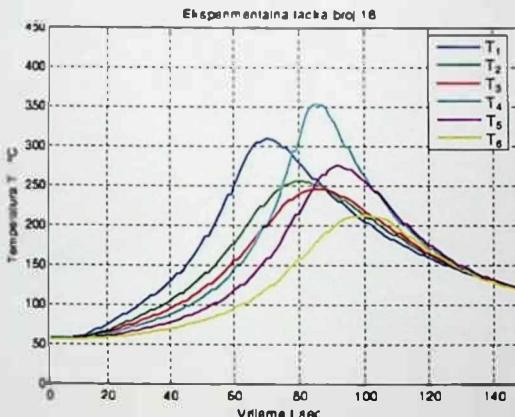
Slika P.2.48. Dijagram temperature u 14. tački eksperimentalnog plana



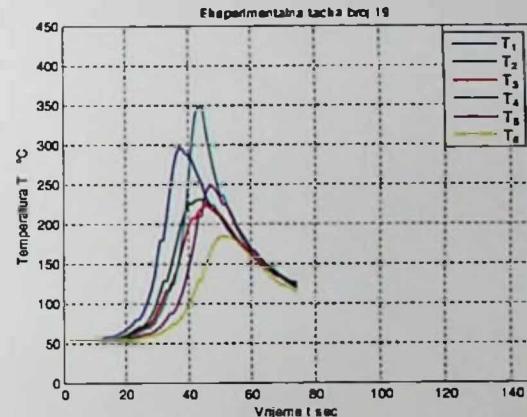
Slika P.2.49. Dijagram temperature u 15. tački eksperimentalnog plana



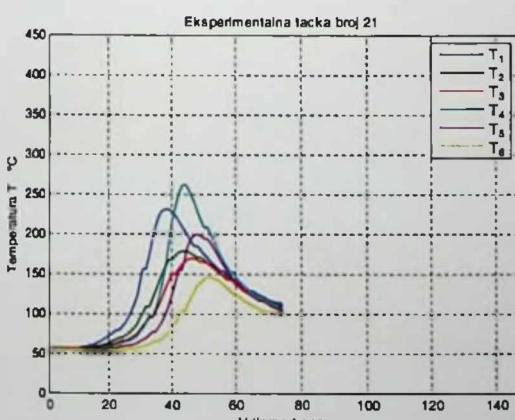
Slika P.2.50. Dijagram temperature u 16. tački eksperimentalnog plana



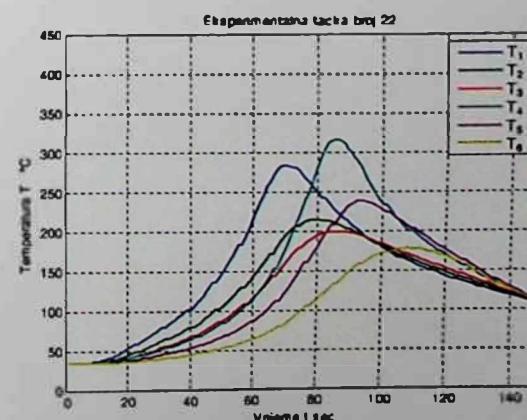
Slika P.2.51. Dijagram temperature u 18. tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.52. Dijagram temperature u 19. tački eksperimentalnog plana

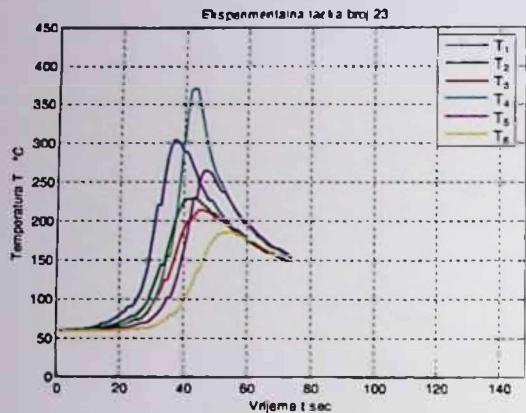


Slika P.2.53. Dijagram temperature u 21. tački eksperimentalnog plana

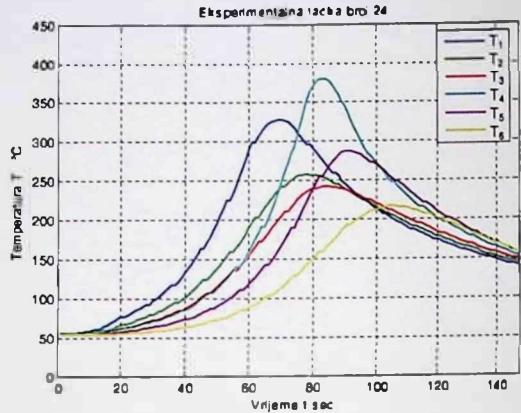


Slika P.2.54. Dijagram temperature u 22. tački eksperimentalnog plana

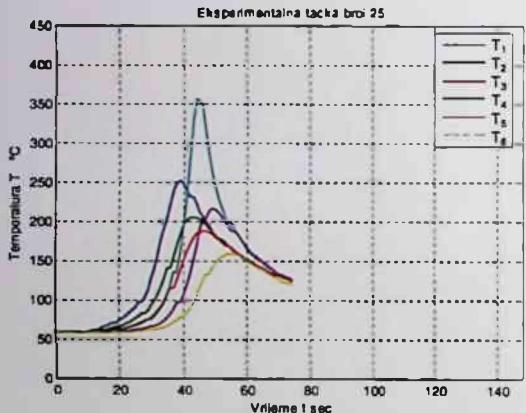
PRILOG 2. KARAKTERISTIČNI DIJAGRAMI



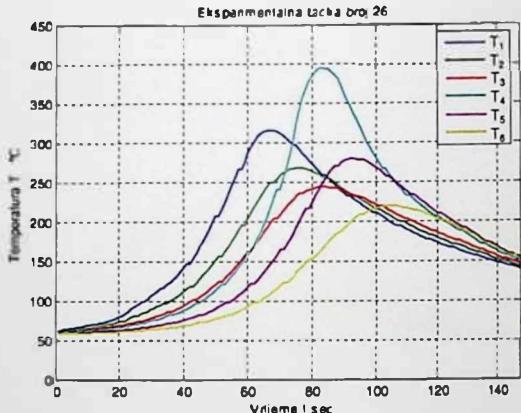
Slika P.2.55. Dijagram temperature u 23.
tački eksperimentalnog plana



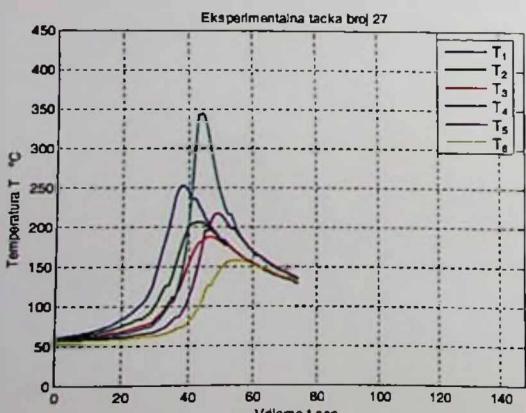
Slika P.2.56. Dijagram temperature u 24.
tački eksperimentalnog plana



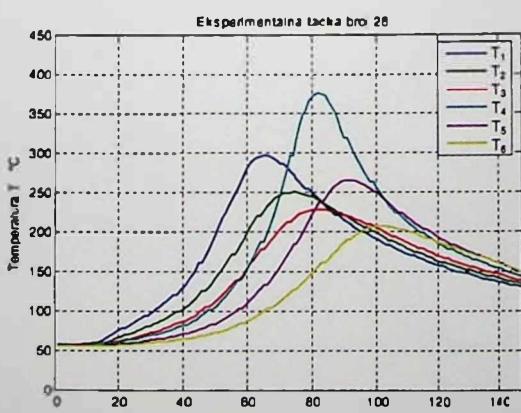
Slika P.2.57. Dijagram temperature u 25.
tački eksperimentalnog plana



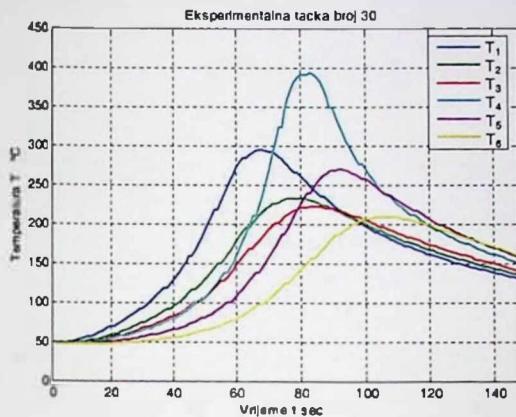
Slika P.2.58. Dijagram temperature u 26.
tački eksperimentalnog plana



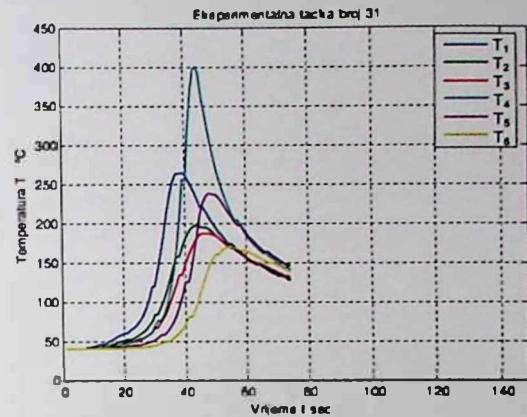
Slika P.2.59. Dijagram temperature u 27.
tački eksperimentalnog plana



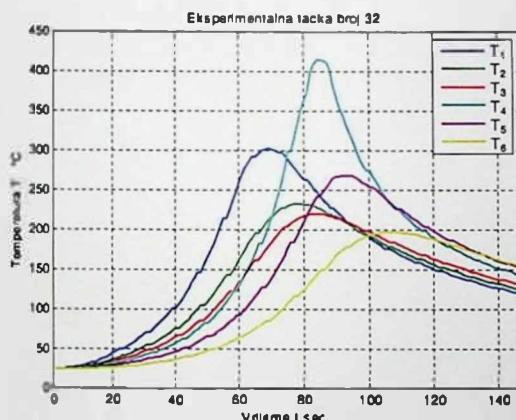
Slika P.2.60. Dijagram temperature u 28.
tački eksperimentalnog plana



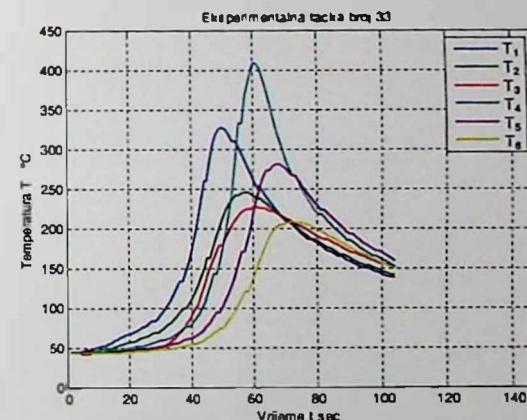
Slika P.2.61. Dijagram temperature u 30.
tački eksperimentalnog plana



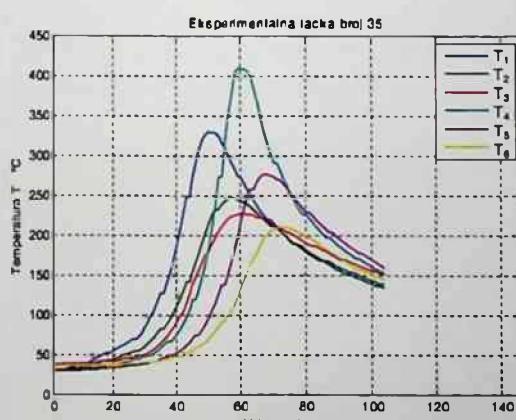
Slika P.2.62. Dijagram temperature u 31.
tački eksperimentalnog plana



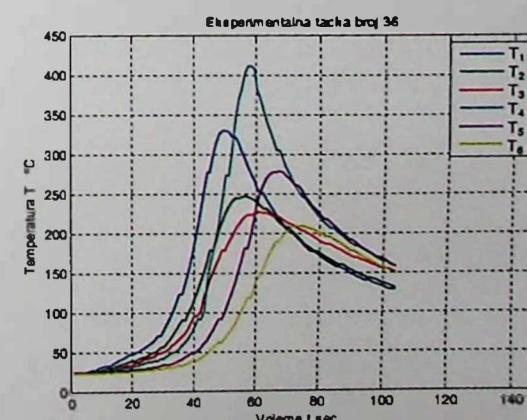
Slika P.2.63. Dijagram temperature u 32.
tački eksperimentalnog plana



Slika P.2.64. Dijagram temperature u 33.
tački eksperimentalnog plana



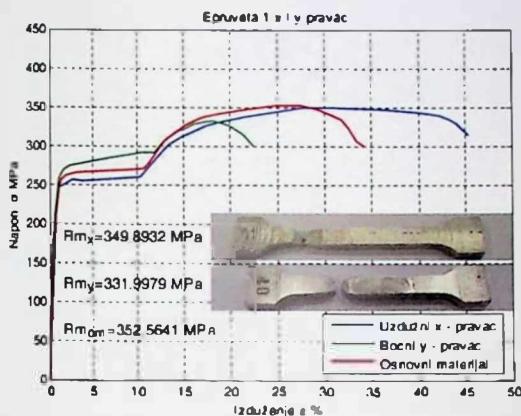
Slika P.2.65. Dijagram temperature u 35.
tački eksperimentalnog plana



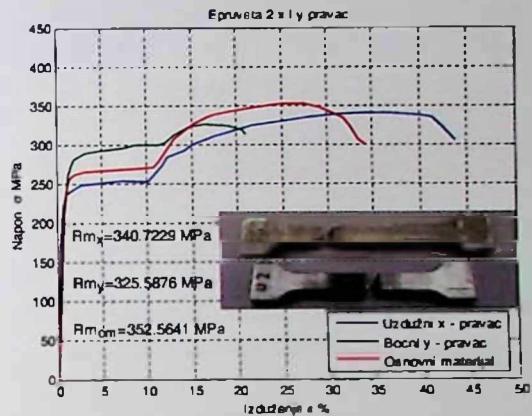
Slika P.2.66. Dijagram temperature u 36.
tački eksperimentalnog plana



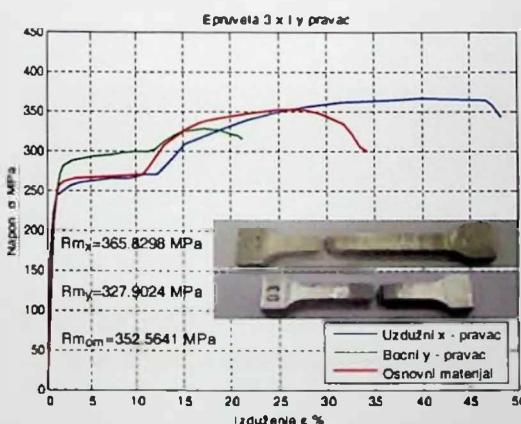
PRILOG 3. MEHANIČKA ISPITIVANJA



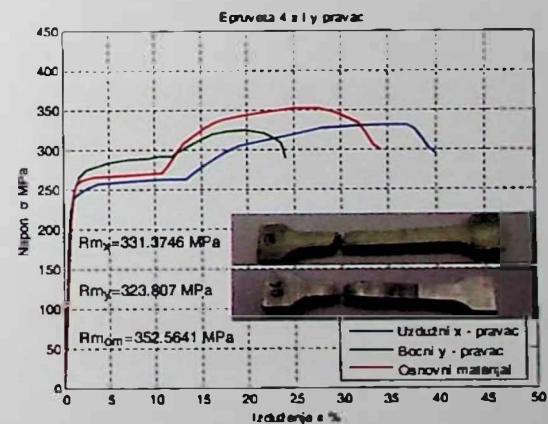
Slika P.3.1. Dijagram istezanja za 1. tačku eksperimentalnog plana



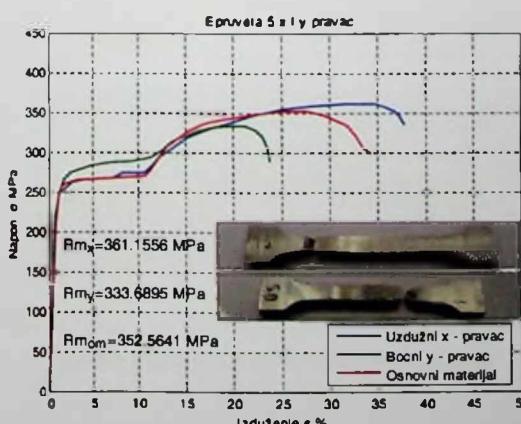
Slika P.3.2. Dijagram istezanja za 2. tačku eksperimentalnog plana



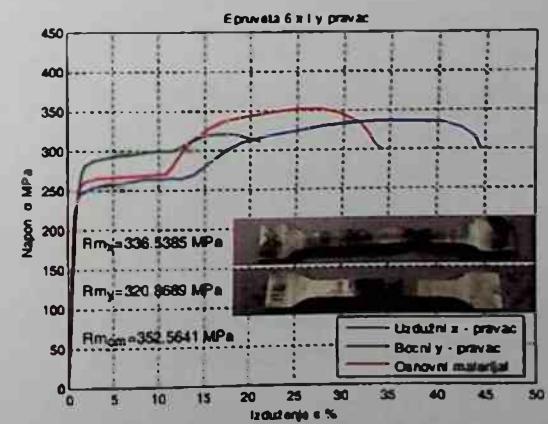
Slika P.3.3. Dijagram istezanja za 3. tačku eksperimentalnog plana



Slika P.3.4. Dijagram istezanja za 4. tačku eksperimentalnog plana

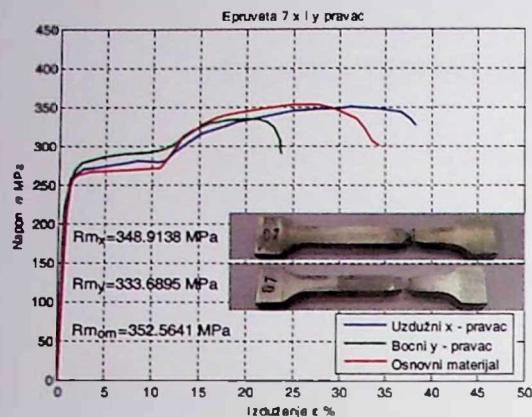


Slika P.3.5. Dijagram istezanja za 5. tačku eksperimentalnog plana

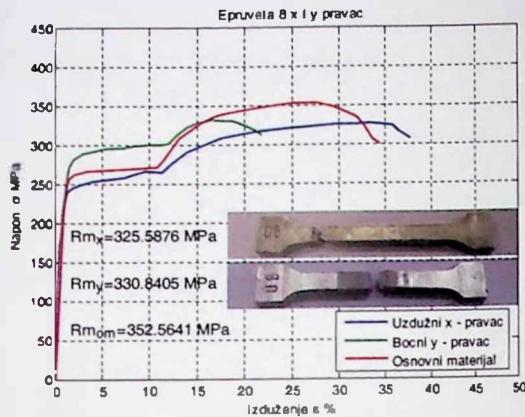


Slika P.3.6. Dijagram istezanja za 6. tačku eksperimentalnog plana

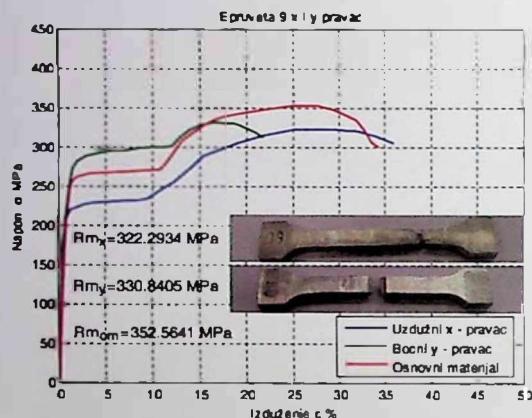
PRILOG 3. MEHANIČKA ISPITIVANJA



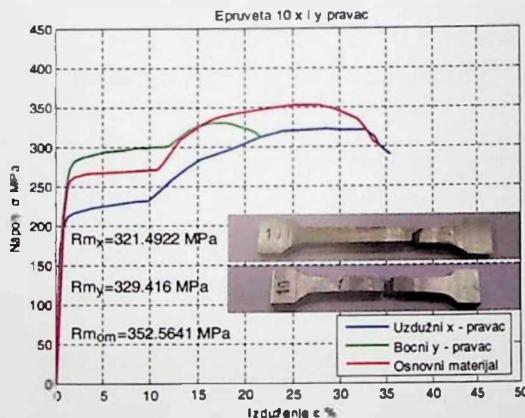
Slika P.3.7. Dijagram istezanja za 7. tačku eksperimentalnog plana



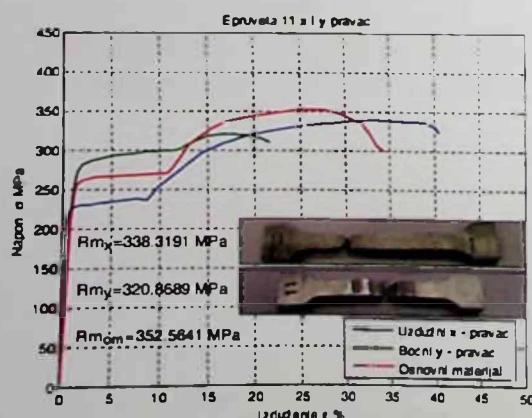
Slika P.3.8. Dijagram istezanja za 8. tačku eksperimentalnog plana



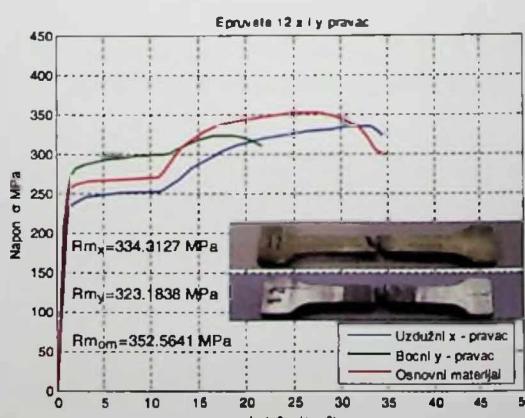
Slika P.3.9. Dijagram istezanja za 9. tačku eksperimentalnog plana



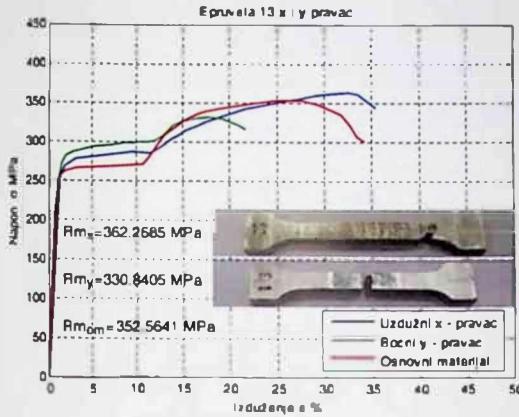
Slika P.3.10. Dijagram istezanja za 10. tačku eksperimentalnog plana



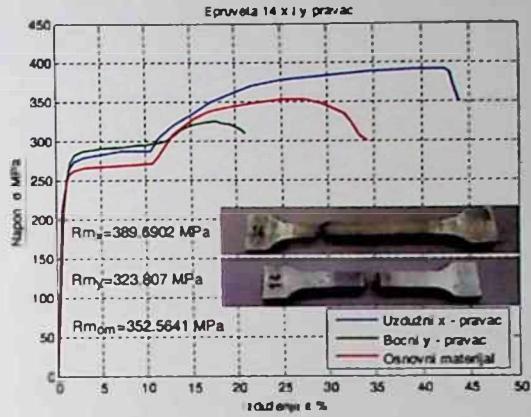
Slika P.3.11. Dijagram istezanja za 11. tačku eksperimentalnog plana



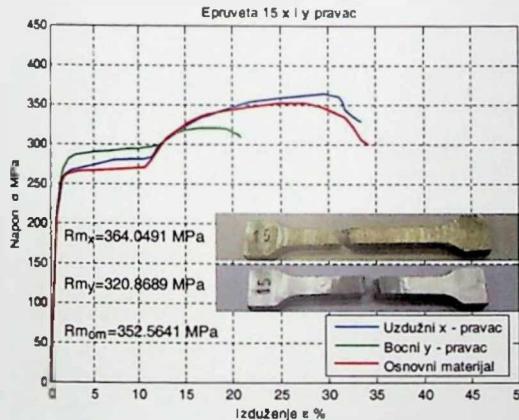
Slika P.3.12. Dijagram istezanja za 12. tačku eksperimentalnog plana



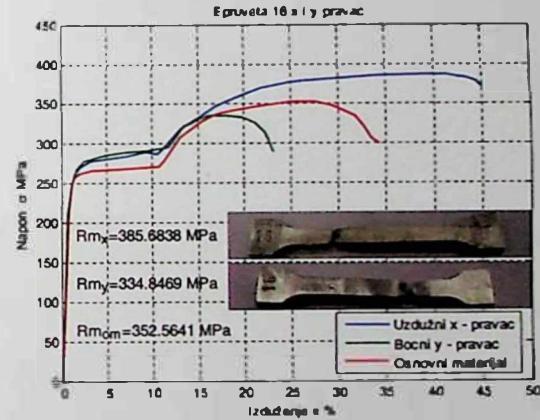
Slika P.3.13. Dijagram istezanja za 13. tačku eksperimentalnog plana



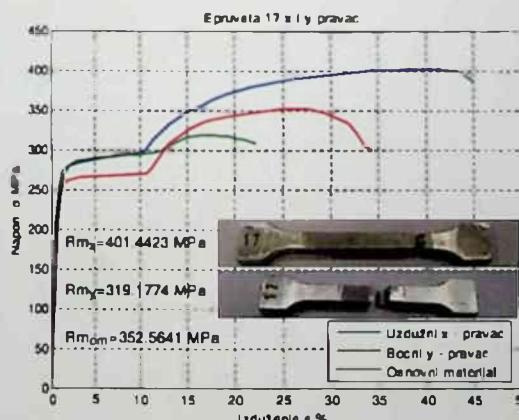
Slika P.3.14. Dijagram istezanja za 14. tačku eksperimentalnog plana



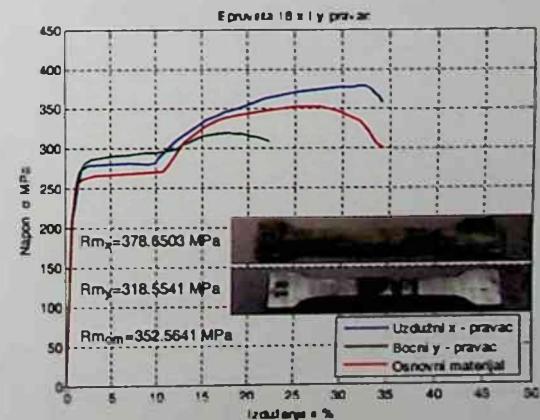
Slika P.3.15. Dijagram istezanja za 15. tačku eksperimentalnog plana



Slika P.3.16. Dijagram istezanja za 16. tačku eksperimentalnog plana

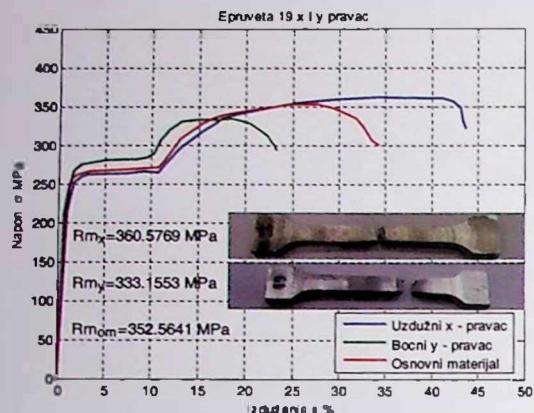


Slika P.3.17. Dijagram istezanja za 17. tačku eksperimentalnog plana

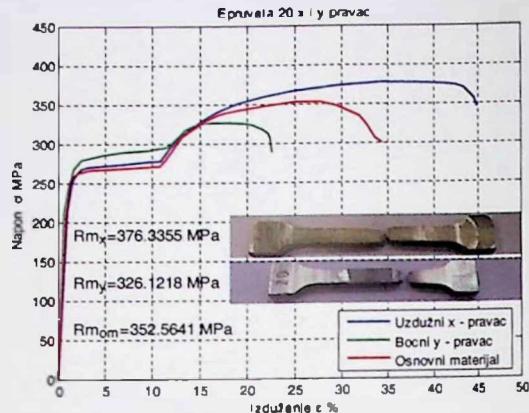


Slika P.3.18. Dijagram istezanja za 18. tačku eksperimentalnog plana

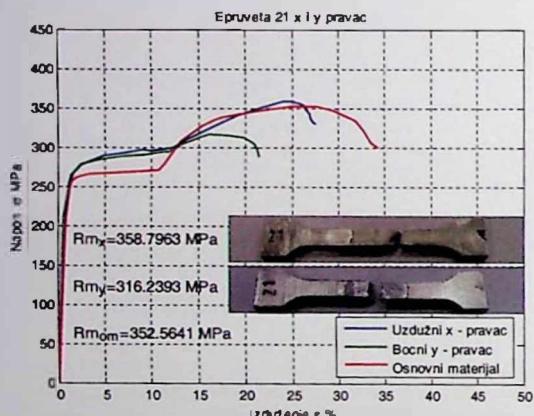
PRILOG 3. MEHANIČKA ISPITIVANJA



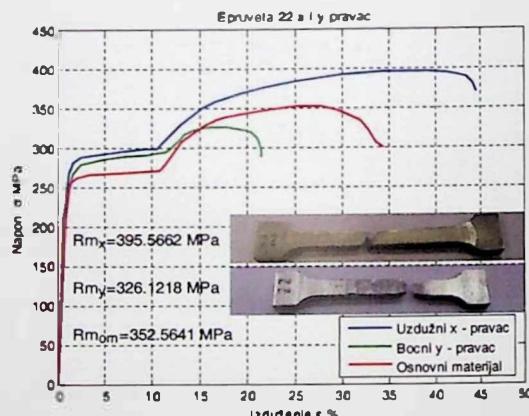
Slika P.3.19. Dijagram istezanja za 19. tačku eksperimentalnog plana



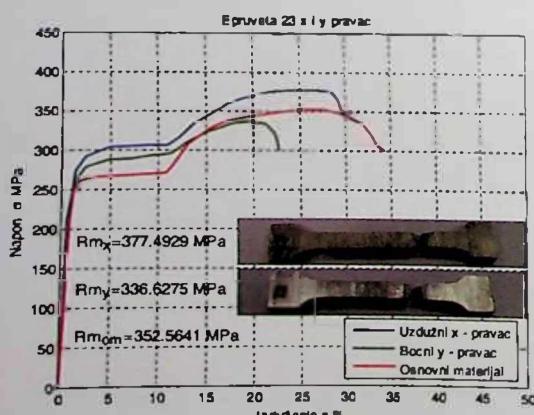
Slika P.3.20. Dijagram istezanja za 20. tačku eksperimentalnog plana



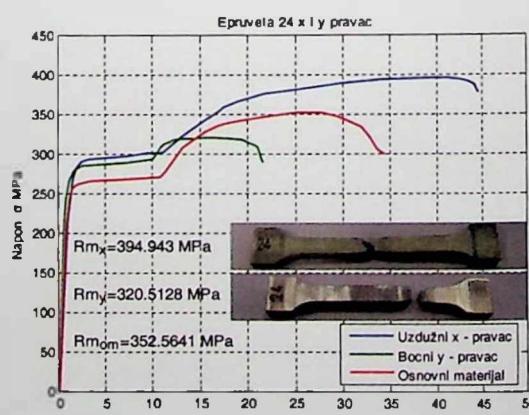
Slika P.3.21. Dijagram istezanja za 21. tačku eksperimentalnog plana



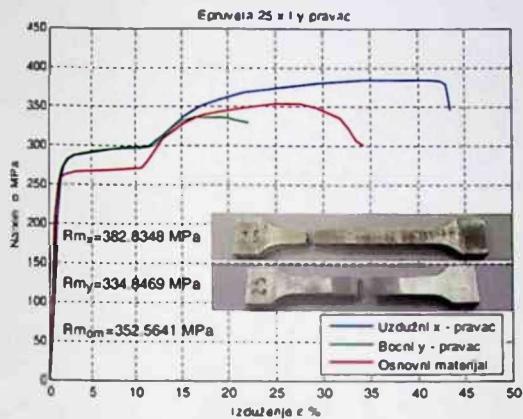
Slika P.3.22. Dijagram istezanja za 22. tačku eksperimentalnog plana



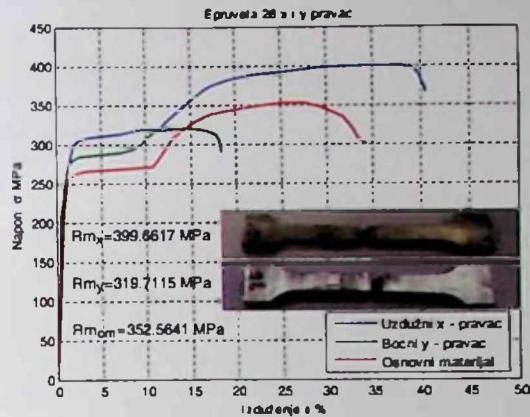
Slika P.3.23. Dijagram istezanja za 23. tačku eksperimentalnog plana



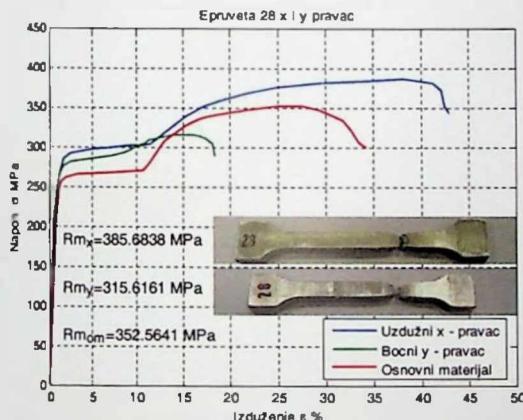
Slika P.3.24. Dijagram istezanja za 24. tačku eksperimentalnog plana



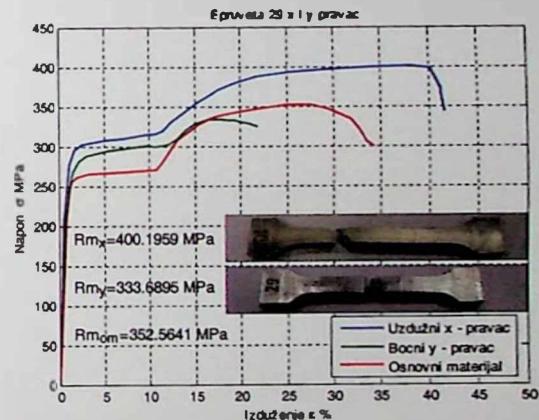
Slika P.3.25. Dijagram istezanja za 25. tačku eksperimentalnog plana



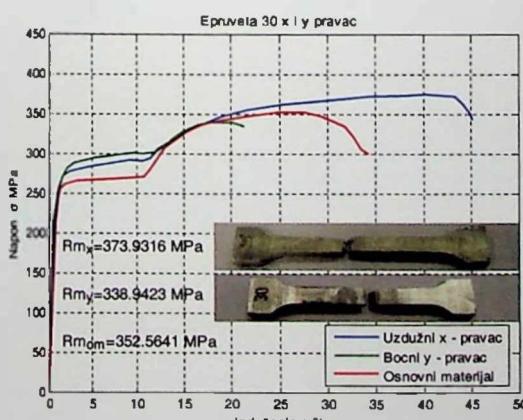
Slika P.3.26. Dijagram istezanja za 26. tačku eksperimentalnog plana



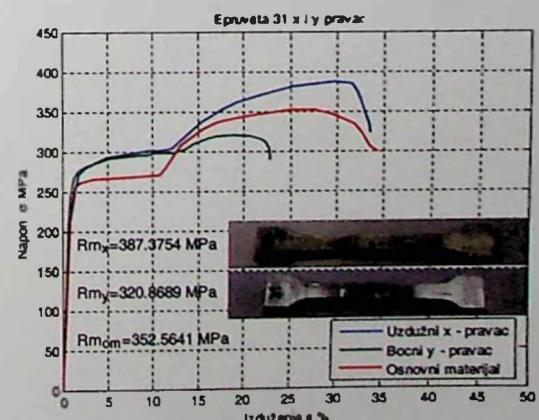
Slika P.3.27. Dijagram istezanja za 28. tačku eksperimentalnog plana



Slika P.3.28. Dijagram istezanja za 29. tačku eksperimentalnog plana

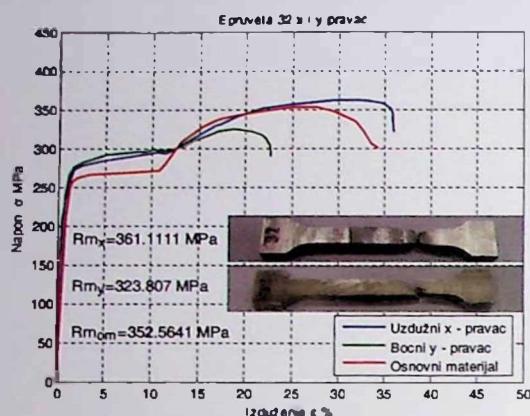


Slika P.3.29. Dijagram istezanja za 30. tačku eksperimentalnog plana

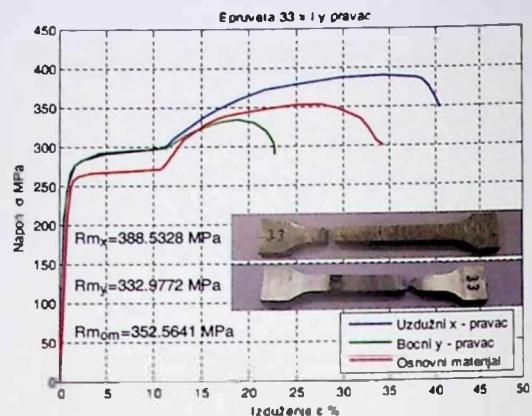


Slika P.3.30. Dijagram istezanja za 31. tačku eksperimentalnog plana

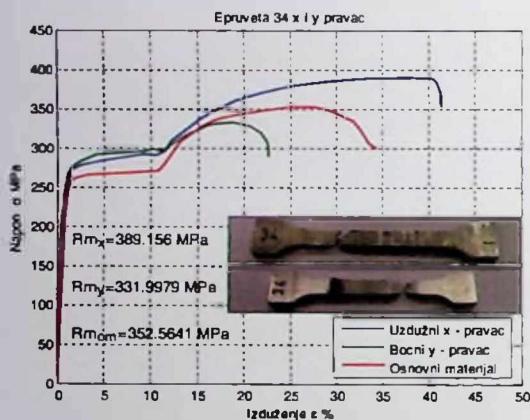
PRILOG 3. MEHANIČKA ISPITIVANJA



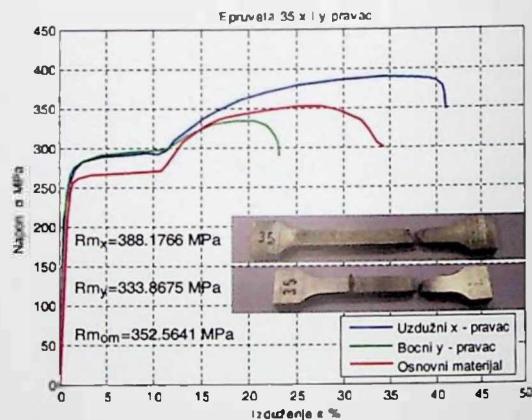
Slika P.3.31. Dijagram istezanja za 32. tačku eksperimentalnog plana



Slika P.3.32. Dijagram istezanja za 33. tačku eksperimentalnog plana



Slika P.3.33. Dijagram istezanja za 34. tačku eksperimentalnog plana

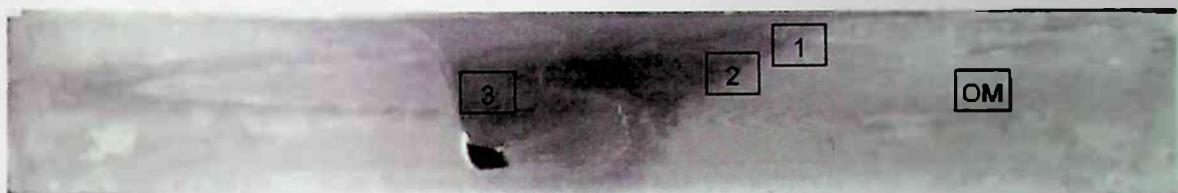


Slika P.3.34. Dijagram istezanja za 35. tačku eksperimentalnog plana

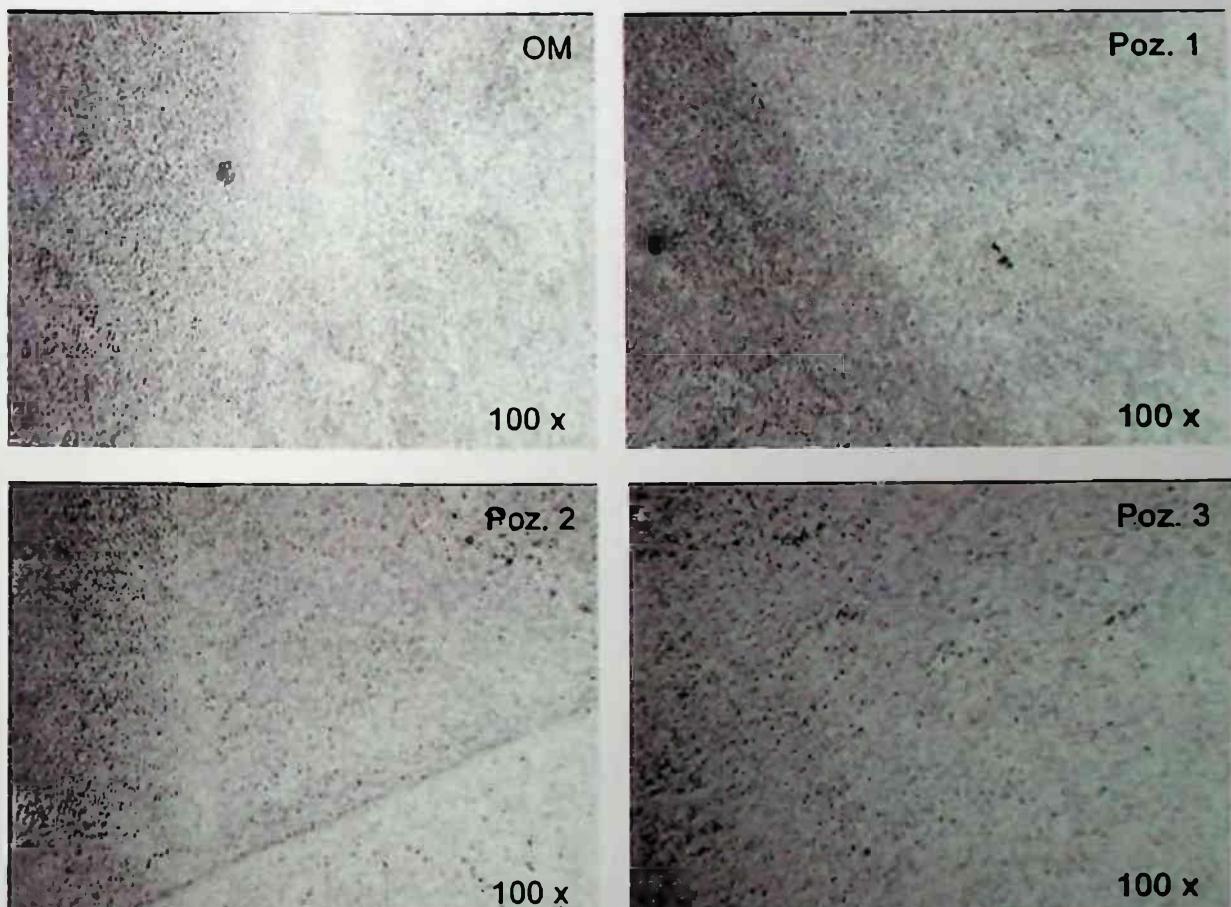


Slika P.3.35. Ispitane epruvete za određivanje udarne žilavosti u svim tačkama eksperimentalnog plana

PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



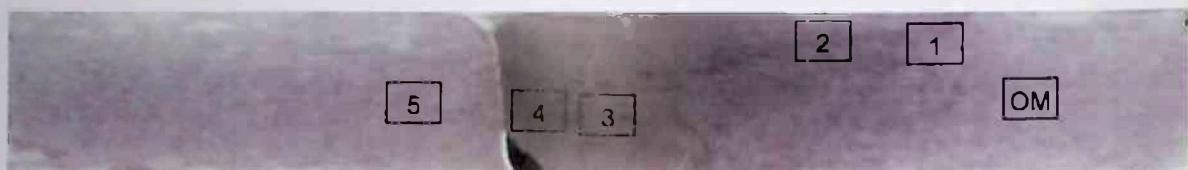
Slika P.4.1. Makrostruktura uzorka broj 1



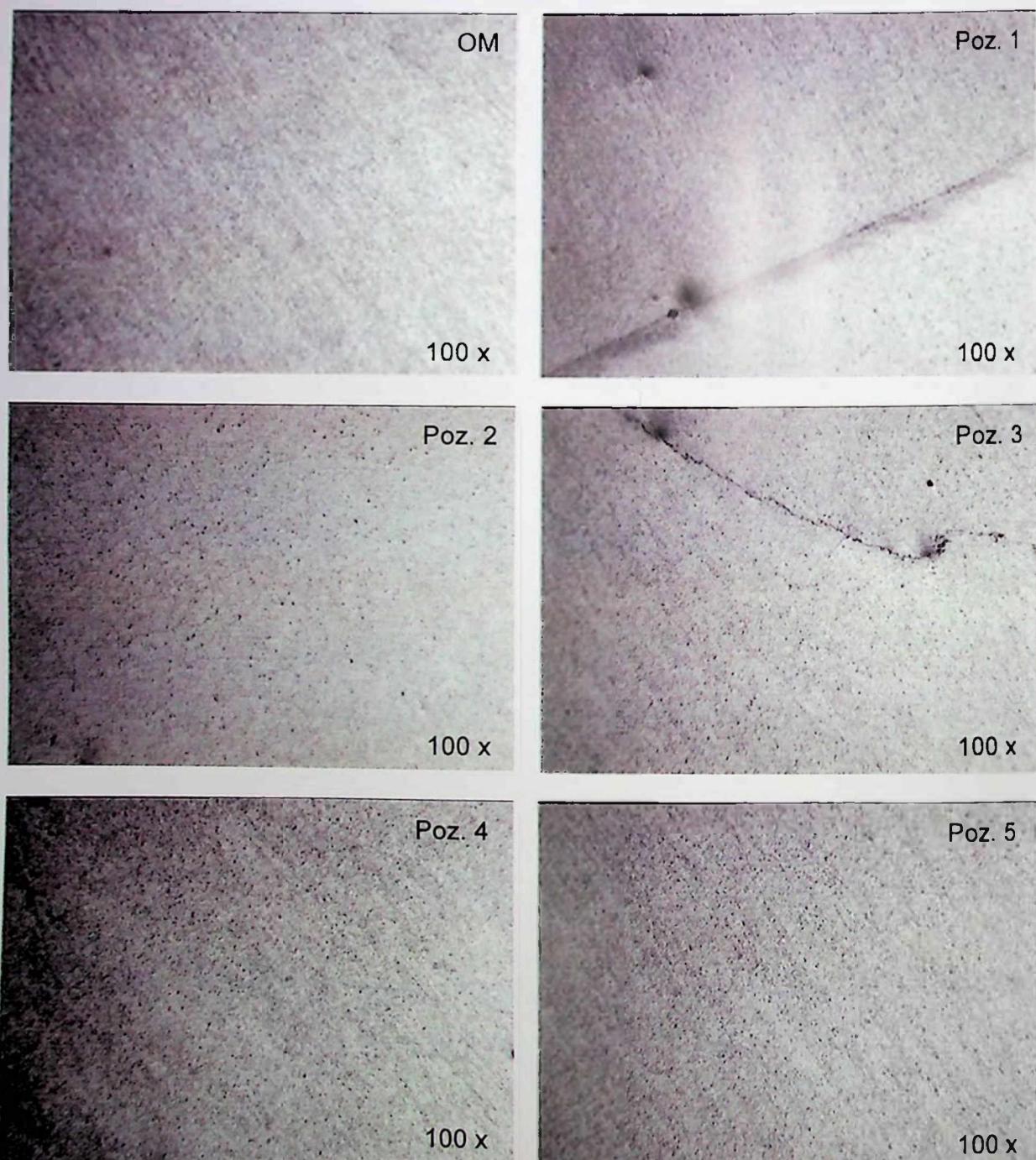
Slika P.4.2. Mikrostruktura uzorka broj 1



PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



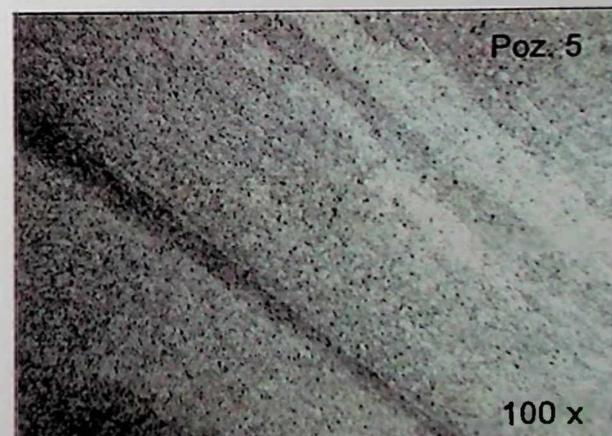
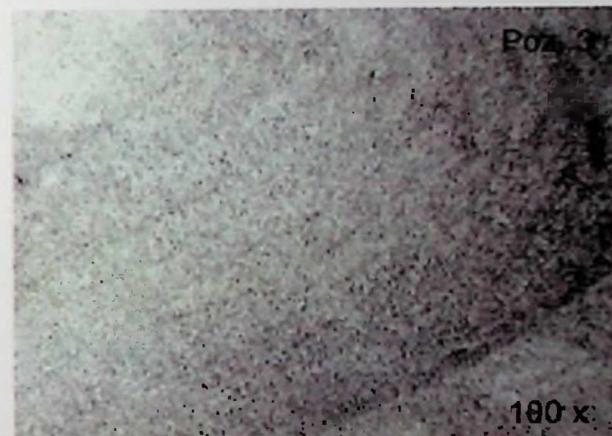
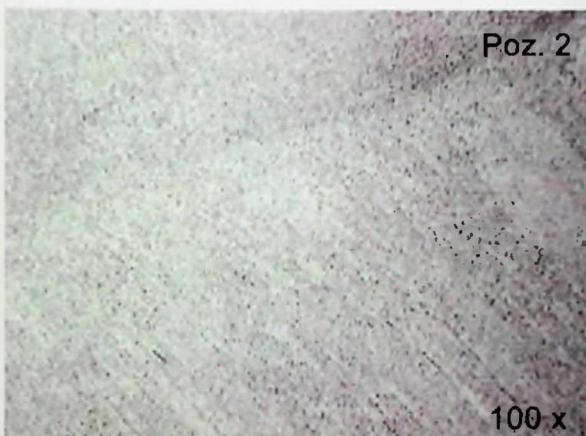
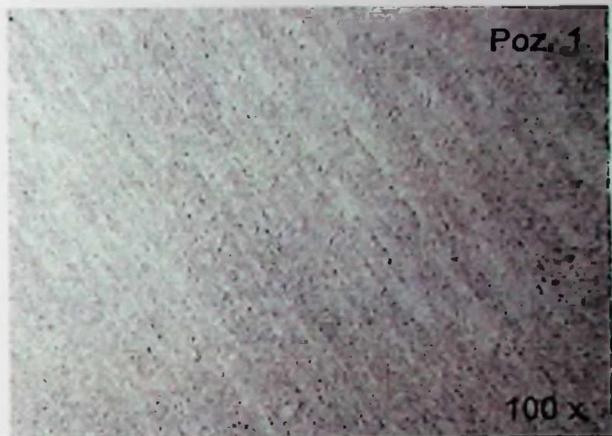
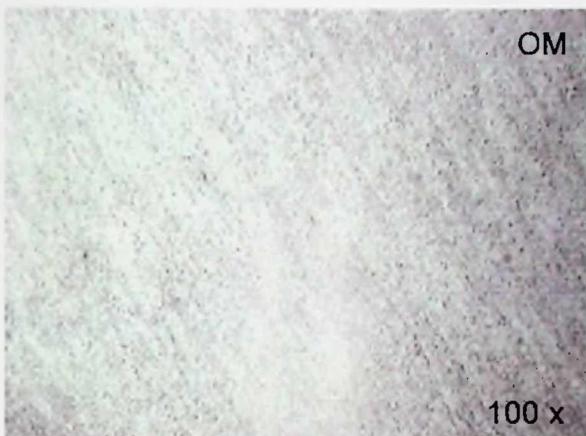
Slika P.4.3. Makrostruktura uzorka broj 2



Slika P.4.4. Mikrostruktura uzorka broj 2

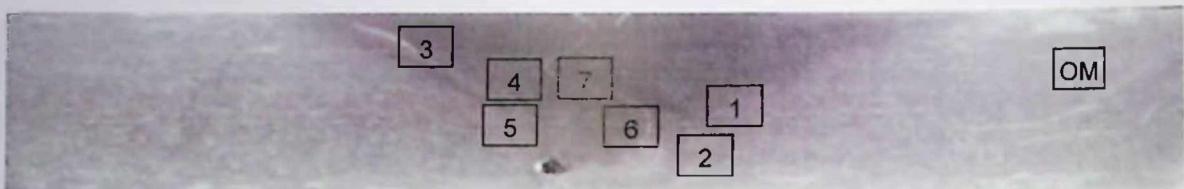


Slika P.4.5. Makrostruktura uzorka broj 4

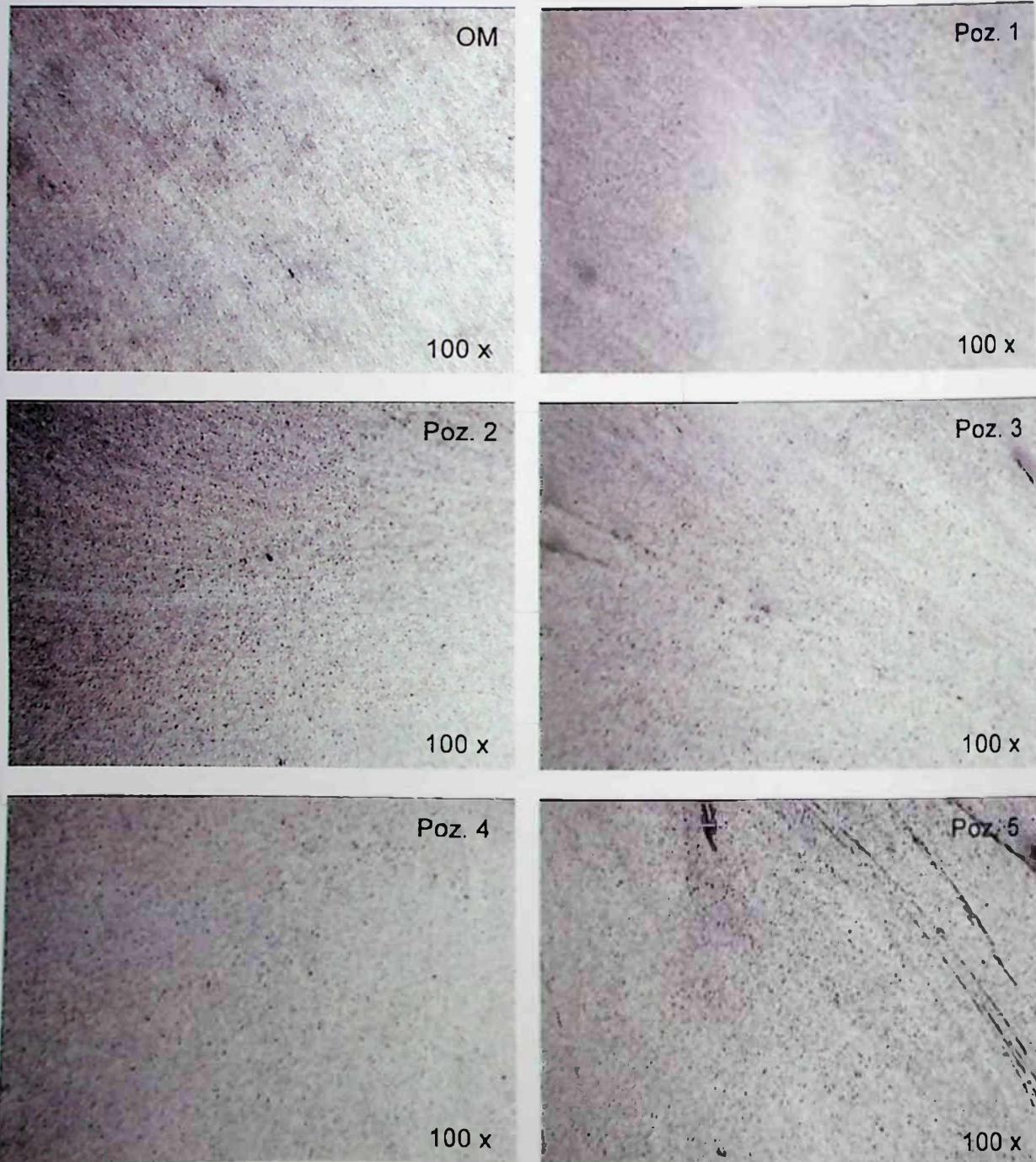


Slika P.4.6. Mikrostruktura uzorka broj 4

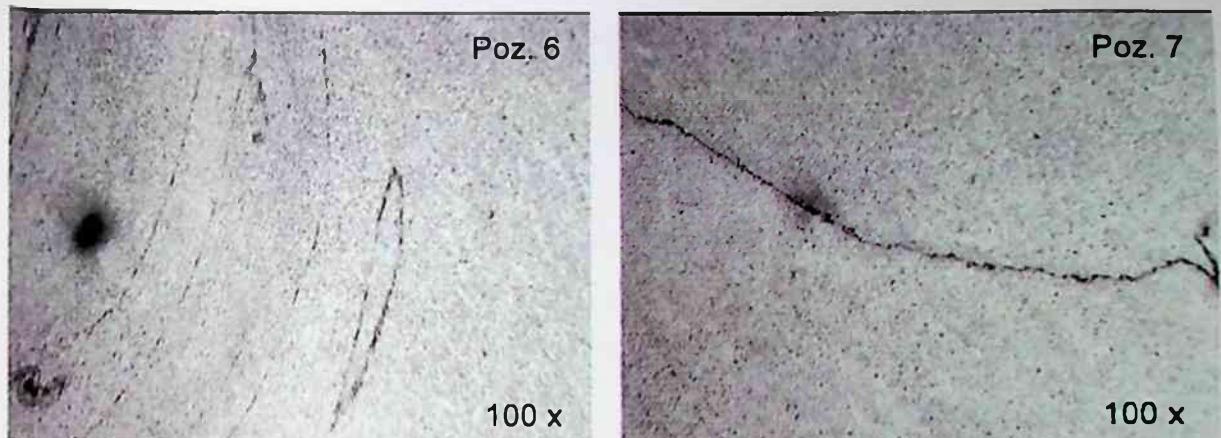
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



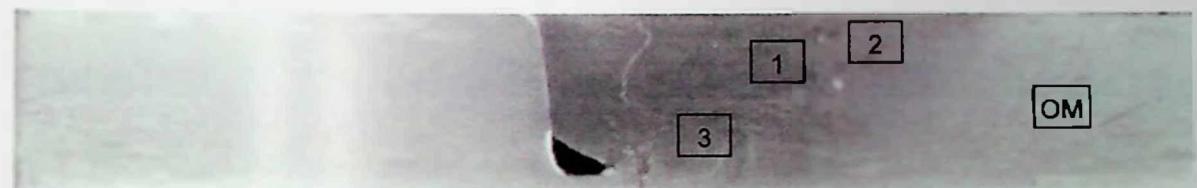
Slika P.4.7. Makrostruktura uzorka broj 5



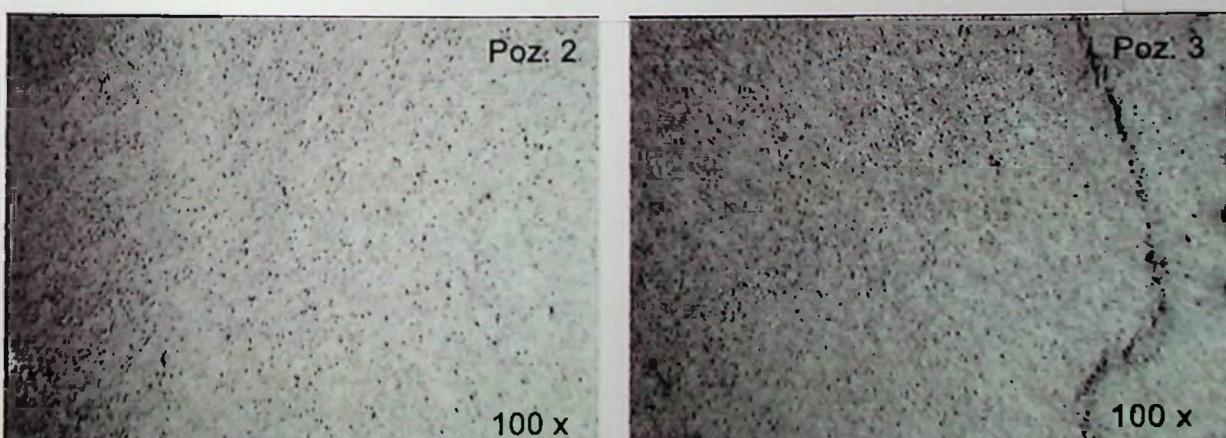
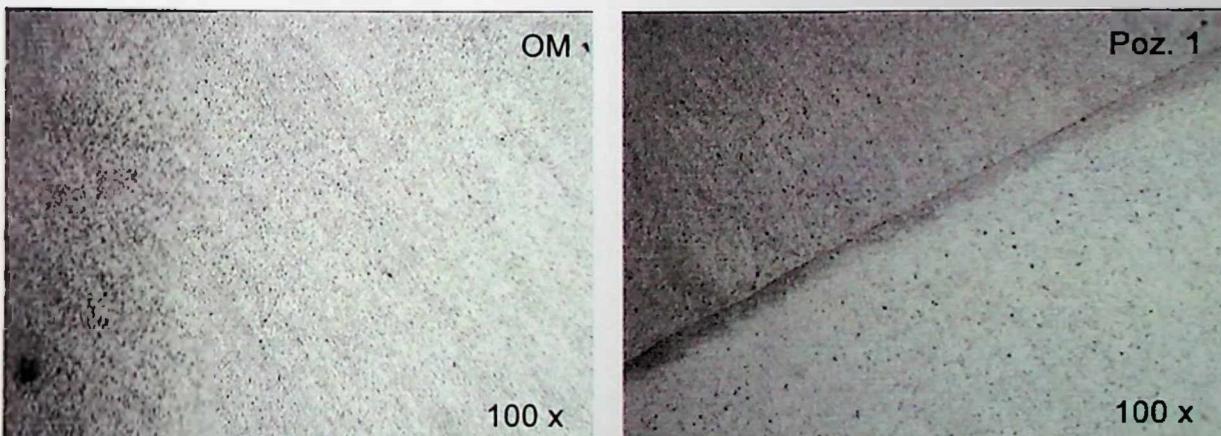
Slika P.4.8. Mikrostruktura uzorka broj 5



Slika P.4.8. Mikrostruktura uzorka broj 5 (nastavak)

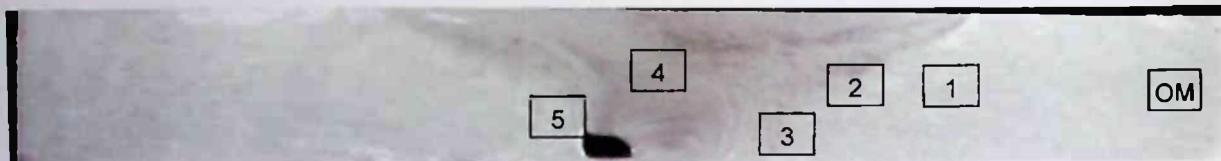


Slika P.4.9. Makrostruktura uzorka broj 6



Slika P.4.10. Mikrostruktura uzorka broj 6

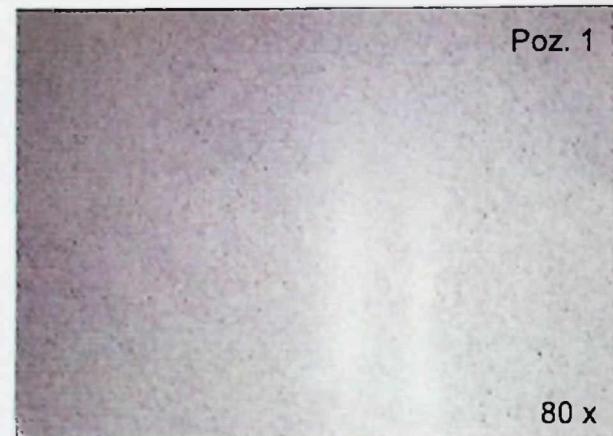
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



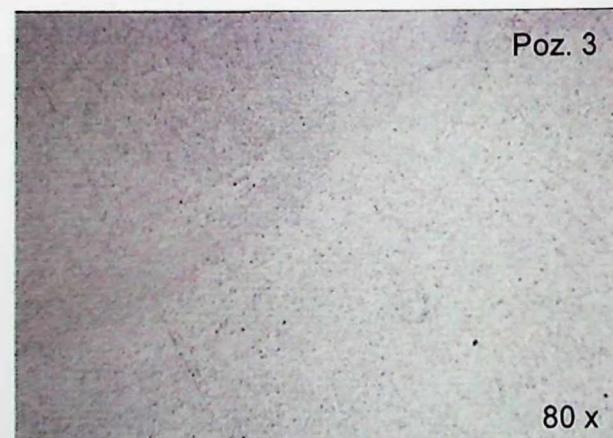
Slika P.4.11. Makrostruktura uzorka broj 7



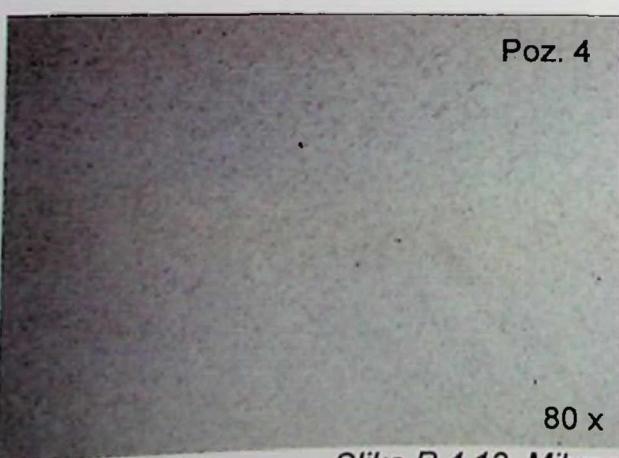
80 x



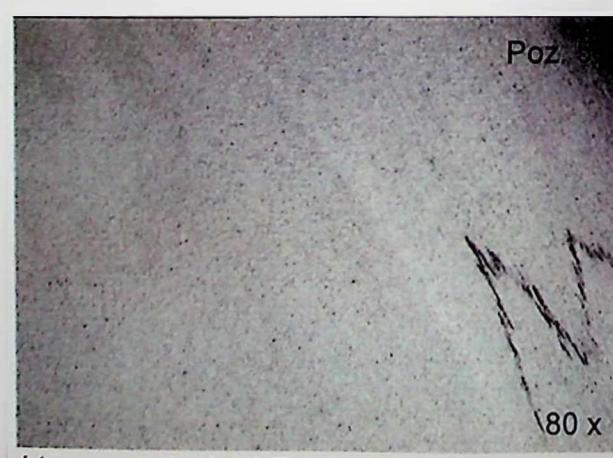
80 x



80 x



80 x

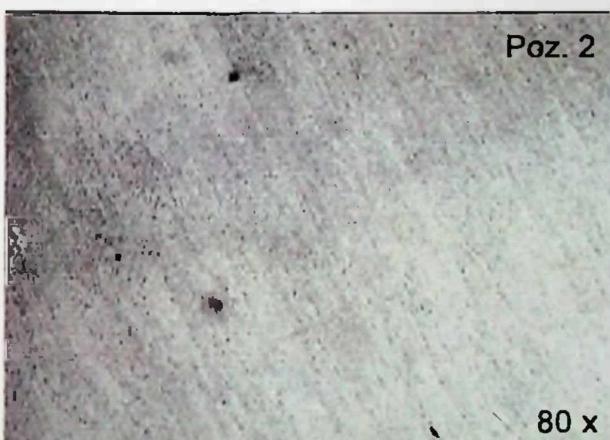
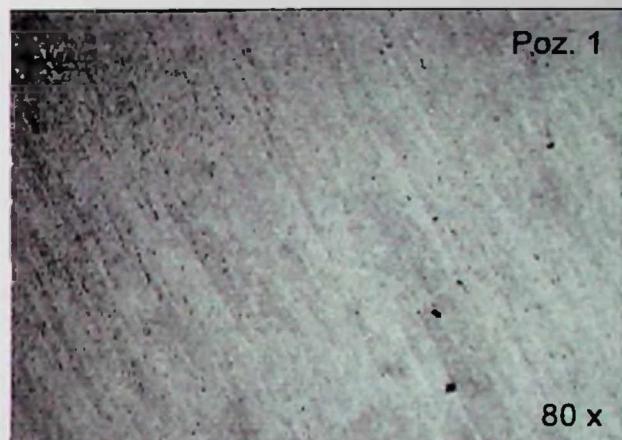


80 x

Slika P.4.12. Mikrostruktura uzorka broj 7

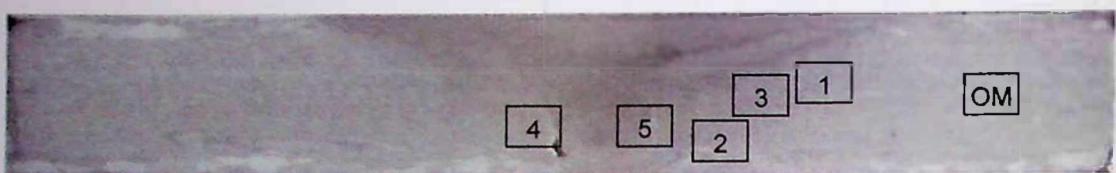


Slika P.4.13. Makrostruktura uzorka broj 8

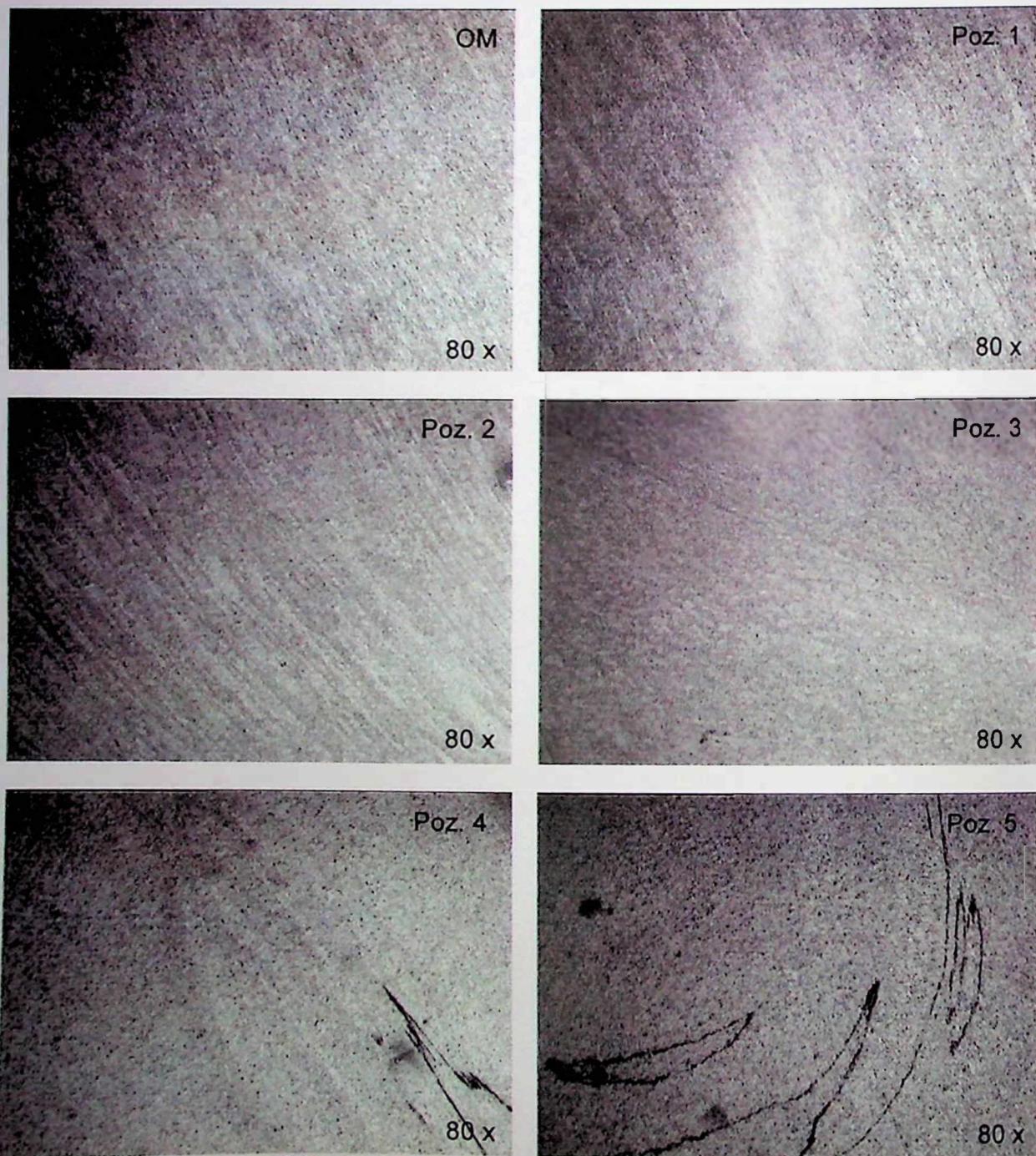


Slika P.4.14. Mikrostruktura uzorka broj 8

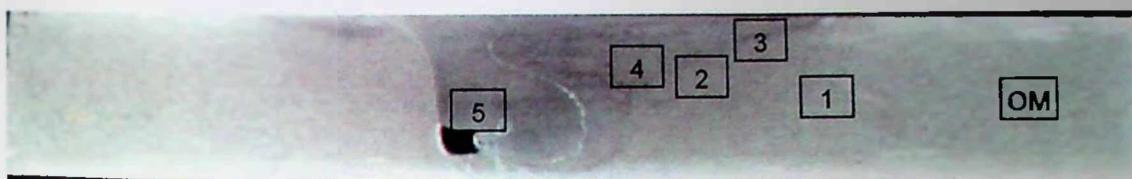
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



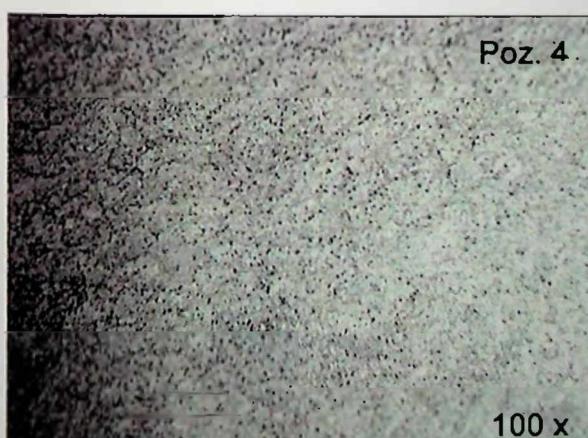
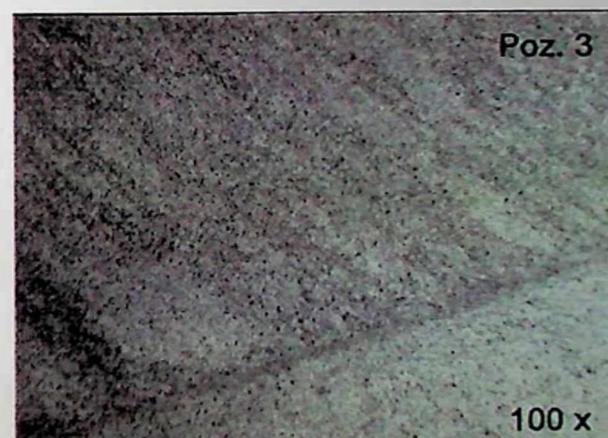
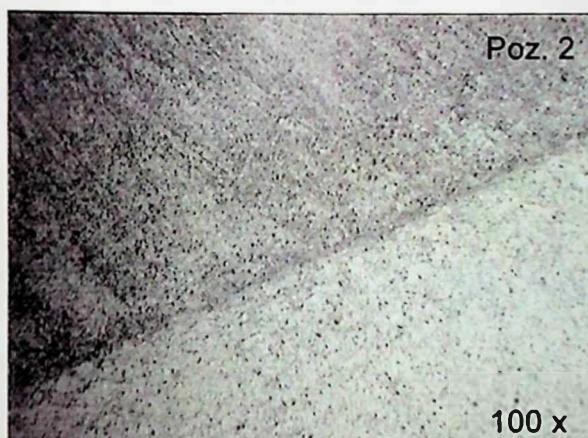
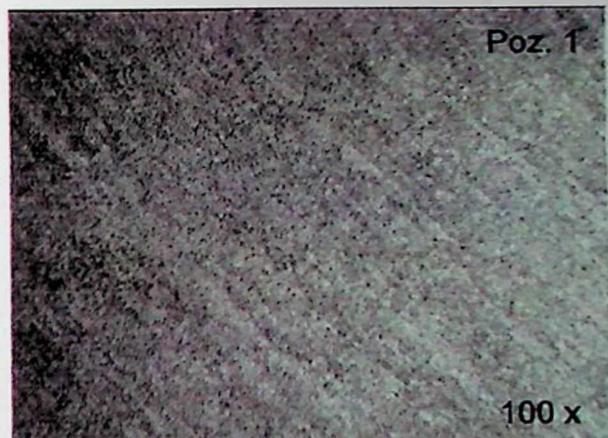
Slika P.4.15. Makrostruktura uzorka broj 9



Slika P.4.16. Mikrostruktura uzorka broj 9

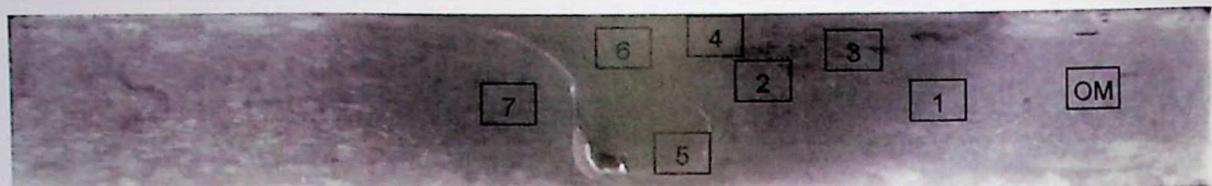


Slika P.4.17. Makrostruktura uzorka broj 10



Slika P.4.18. Mikrostruktura uzorka broj 10

PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



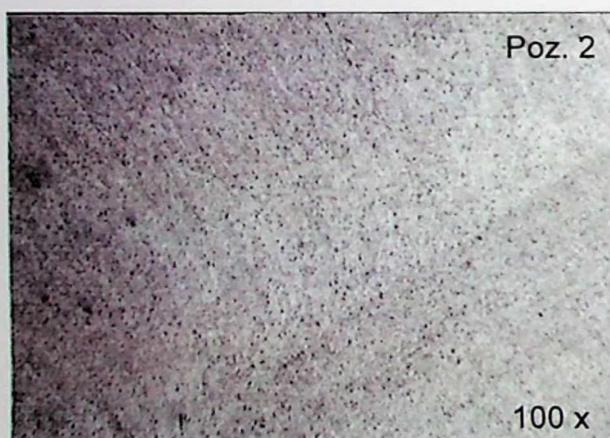
Slika P.4.19. Makrostruktura uzorka broj 11



100 x



100 x



100 x



100 x

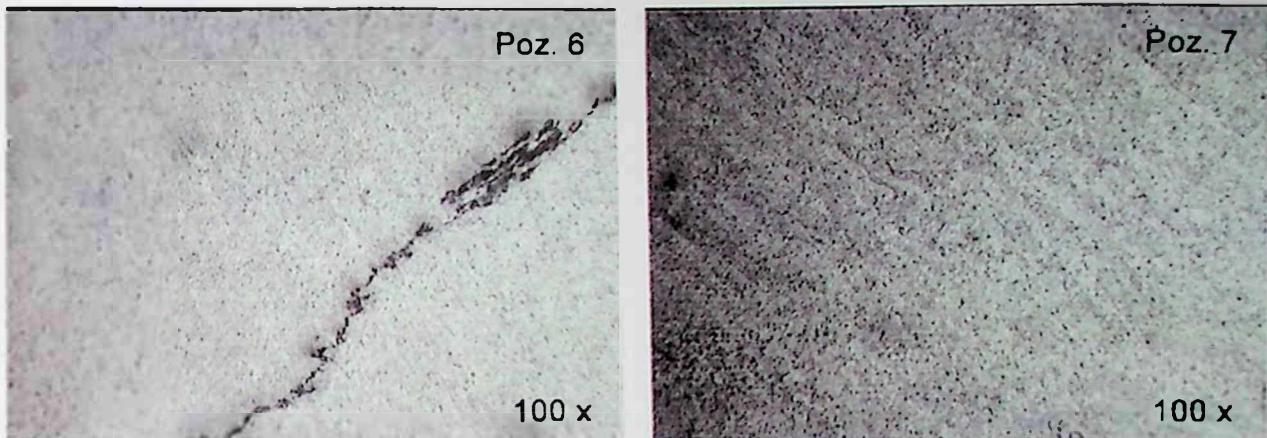


100 x

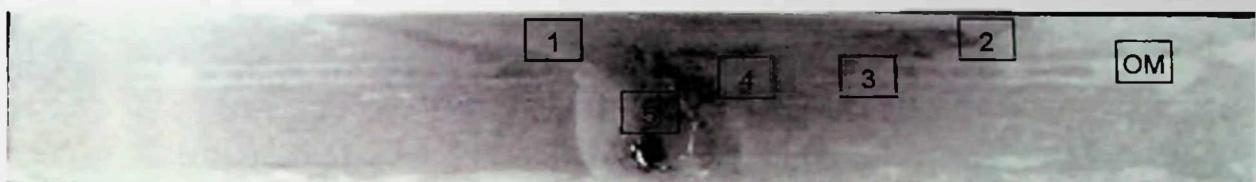


100 x

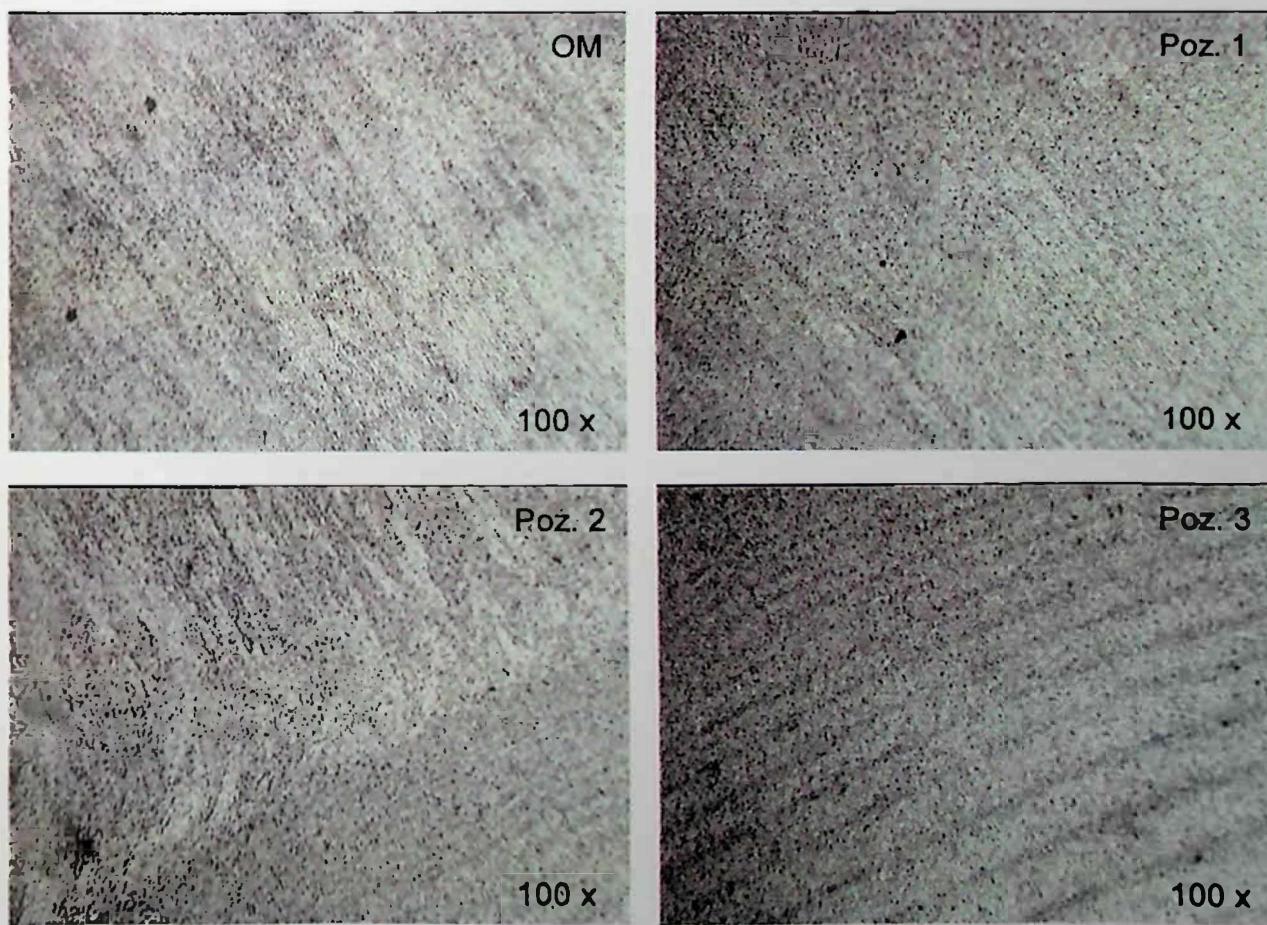
Slika P.4.20. Mikrostruktura uzorka broj 11



Slika P.4.20. Mikrostruktura uzorka broj 11 (nastavak)

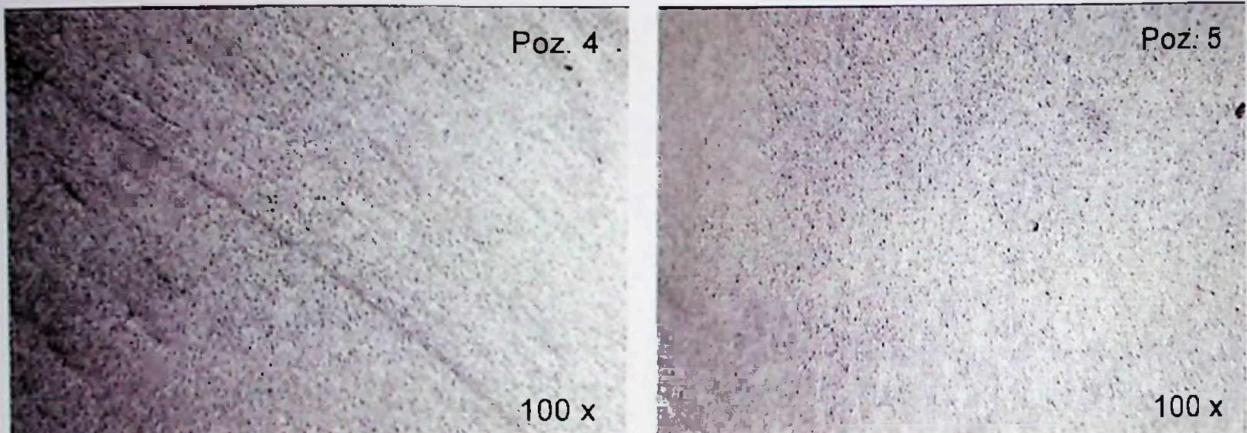


Slika P.4.21. Makrostruktura uzorka broj 12



Slika P.4.22. Mikrostruktura uzorka broj 12

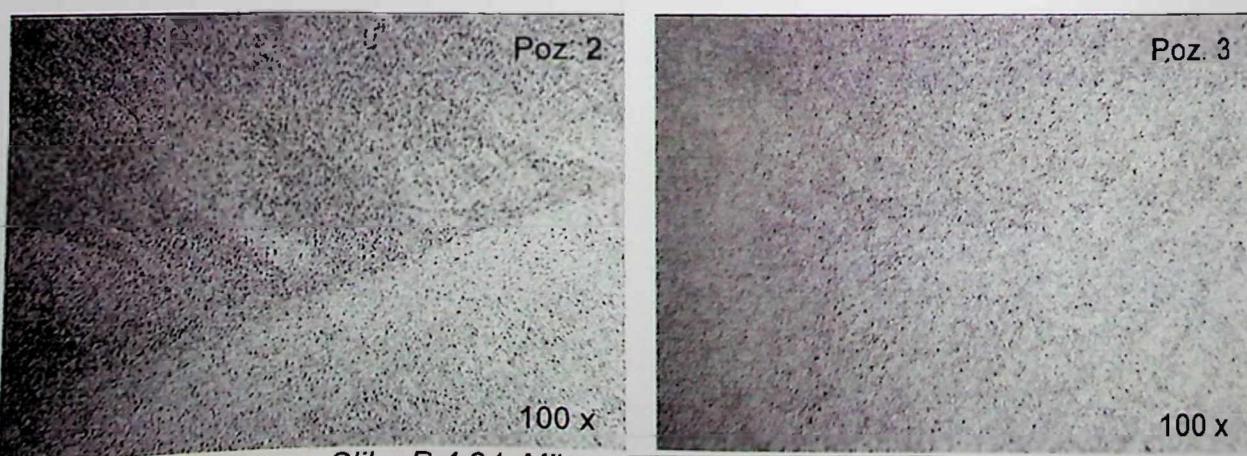
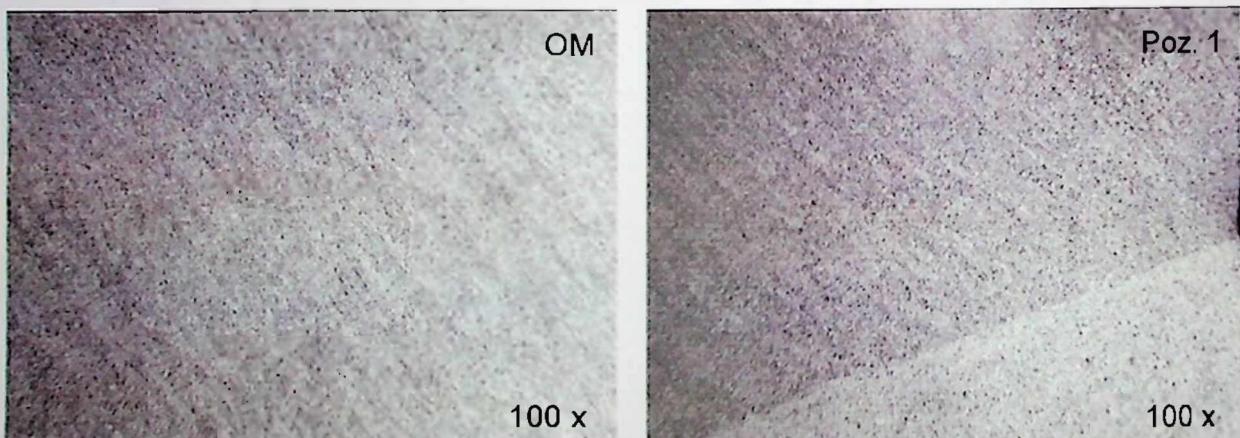
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



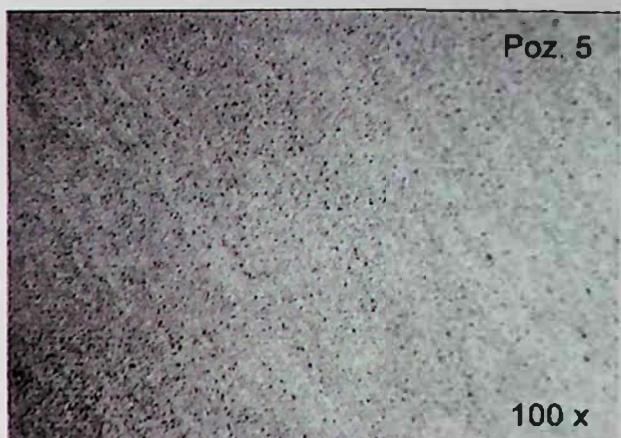
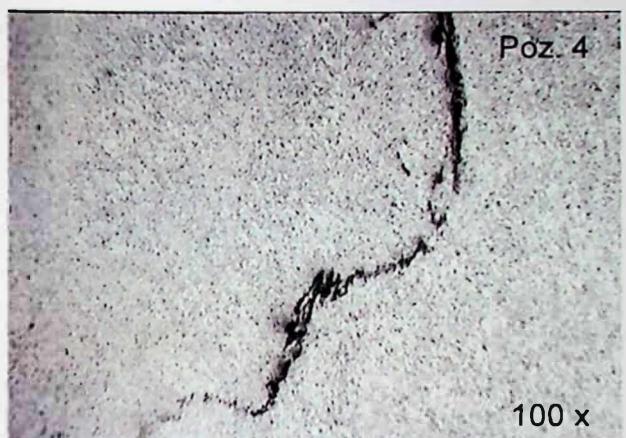
Slika P.4.22. Mikrostruktura uzorka broj 12 (nastavak)



Slika P.4.23. Makrostruktura uzorka broj 13



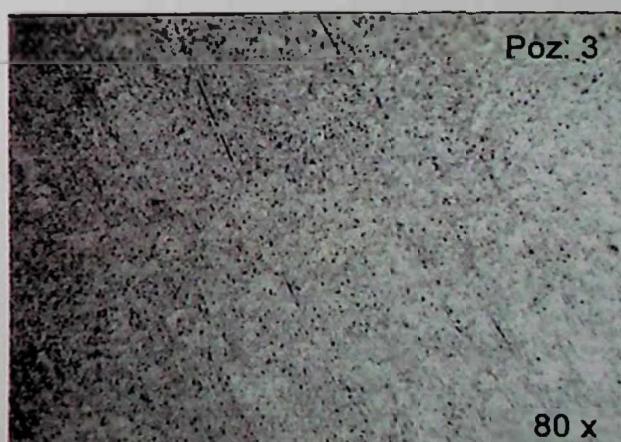
Slika P.4.24. Mikrostruktura uzorka broj 13



Slika P.4.24. Mikrostruktura uzorka broj 13 (nastavak)

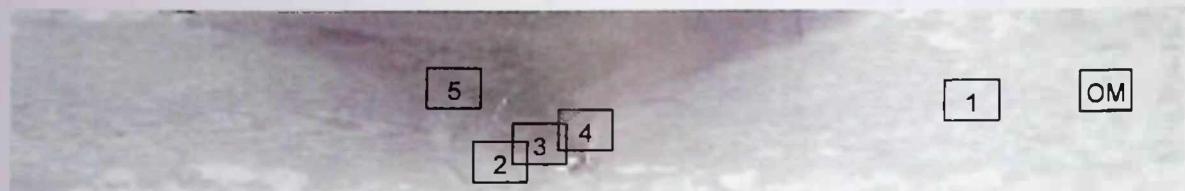


Slika P.4.25. Makrostruktura uzorka broj 14

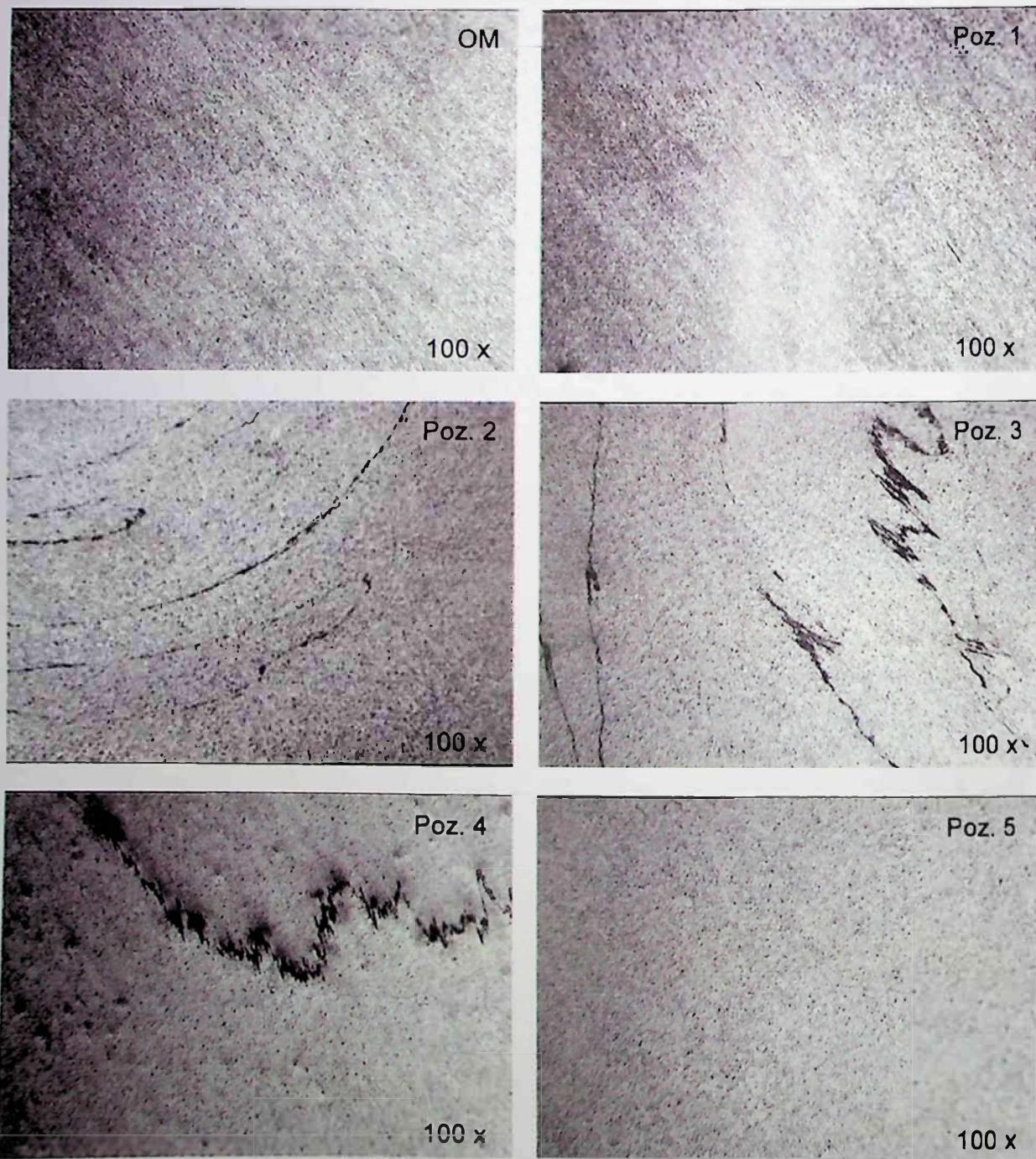


Slika P.4.26. Mikrostruktura uzorka broj 14

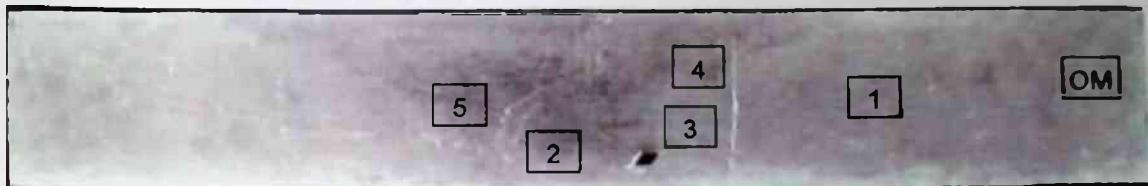
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



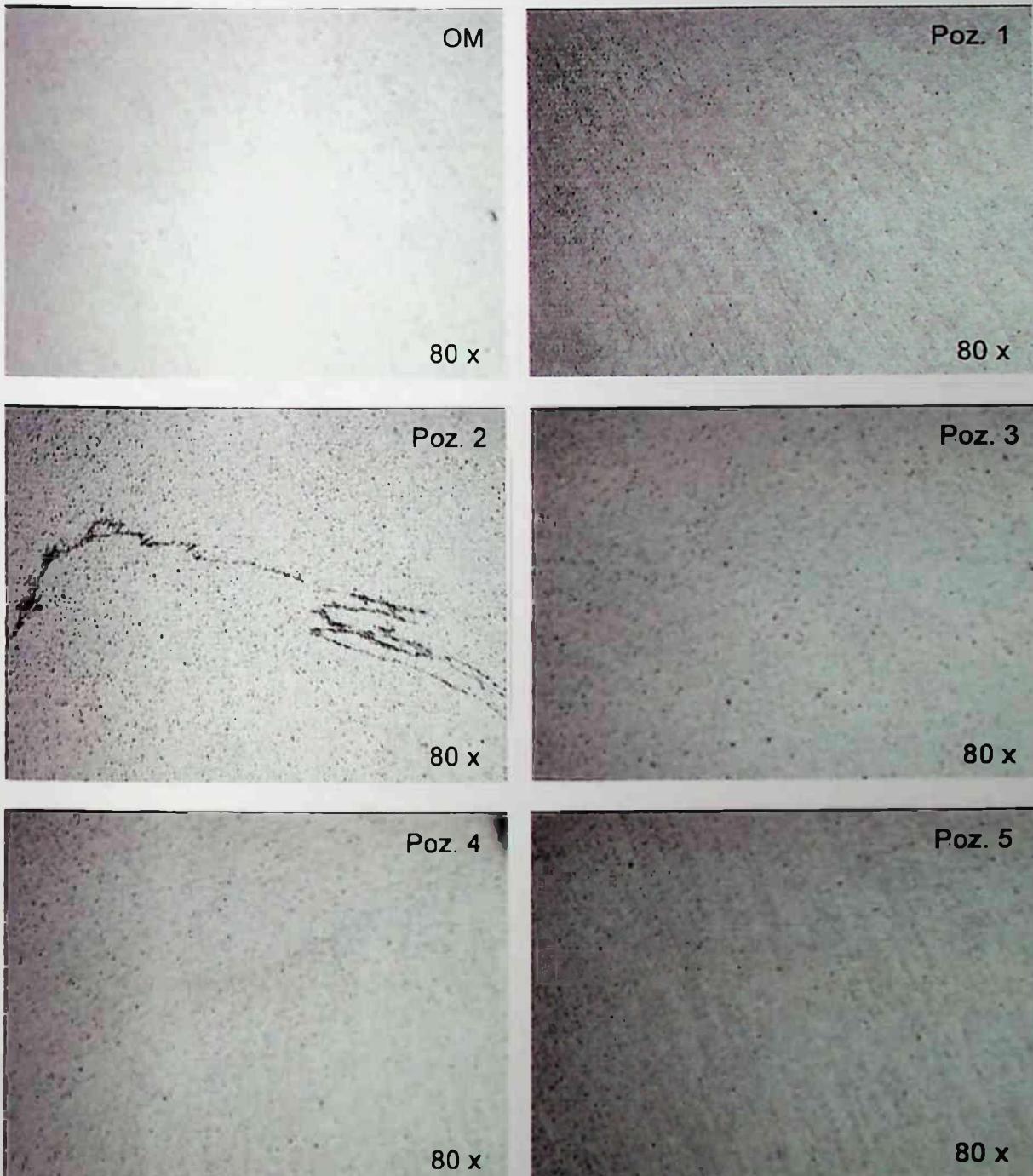
Slika P.4.27. Makrostruktura uzorka broj 15



Slika P.4.28. Mikrostruktura uzorka broj 15

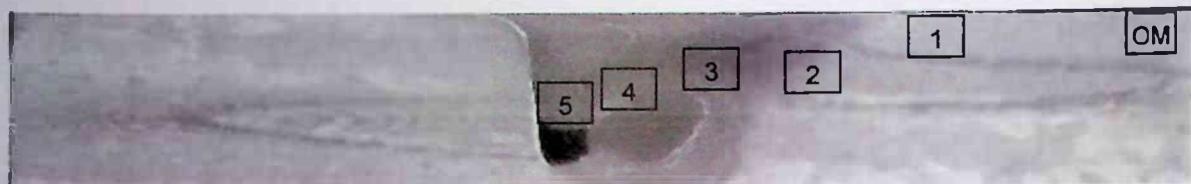


Slika P.4.29. Makrostruktura uzorka broj 16

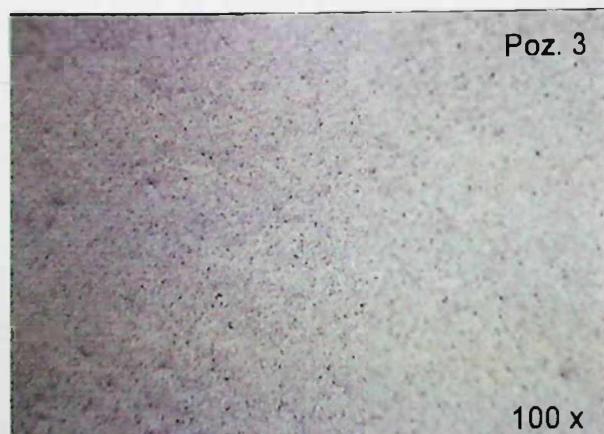
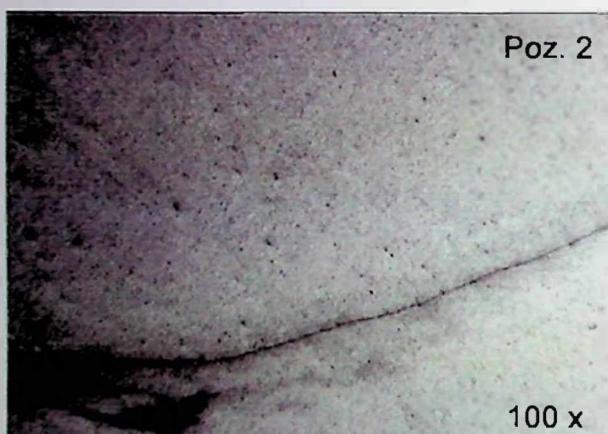
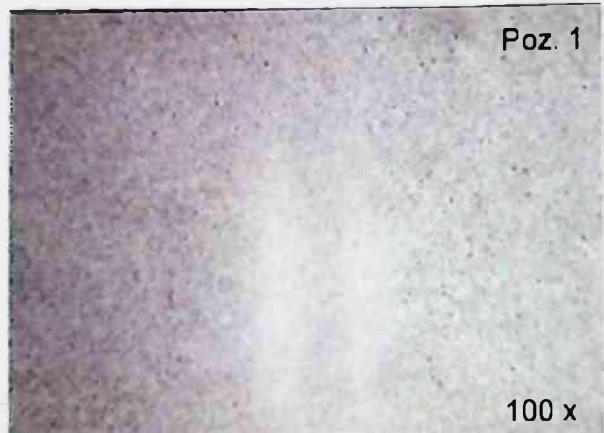
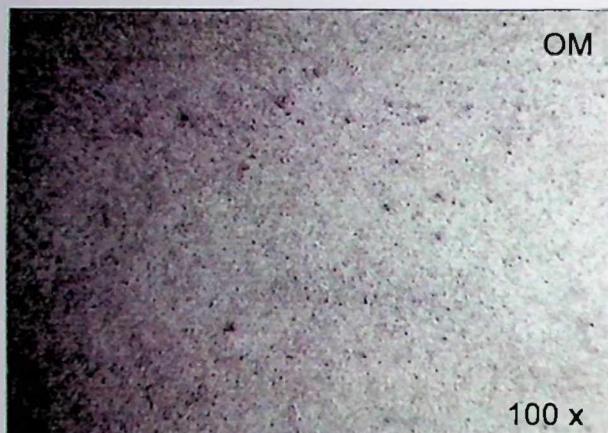


Slika P.4.32. Mikrostruktura uzorka broj 16

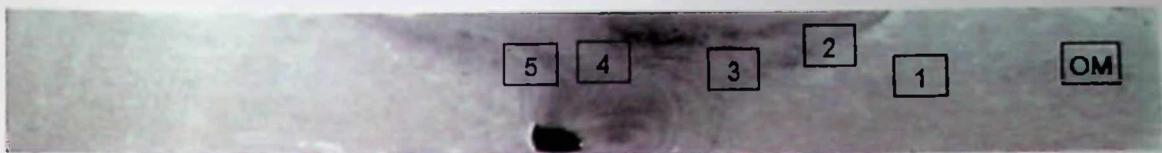
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



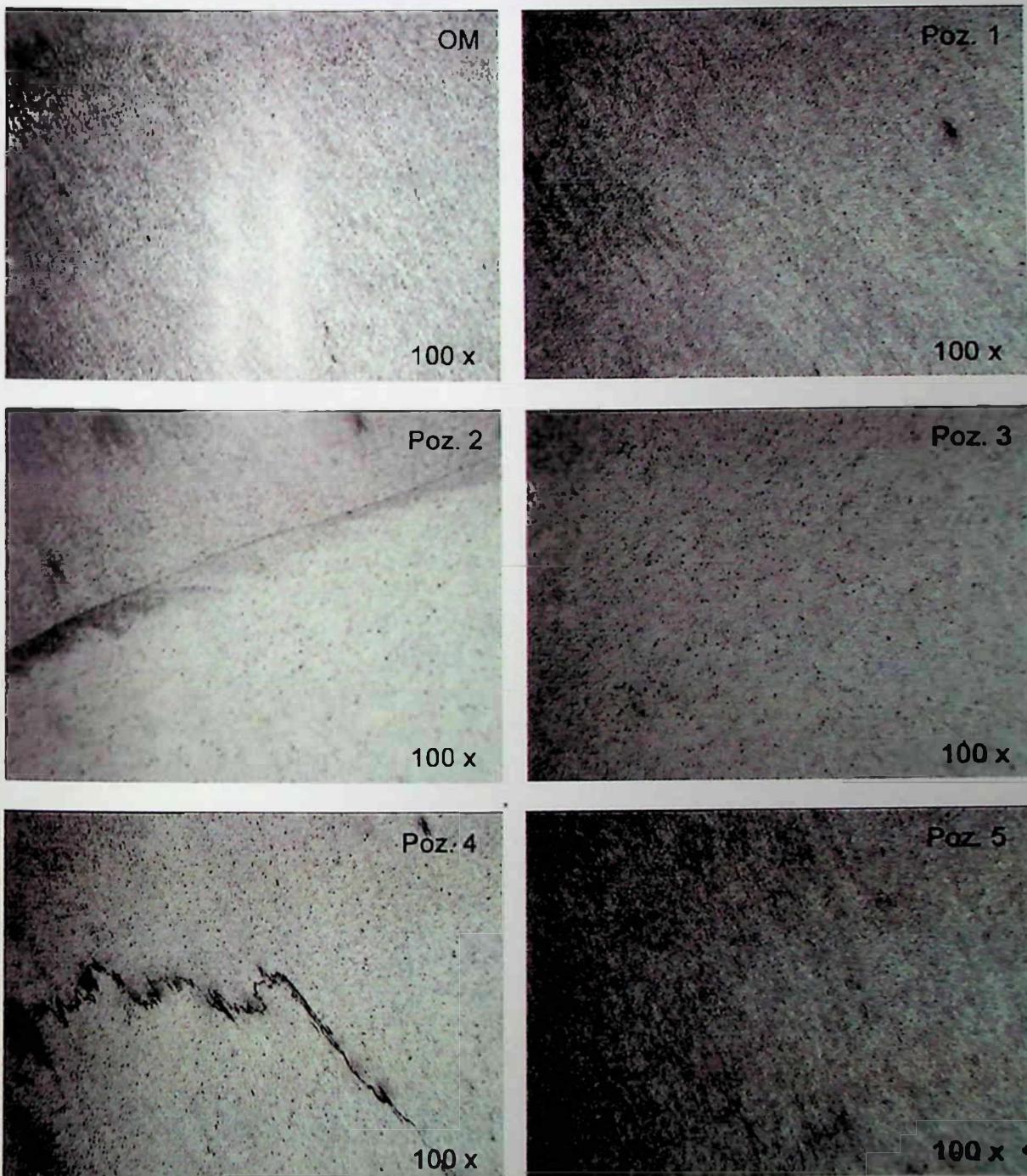
Slika P.4.31. Makrostruktura uzorka broj 17



Slika P.4.32. Mikrostruktura uzorka broj 17

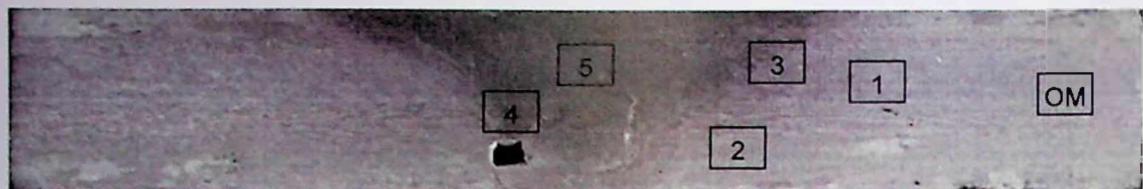


Slika P.4.33. Makrostruktura uzorka broj 18

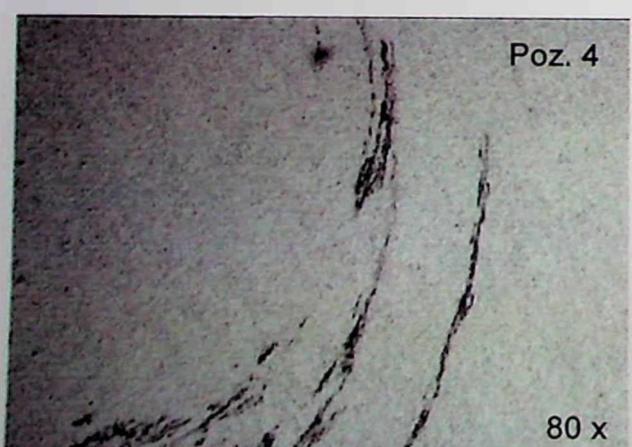
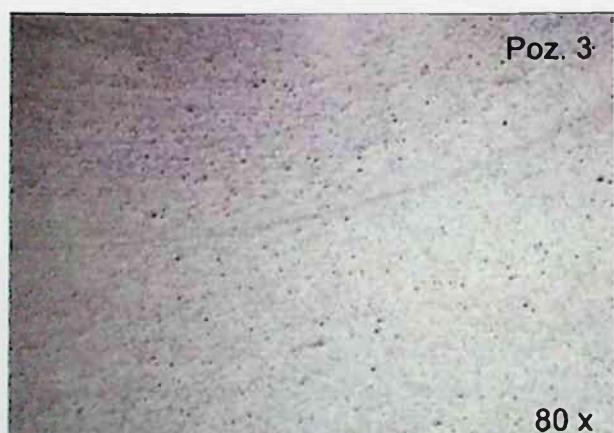


Slika P.4.34. Mikrostruktura uzorka broj 18

PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



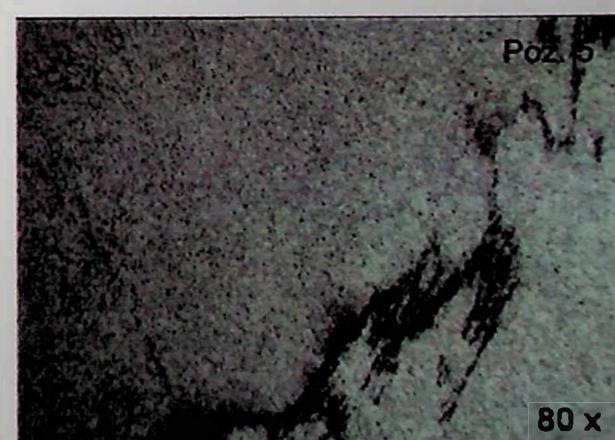
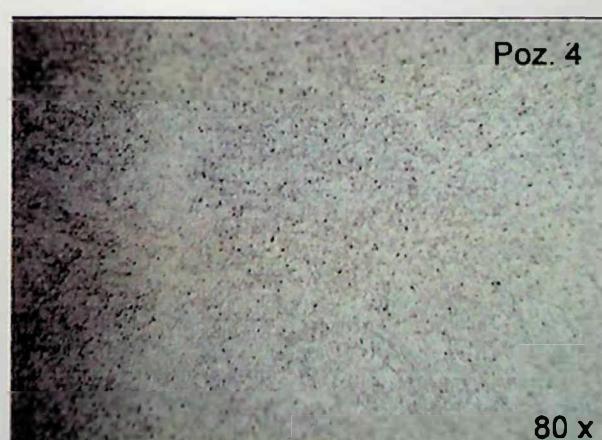
Slika P.4.35. Makrostruktura uzorka broj 19



Slika P.4.36. Mikrostruktura uzorka broj 19

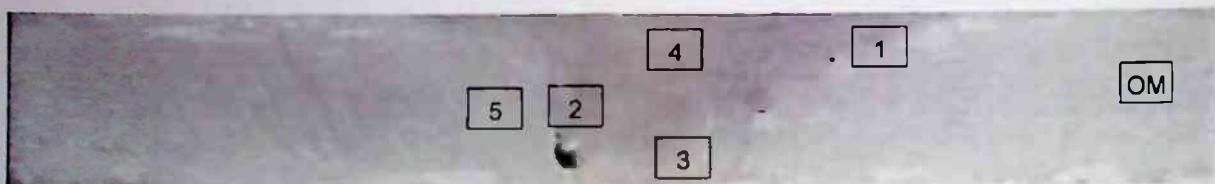


Slika P.4.37. Makrostruktura uzorka broj 20

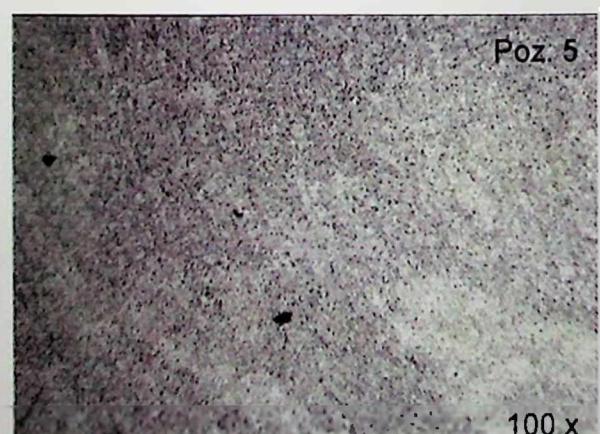
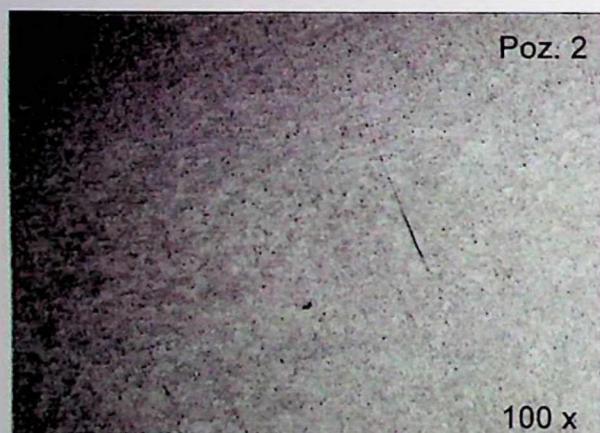
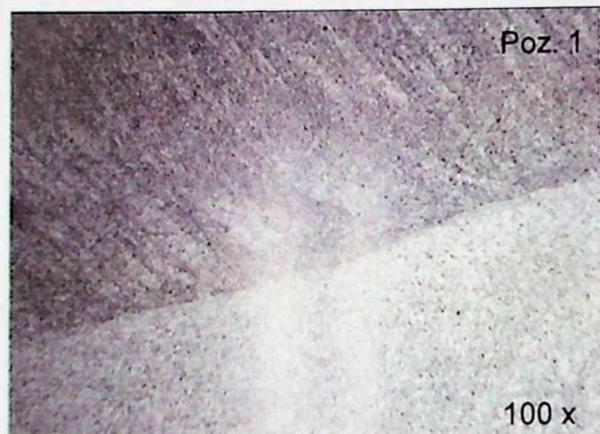


Slika P.4.38. Mikrostruktura uzorka broj 20

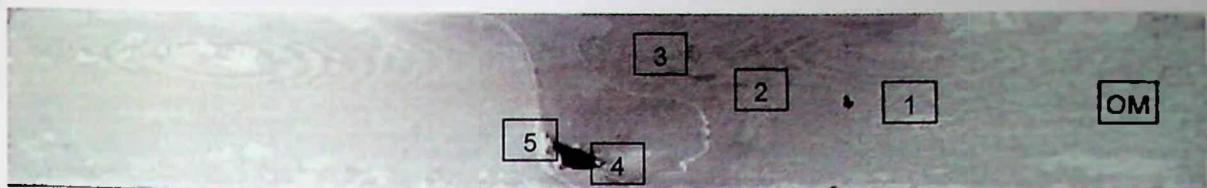
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



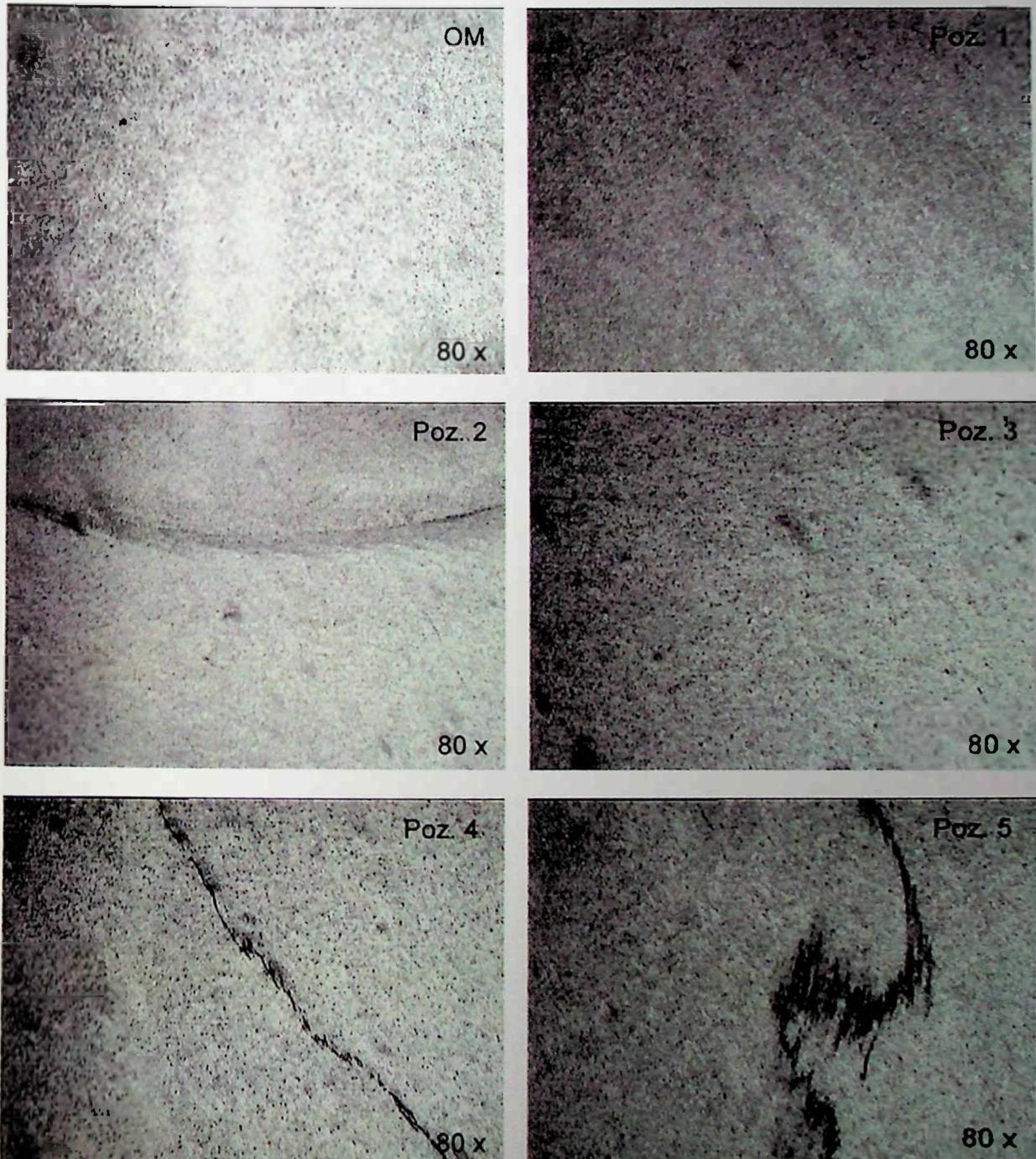
Slika P.4.39. Makrostruktura uzorka broj 21



Slika P.4.40. Mikrostruktura uzorka broj 21

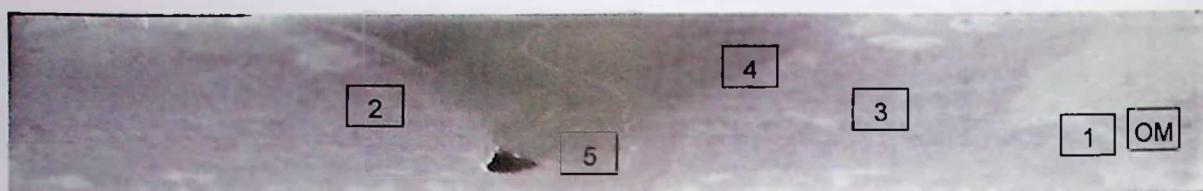


Slika P.4.41. Makrostruktura uzorka broj 22

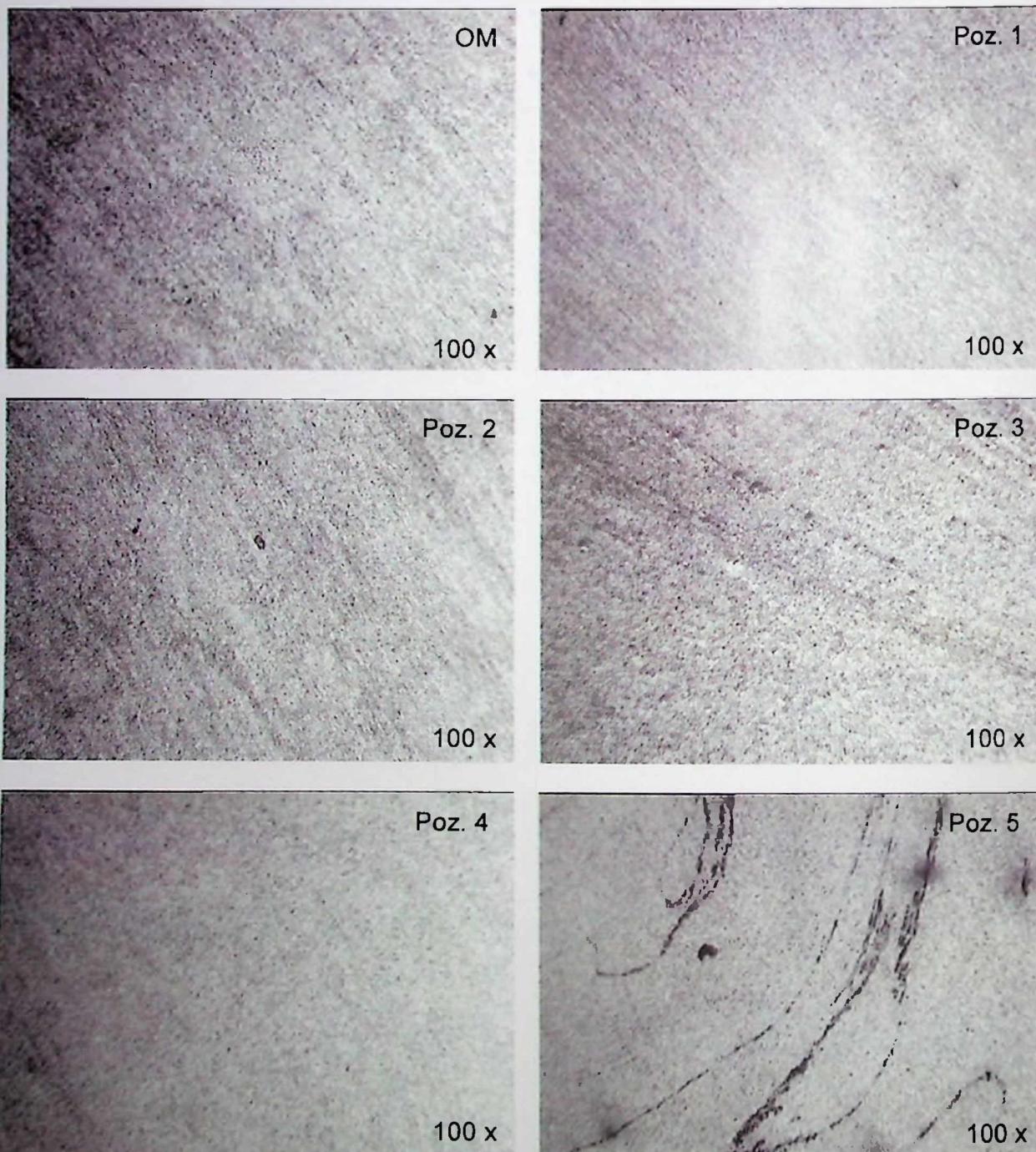


Slika P.4.42. Mikrostruktura uzorka broj 22

PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



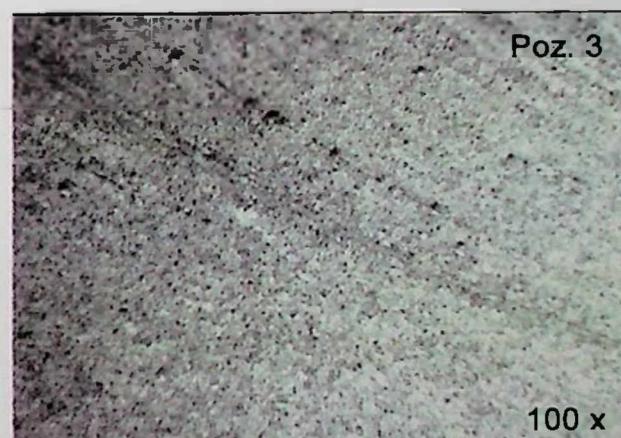
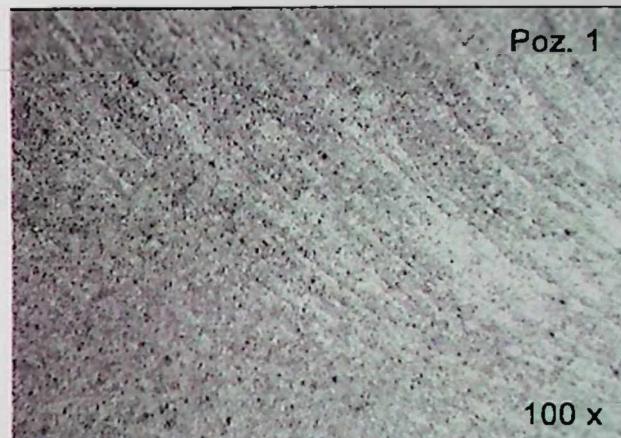
Slika P.4.43. Makrostruktura uzorka broj 23



Slika P.4.44. Mikrostruktura uzorka broj 23

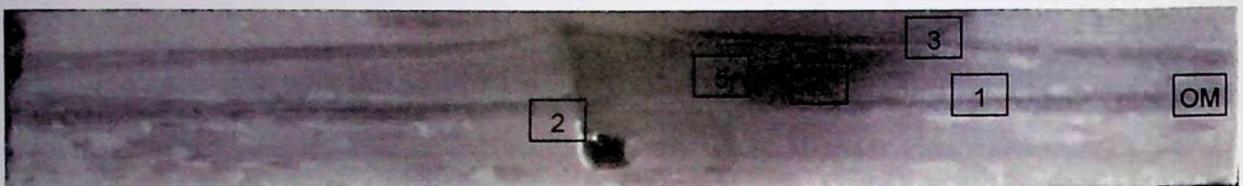


Slika P.4.45. Makrostruktura uzorka broj 24

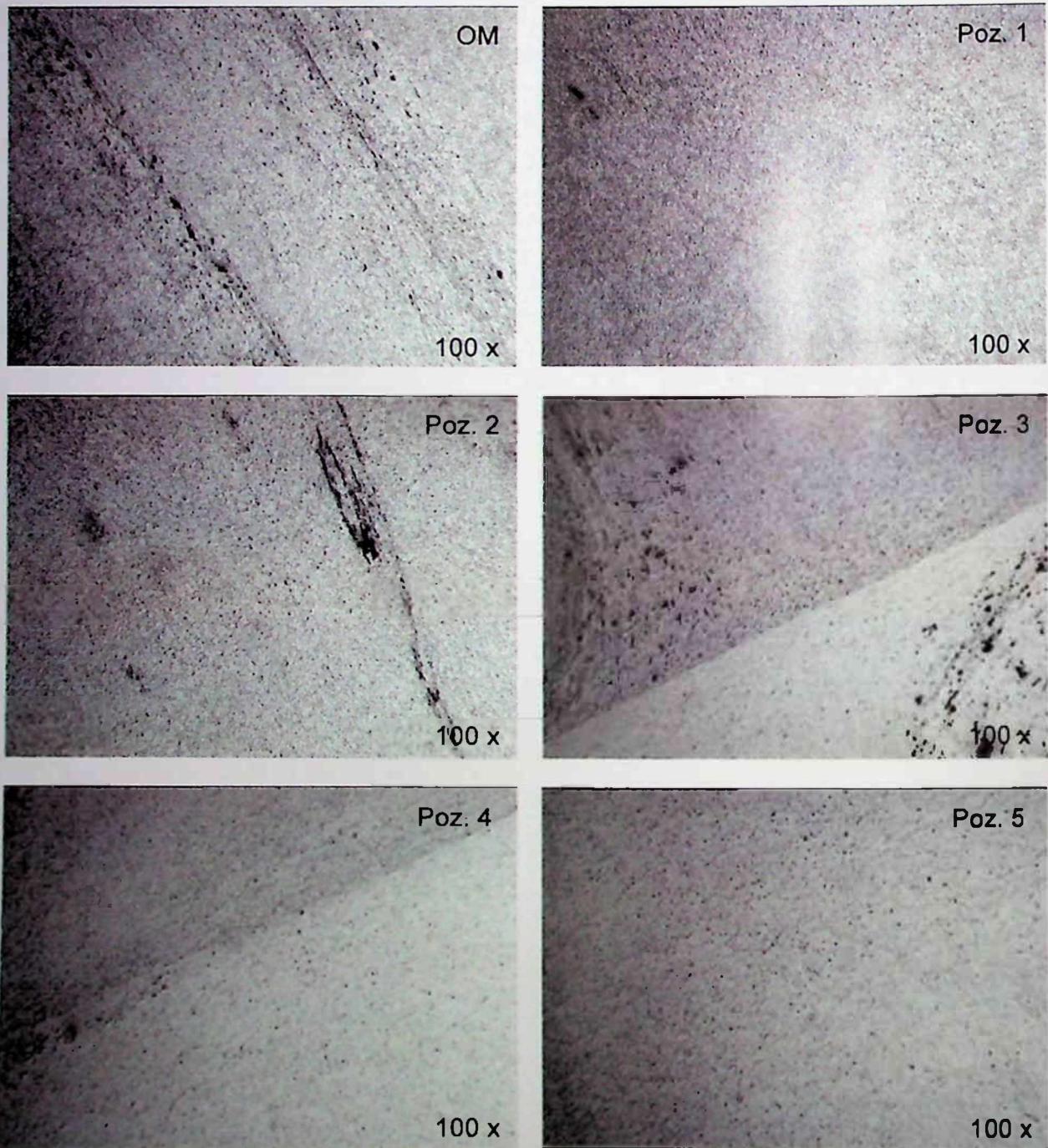


Slika P.4.46. Mikrostruktura uzorka broj 24

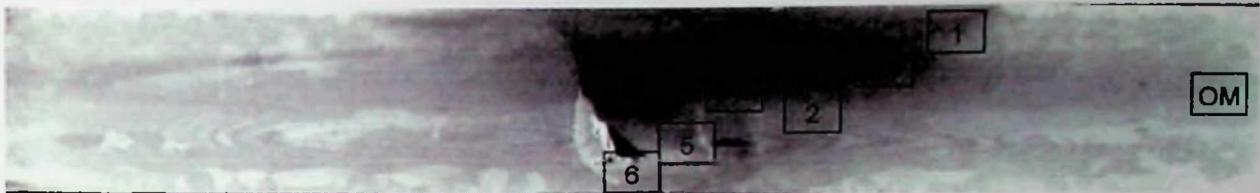
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



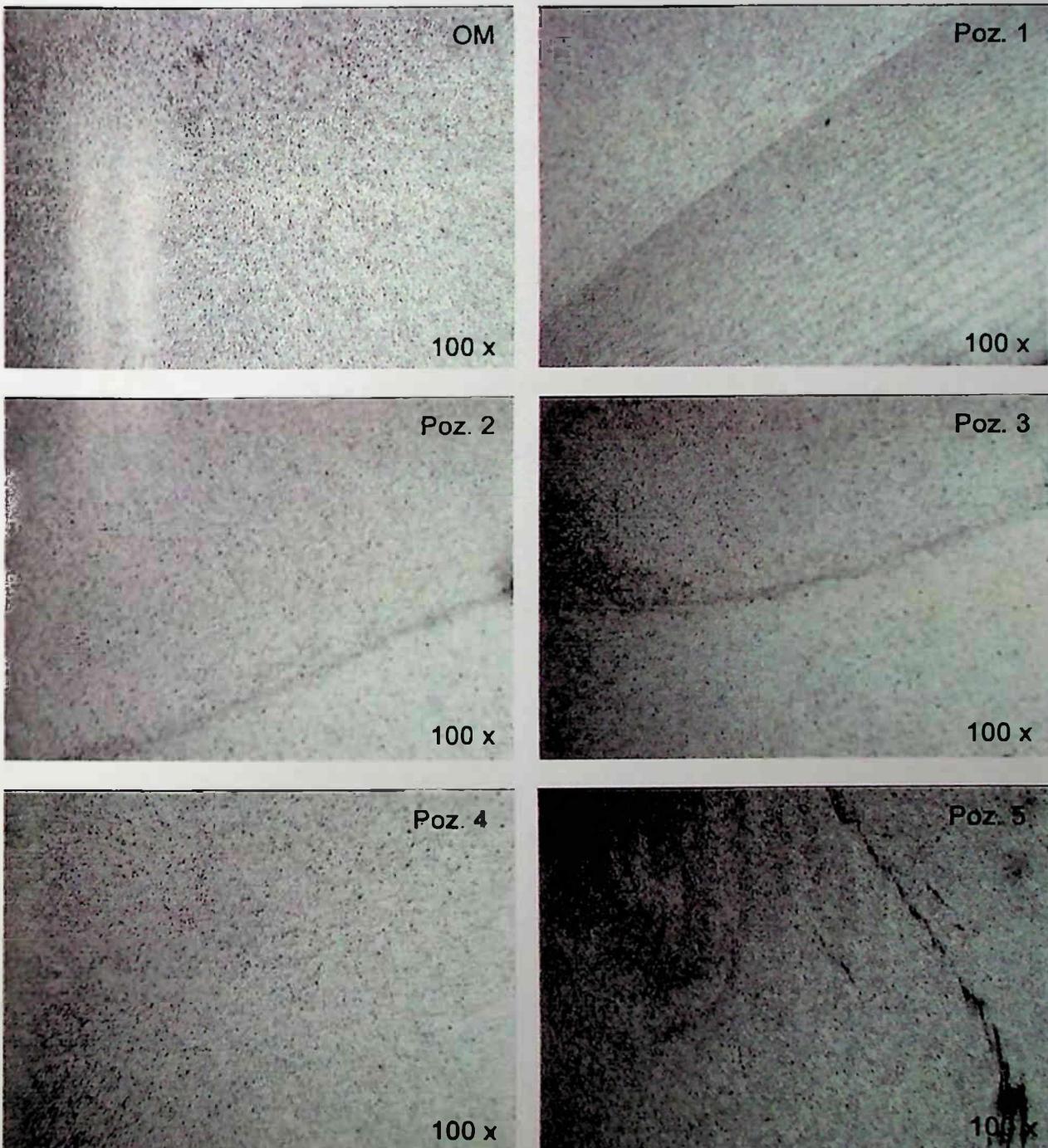
Slika P.4.47. Makrostruktura uzorka broj 25



Slika P.4.48. Mikrostruktura uzorka broj 25

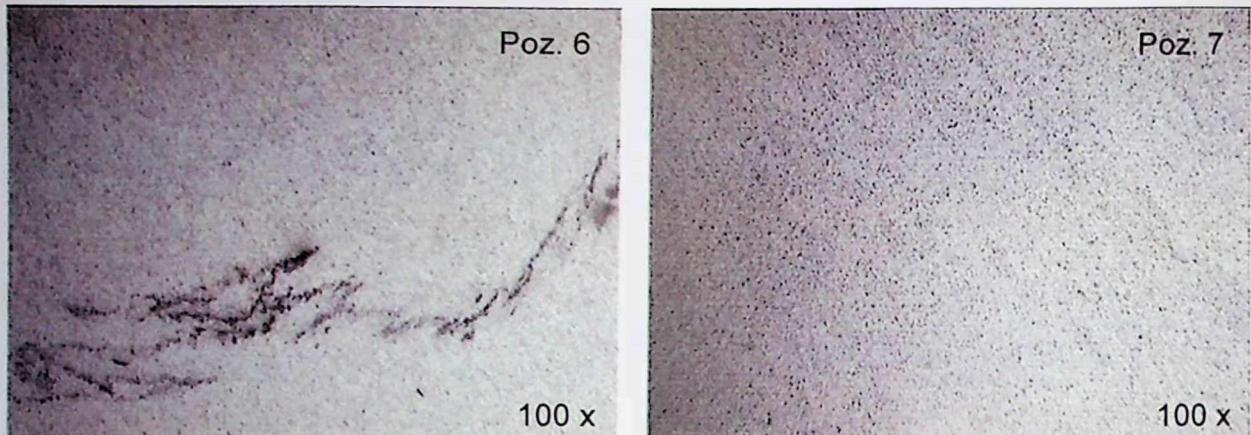


Slika P.4.49. Makrostruktura uzorka broj 26



Slika P.4.50. Mikrostruktura uzorka broj 26

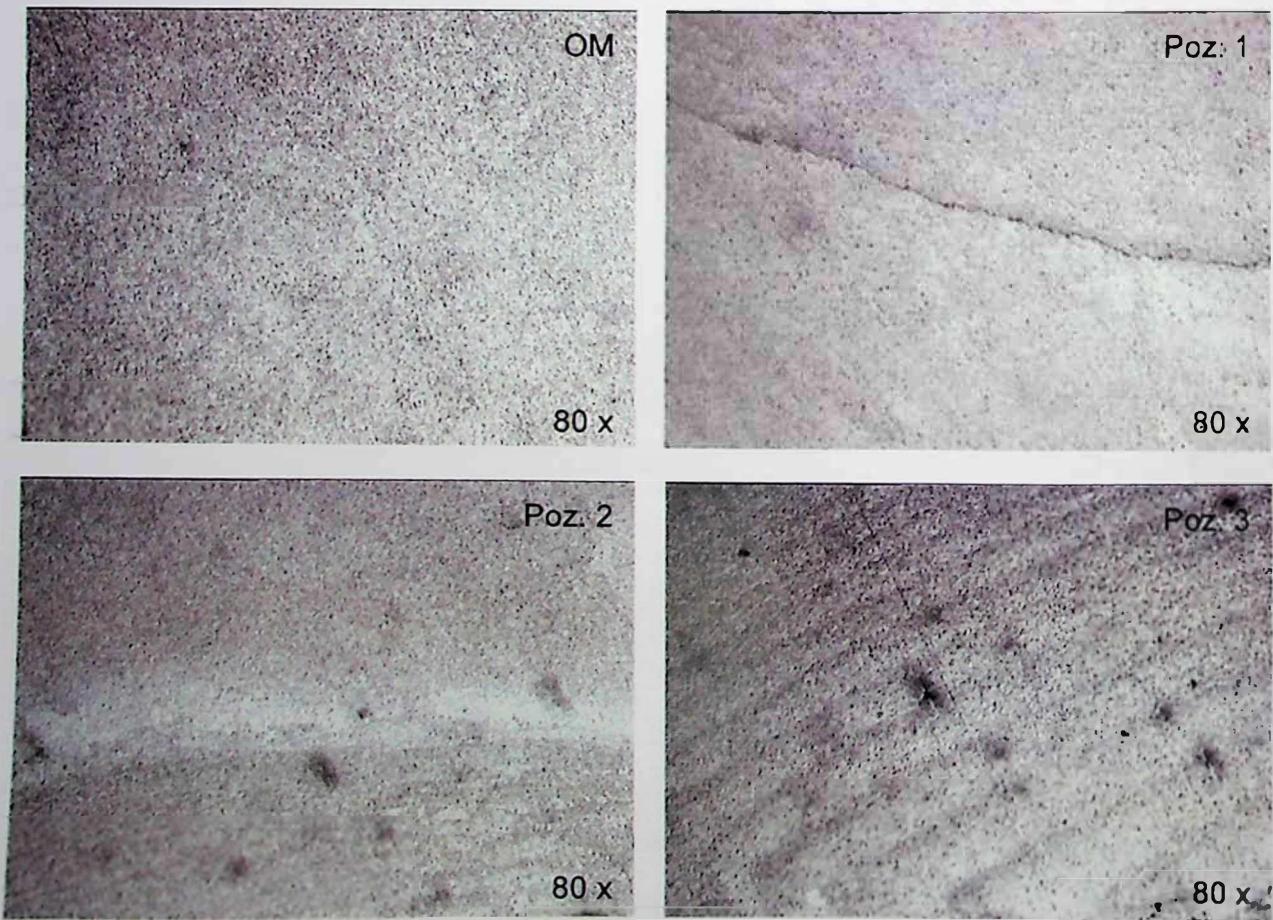
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



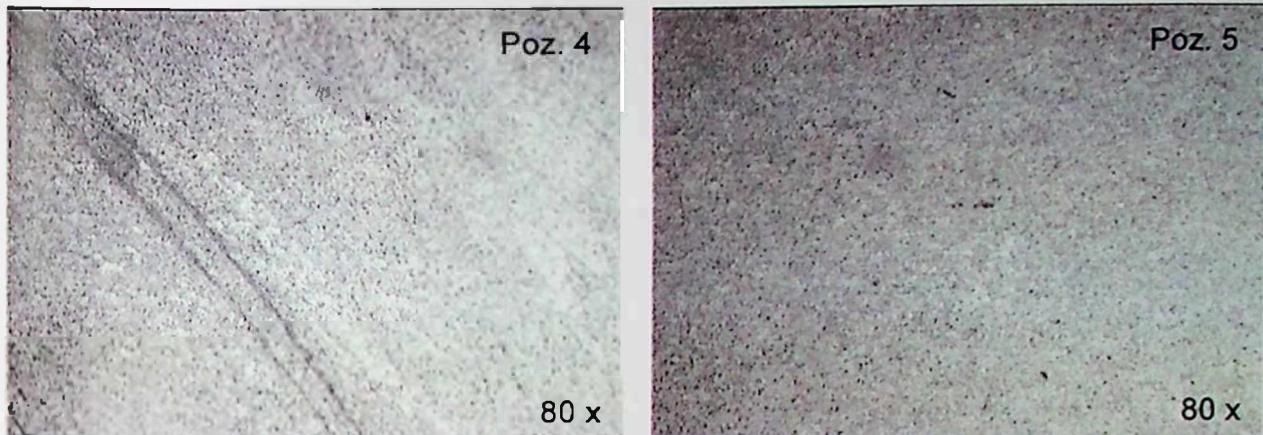
Slika P.4.50. Mikrostruktura uzorka broj 26 (nastavak)



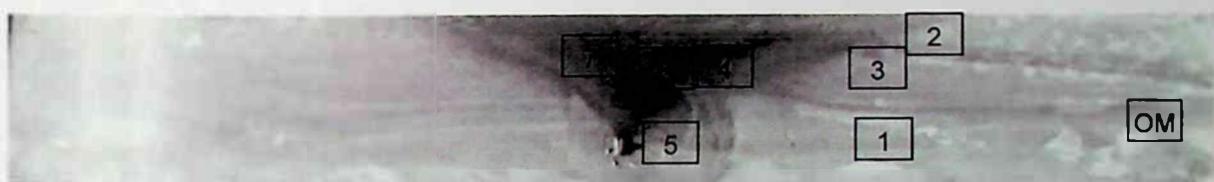
Slika P.4.51. Makrostruktura uzorka broj 28



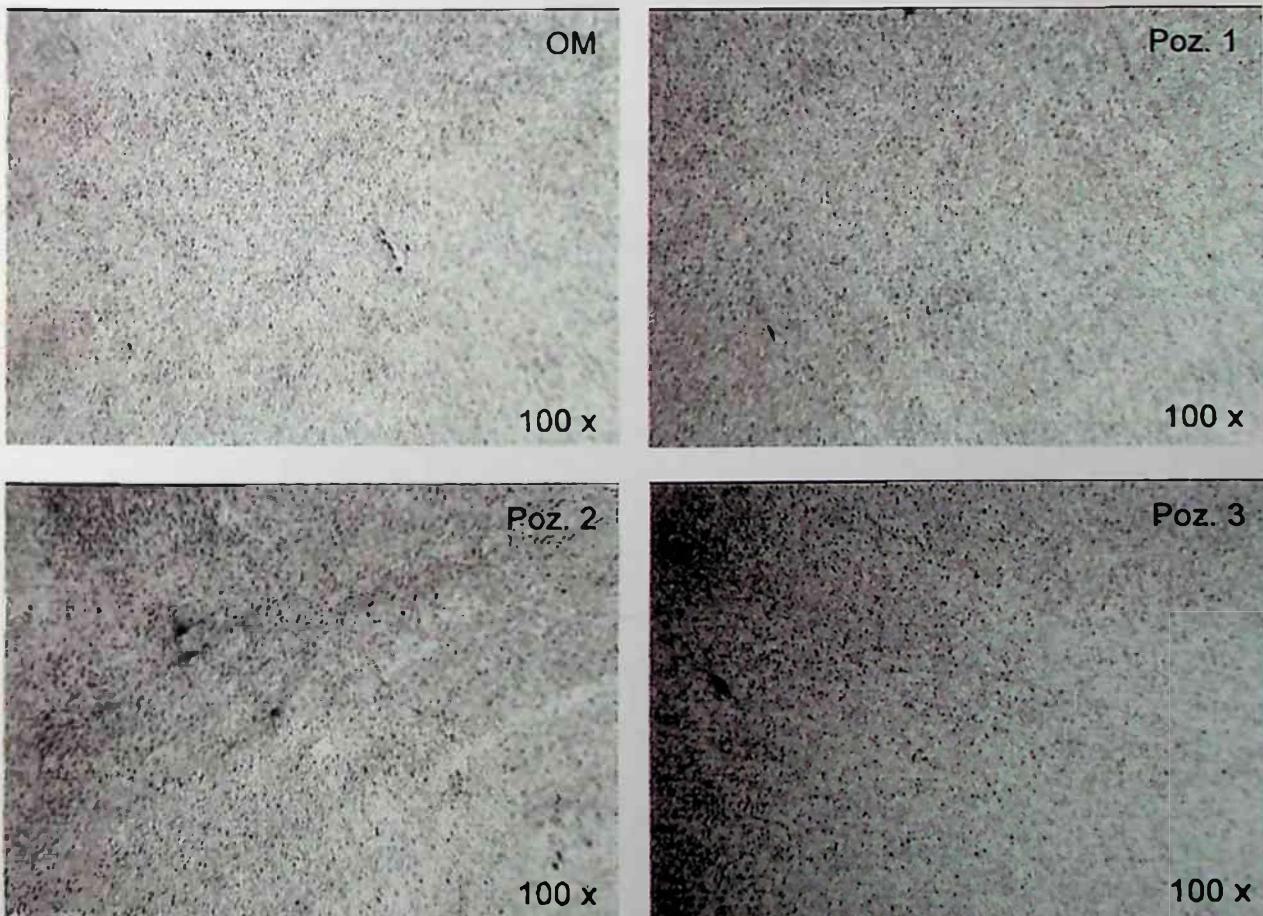
Slika P.4.52. Mikrostruktura uzorka broj 28



Slika P.4.52. Mikrostruktura uzorka broj 28 (nastavak)

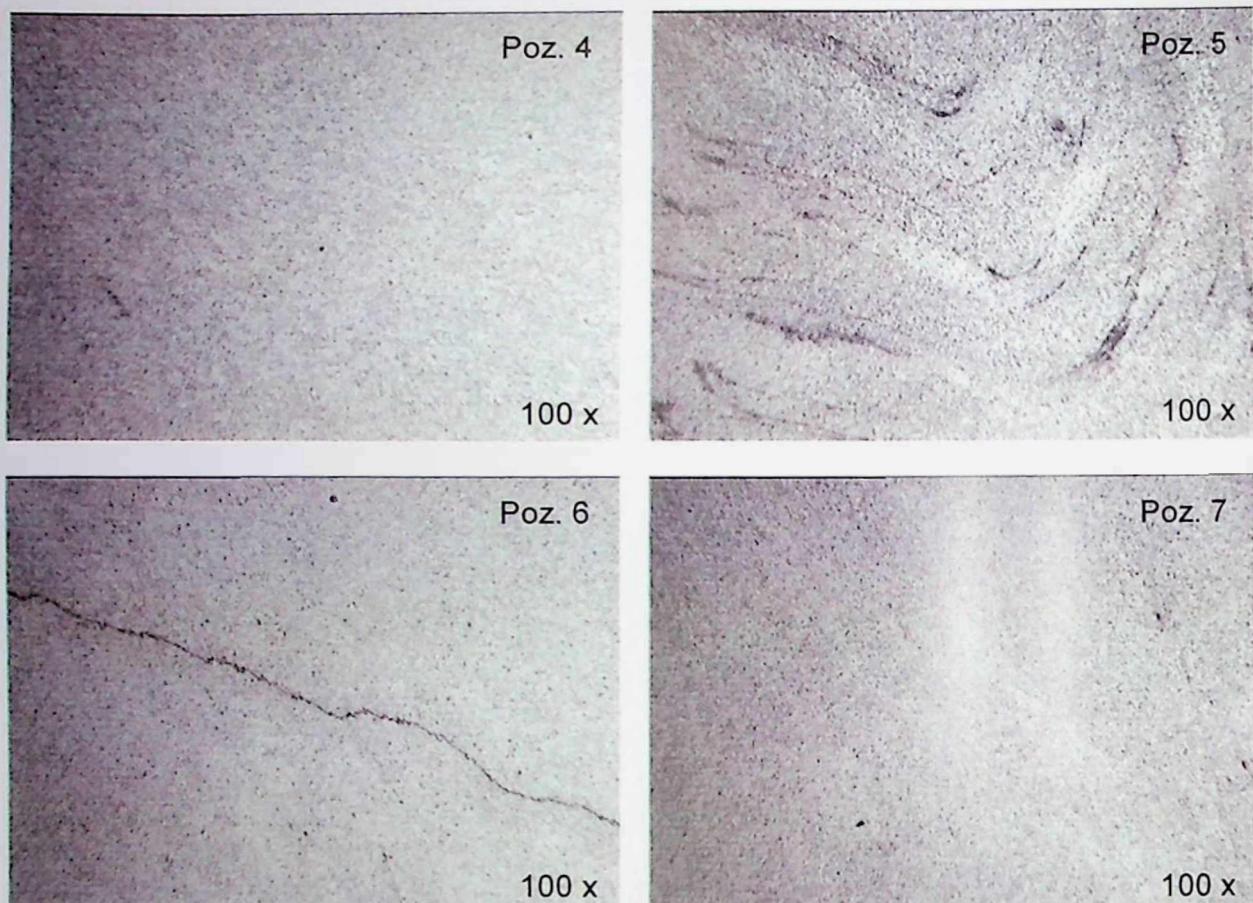


Slika P.4.53. Makrostruktura uzorka broj 29

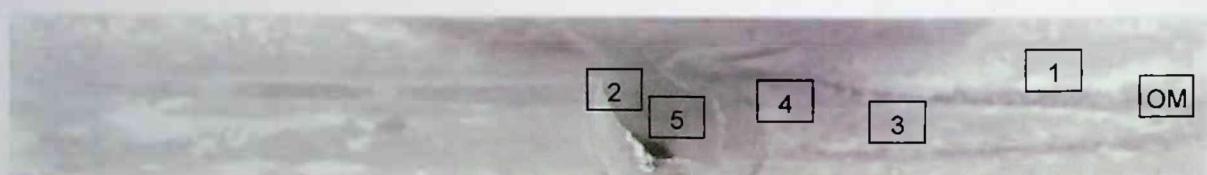


Slika P.4.54. Mikrostruktura uzorka broj 29

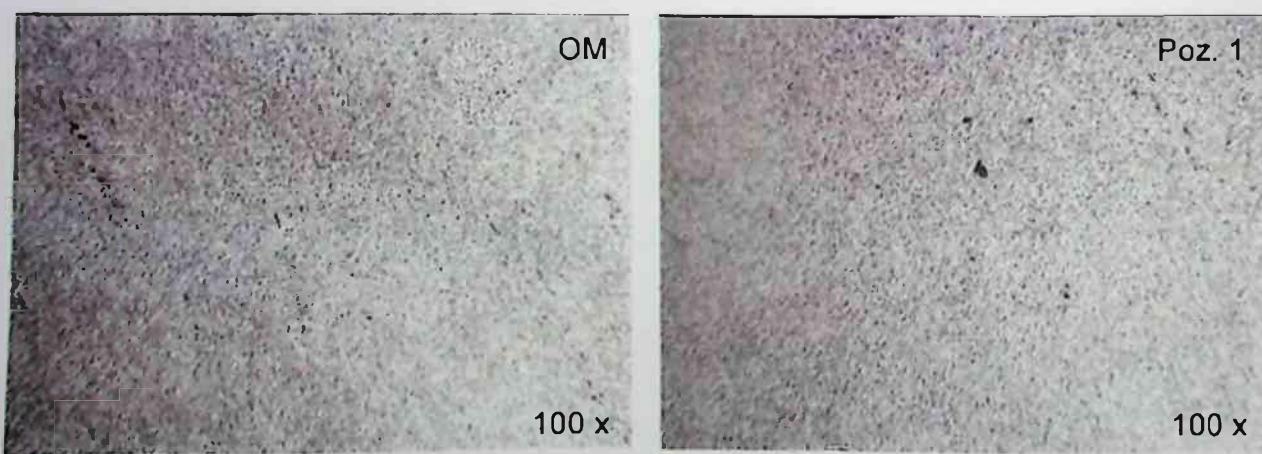
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



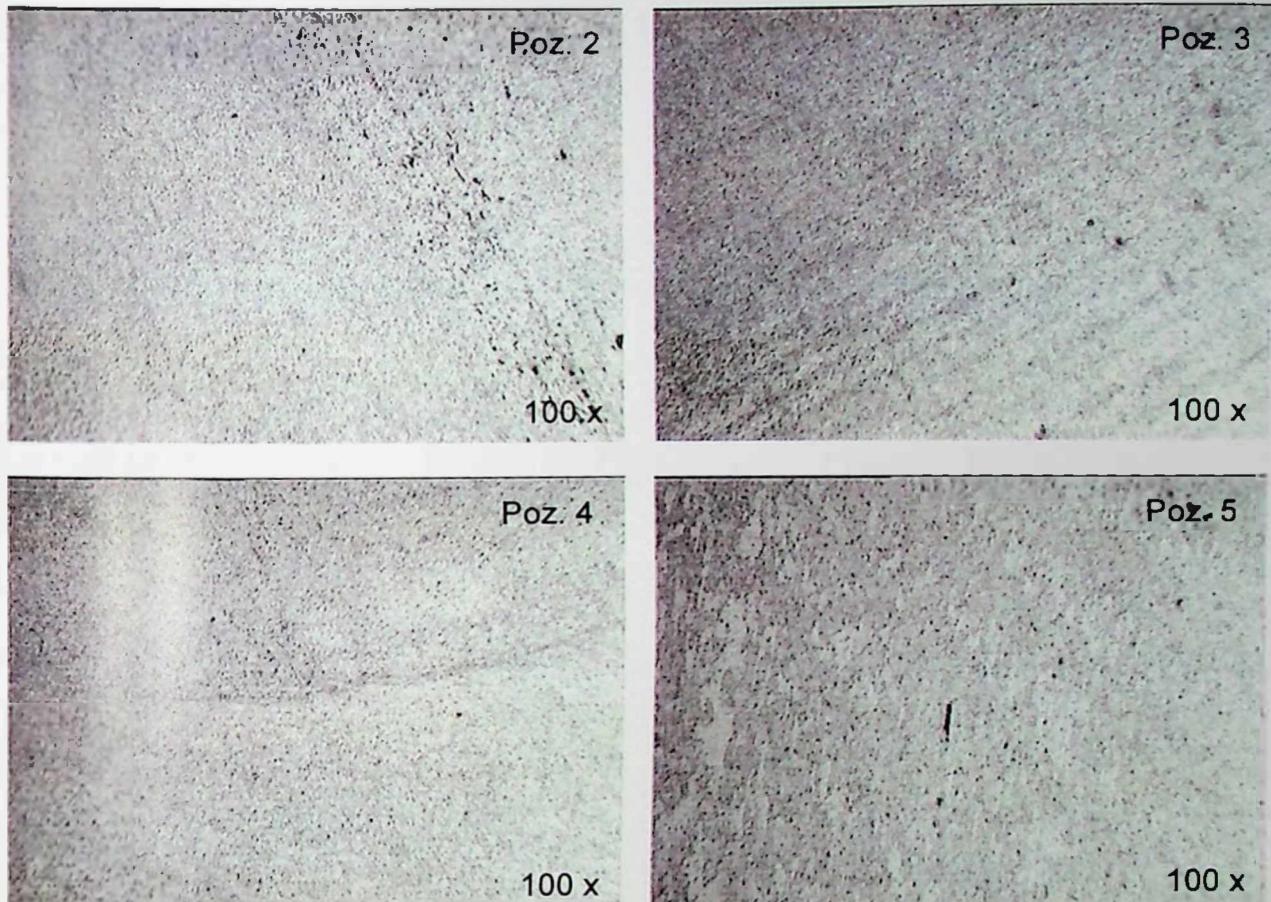
Slika P.4.54. Mikrostruktura uzorka broj 29 (nastavak)



Slika P.4.55. Makrostruktura uzorka broj 30



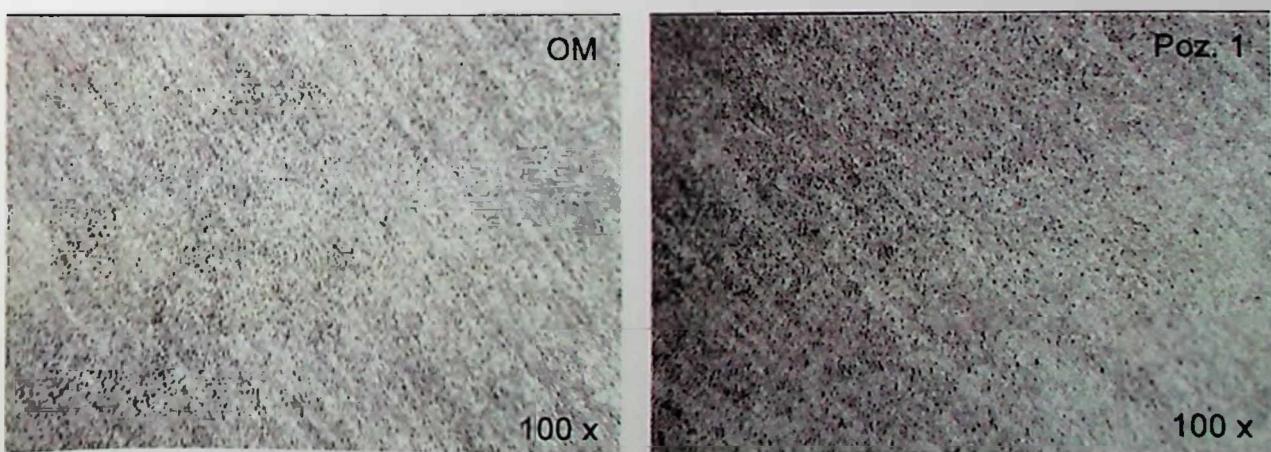
Slika P.4.56. Mikrostruktura uzorka broj 30



Slika P.4.56. Mikrostruktura uzorka broj 30 (nastavak)

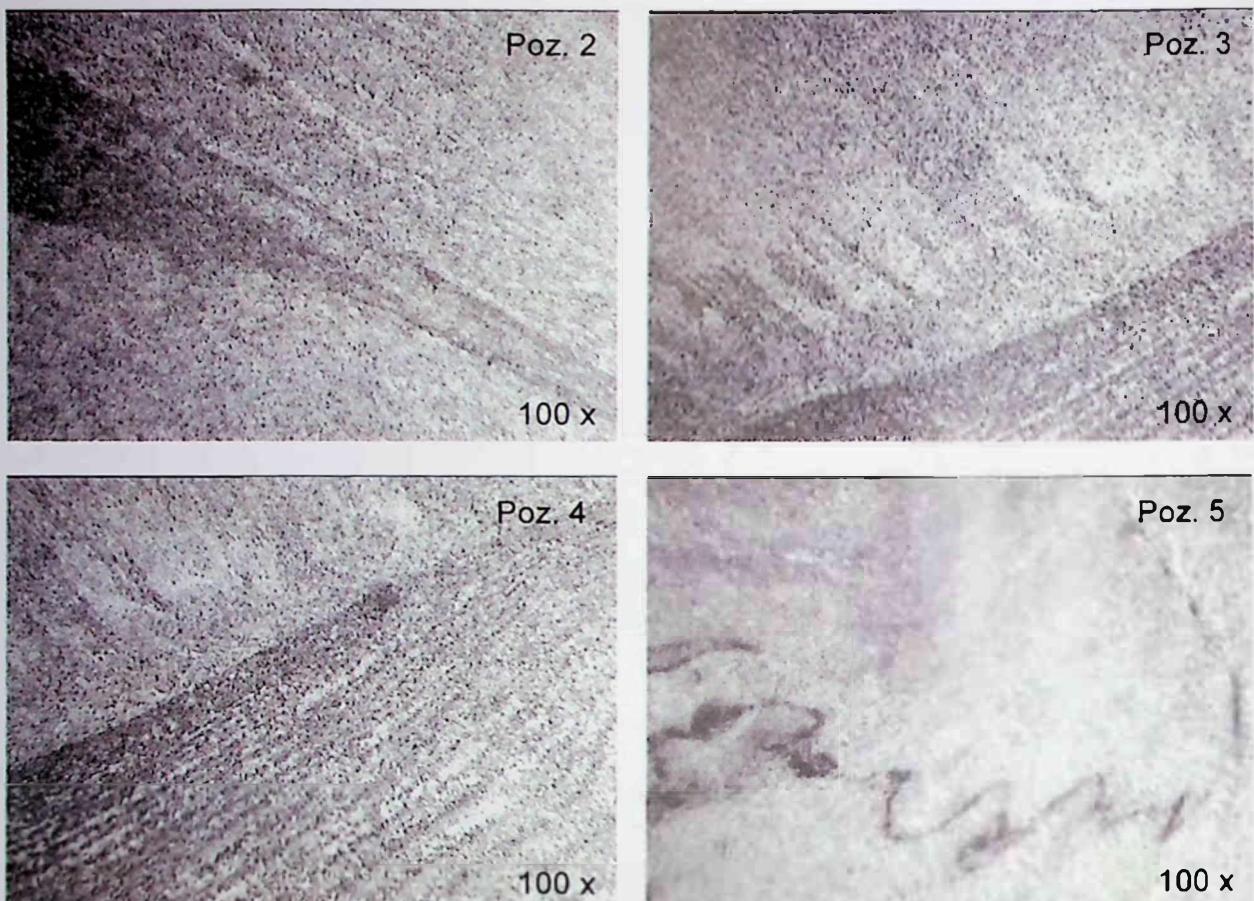


Slika P.4.57. Makrostruktura uzorka broj 32

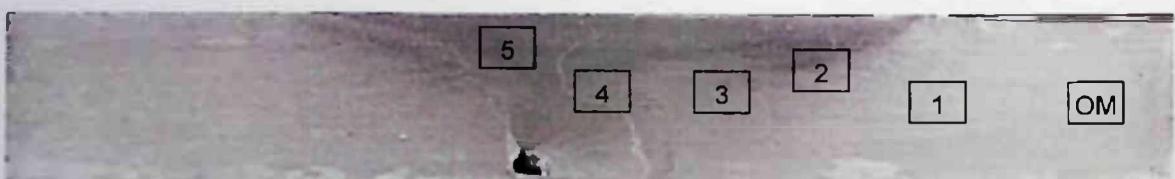


Slika P.4.58. Mikrostruktura uzorka broj 32

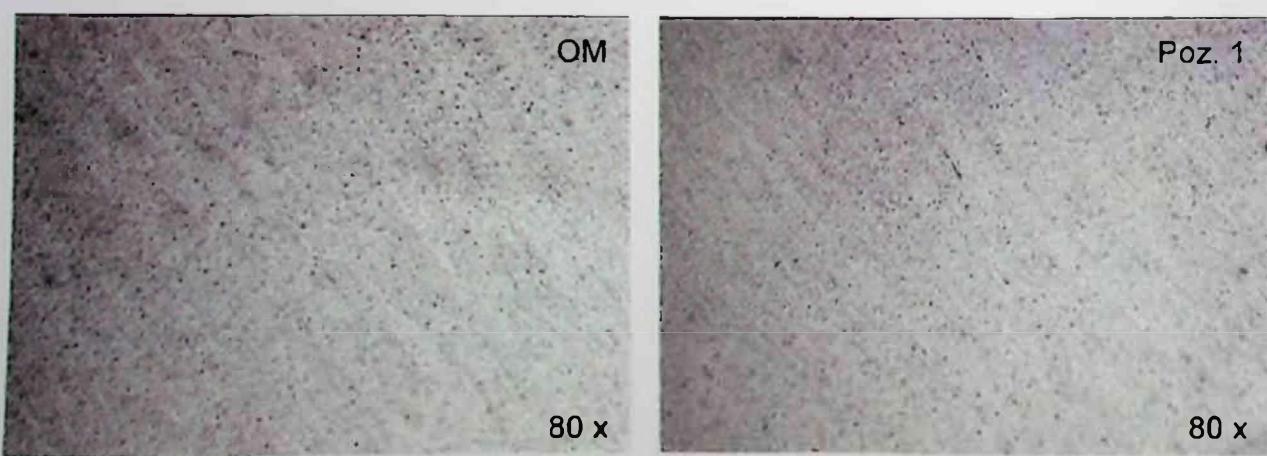
PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



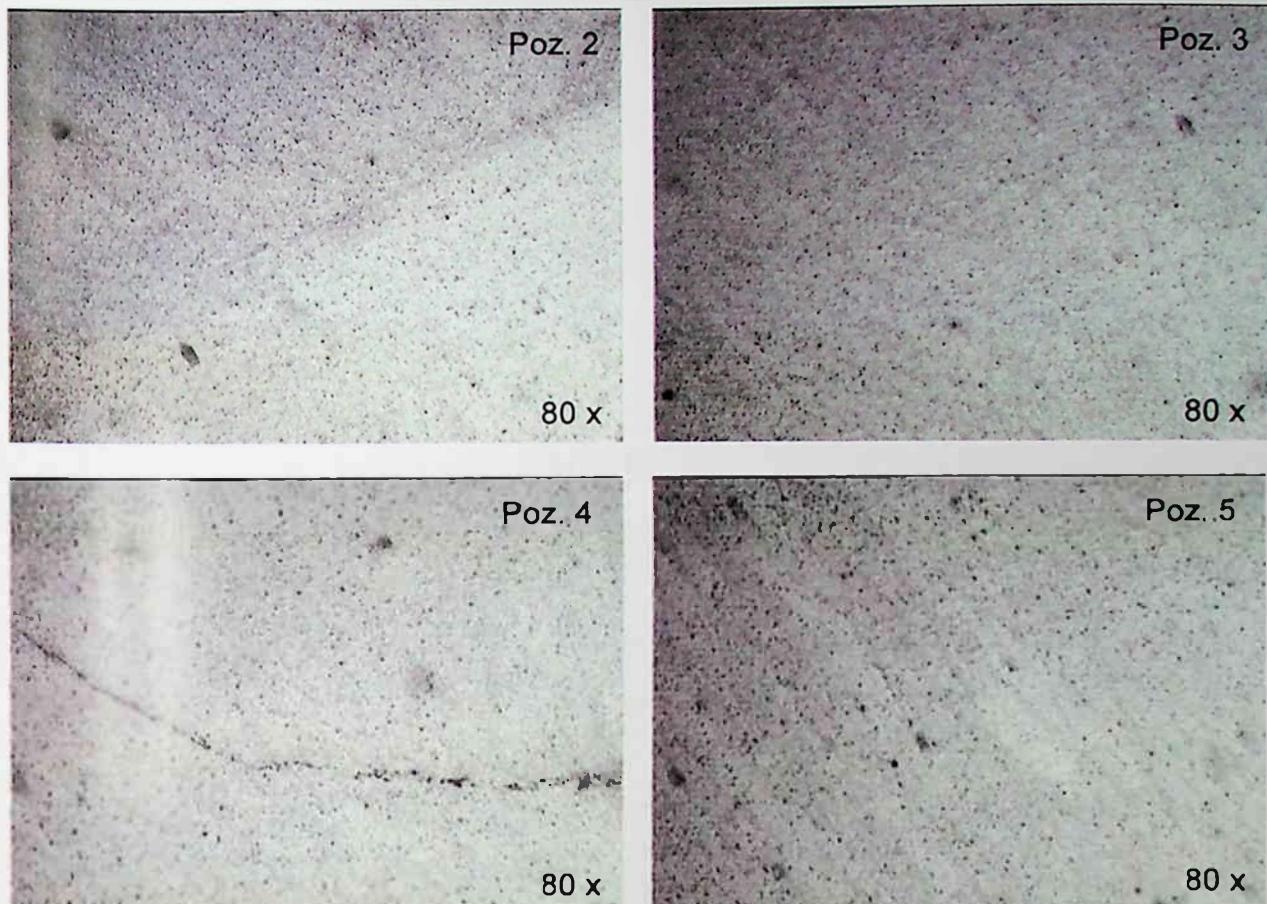
Slika P.4.58. Mikrostruktura uzorka broj 32 (nastavak)



Slika P.4.59. Makrostruktura uzorka broj 33



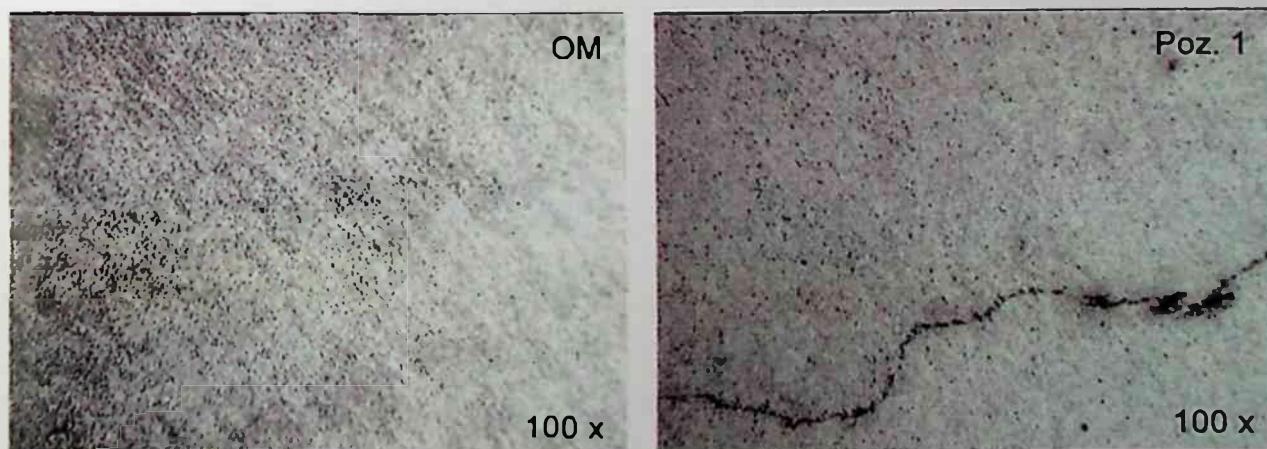
Slika P.4.60. Mikrostruktura uzorka broj 33



Slika P.4.60. Mikrostruktura uzorka broj 33 (nastavak)

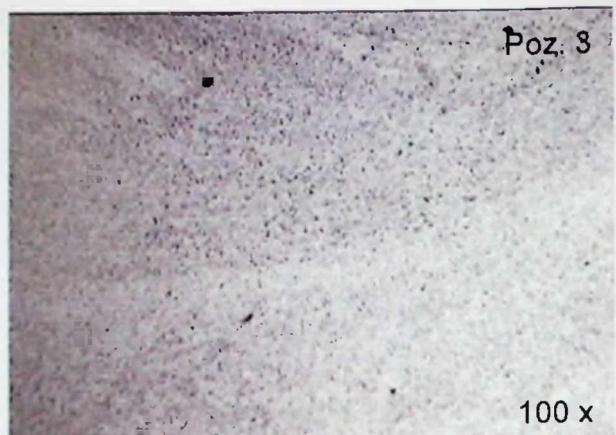
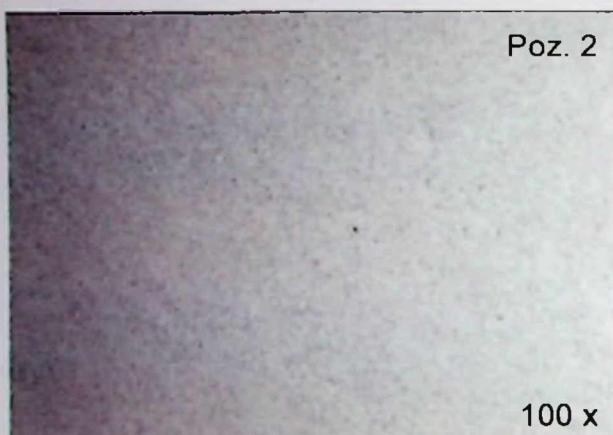


Slika P.4.61. Makrostruktura uzorka broj 35



Slika P.4.62. Mikrostruktura uzorka broj 35

PRILOG 4. MAKRO I MIKROSTRUKTURE ZAVARENOG SPOJA



Slika P.4.62. Mikrostruktura uzorka broj 35 (nastavak)



Slika P.4.63. Makrostruktura uzorka broj 36



Slika P.4.64. Mikrostruktura uzorka broj 36

PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI

PROGRAM P.5.1. OPTIMIZACIJA PROCESA FSW

```

clear;
%program optimizacija procesa FSW
for c=1:100
    disp('CIKLUS')
    disp(real(c))
%obrada eksperimentalnih podataka
%ulazni parametri
%broj faktora
k=5;
%ponavljanje u centralnoj tacki plana cetiri puta
n0=4;
N=2^k+n0;
disp('unesi vrijednosti parametara za gornji, osnovni i donji nivo')
for i=1:3
    v(i)=input('v= ');
    o(i)=input('omega= ');
    a(i)=input('alfa= ');
    d(i)=input('d= ');
    D(i)=input('D= ');
end
disp('unesi vrijednosti vertikalne sile Fz')
for i=1:N
    Y(i)=input('Fz= ');
end
%izracunavanje
x01=v(2); x02=o(2); x03=a(2); x04=d(2); x05=D(2);
w1=v(1)-v(2); w2=o(1)-o(2); w3=a(1)-a(2); w4=d(1)-d(2); w5=D(1)-D(2);
T=[ 1   1   1   1   1
     -1  1   1   1   1
      1  -1  1   1   1
     -1  -1  1   1   1
      1   1  -1  1   1
     -1   1  -1  1   1
      1   -1  -1  1   1
     -1   -1  -1  1   1
      1   1   1  -1  1
     -1   1   1  -1  1
      1   -1   1  -1  1
     -1   -1   1  -1  1
      1   1   1   1  -1
     -1   1   1   1  -1
      1   -1   1   1  -1
     -1   -1   1   1  -1
      1   1   1   -1  -1
     -1   1   1   -1  -1
      1   -1   1   -1  -1
     -1   -1   1   -1  -1
      1   1   -1   1  -1
     -1   1   -1   1  -1
      1   -1   -1   1  -1
     -1   -1   -1   1  -1
      1   1   -1   -1  -1
     -1   1   -1   -1  -1
      1   -1   -1   -1  -1
     -1   -1   -1   -1  -1];

```

PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI

```

T1=T(:,1); T2=T(:,2); T3=T(:,3); T4=T(:,4); T5=T(:,5);
T12=T1.*T2; T13=T1.*T3; T14=T1.*T4; T15=T1.*T5; T23=T2.*T3;
T24=T2.*T4; T25=T2.*T5; T34=T3.*T4; T35=T3.*T5; T45=T4.*T5;
A0=sum(Y)/N; A1=(sum(Y(1:2^k)*T1))/2^k; A2=(sum(Y(1:2^k)*T2))/2^k;
A3=(sum(Y(1:2^k)*T3))/2^k; A4=(sum(Y(1:2^k)*T4))/2^k; A5=(sum(Y(1:2^k)*T5))/2^k;
A12=(sum(Y(1:2^k)*T12))/2^k; A13=(sum(Y(1:2^k)*T13))/2^k; A14=(sum(Y(1:2^k)*T14))/2^k;
A15=(sum(Y(1:2^k)*T15))/2^k; A23=(sum(Y(1:2^k)*T23))/2^k; A24=(sum(Y(1:2^k)*T24))/2^k;
A25=(sum(Y(1:2^k)*T25))/2^k; A34=(sum(Y(1:2^k)*T34))/2^k; A35=(sum(Y(1:2^k)*T35))/2^k;
A45=(sum(Y(1:2^k)*T45))/2^k;
B0=A0-A1*x01/w1-A2*x02/w2-A3*x03/w3-A4*x04/w4-A5*x05/w5...
+A12*x01*x02/(w1*w2)+A13*x01*x03/(w1*w3)+A14*x01*x04/(w1*w4)+A15*x01*x05/(w1*w5)...
+A23*x02*x03/(w2*w3)+A24*x02*x04/(w2*w4)+A25*x02*x05/(w2*w5)...
+A34*x03*x04/(w3*w4)+A35*x03*x05/(w3*w5)+A45*x04*x05/(w4*w5);
B1=A1/w1-A12*x02/(w1*w2)-A13*x03/(w1*w3)-A14*x04/(w1*w4)-A15*x05/(w1*w5);
B2=A2/w2-A12*x01/(w1*w2)-A23*x03/(w2*w3)-A24*x04/(w2*w4)-A25*x05/(w2*w5);
B3=A3/w3-A13*x01/(w1*w3)-A23*x02/(w2*w3)-A34*x04/(w3*w4)-A35*x05/(w3*w5);
B4=A4/w4-A14*x01/(w1*w4)-A24*x02/(w2*w4)-A34*x03/(w3*w4)-A45*x05/(w4*w5);
B5=A5/w5-A15*x01/(w1*w5)-A25*x02/(w2*w5)-A35*x03/(w3*w5)-A45*x04/(w4*w5);
B12=A12/(w1*w2); B13=A13/(w1*w3); B14=A14/(w1*w4); B15=A15/(w1*w5);
B23=A23/(w2*w3); B24=A24/(w2*w4); B25=A25/(w2*w5);
B34=A34/(w3*w4); B35=A35/(w3*w5); B45=A45/(w4*w5);
Y0=sum(Y(2^k+1:N))/n0;
for i=2^k+1:N
    sE(i)=(Y(i)-Y0)^2;
end
Se=sum(sE); fE=n0-1;
SA0=2^k*A0^2; FA0=SA0/(Se/fE);
SA1=2^k*A1^2; FA1=SA1/(Se/fE);
SA2=2^k*A2^2; FA2=SA2/(Se/fE);
SA3=2^k*A3^2; FA3=SA3/(Se/fE);
SA4=2^k*A4^2; FA4=SA4/(Se/fE);
SA5=2^k*A5^2; FA5=SA4/(Se/fE);
SA12=2^k*A12^2; FA12=SA12/(Se/fE);
SA13=2^k*A13^2; FA13=SA13/(Se/fE);
SA14=2^k*A14^2; FA14=SA14/(Se/fE);
SA15=2^k*A15^2; FA15=SA15/(Se/fE);
SA23=2^k*A23^2; FA23=SA23/(Se/fE);
SA24=2^k*A24^2; FA24=SA24/(Se/fE);
SA25=2^k*A25^2; FA25=SA25/(Se/fE);
SA34=2^k*A34^2; FA34=SA34/(Se/fE);
SA35=2^k*A35^2; FA35=SA35/(Se/fE);
SA45=2^k*A45^2; FA45=SA45/(Se/fE);
disp('Za ocjenu signifikantnosti koeficijenata usvajamo Ftsi=10.13')
Ftsi=10.13;
if Ftsi>FA0
    disp('Koeficijent A0 B0 nije znacajan')
    A0=0;
end
if Ftsi>FA1
    disp('Koeficijent A1 B1 nije znacajan')
    A1=0;
end
if Ftsi>FA2
    disp('Koeficijent A2 B2 nije znacajan')
    A2=0;
end
if Ftsi>FA3
    disp('Koeficijent A3 B3 nije znacajan')
    A3=0;
end
if Ftsi>FA4
    disp('Koeficijent A4 B4 nije znacajan')
    A4=0;
end
if Ftsi>FA5
    disp('Koeficijent A5 B5 nije znacajan')
    A5=0;
end

```

DOKTORSKA DISERTACIJA

```
if Ftsi>FA12
    disp('Koeficijent A12 B12 nije znacajan')
    A12=0;
end
if Ftsi>FA13
    disp('Koeficijent A13 B13 nije znacajan')
    A13=0;
end
if Ftsi>FA14
    disp('Koeficijent A14 B14 nije znacajan')
    A14=0;
end
if Ftsi>FA15
    disp('Koeficijent A15 B15 nije znacajan')
    A15=0;
end
if Ftsi>FA23
    disp('Koeficijent A23 B23 nije znacajan')
    A23=0;
end
if Ftsi>FA24
    disp('Koeficijent A24 B24 nije znacajan')
    A24=0;
end
if Ftsi>FA25
    disp('Koeficijent A25 B25 nije znacajan')
    A25=0;
end
if Ftsi>FA34
    disp('Koeficijent A34 B34 nije znacajan')
    A34=0;
end
if Ftsi>FA35
    disp('Koeficijent A35 B35 nije znacajan')
    A35=0;
end
if Ftsi>FA45
    disp('Koeficijent A45 B45 nije znacajan')
    A45=0;
end
for i=1:3
    x1(i)=(v(i)-v(2))/w1; x2(i)=(o(i)-c(2))/w2; x3(i)=(a(i)-a(2))/w3;
    x4(i)=(d(i)-d(2))/w4; x5(i)=(D(i)-D(2))/w5;
end
c=[1 1 1 1 1
   3 1 1 1 1
   1 3 1 1 1
   3 3 1 1 1
   1 1 3 1 1
   3 1 3 1 1
   1 3 3 1 1
   3 3 3 1 1
   1 1 1 3 1
   3 1 1 3 1
   1 3 1 3 1
   3 3 1 3 1
   1 1 3 3 1
   3 1 3 3 1
   1 3 3 3 1
   3 3 3 3 1
   1 1 1 1 3
   3 1 1 1 3
   1 3 1 1 3
   3 3 1 1 3
   1 1 3 1 3
   3 1 3 1 3
   1 3 3 1 3
   3 3 3 1 3]
```

PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI

```

1 1 1 3 3
3 1 1 3 3
1 3 1 3 3
3 3 1 3 3
1 1 3 3 3
3 1 3 3 3
1 3 3 3 3
3 3 3 3 3
2 2 2 2 2
2 2 2 2 2
2 2 2 2 2
2 2 2 2 2];
for i=1:N
    YM(i)=A0+A1*x1(c(i,1))+A2*x2(c(i,2))+A3*x3(c(i,3))+A4*x4(c(i,4))+A5*x5(c(i,5))...
    +A12*x1(c(i,1))*x2(c(i,2))+A13*x1(c(i,1))*x3(c(i,3))+A14*x1(c(i,1))*x4(c(i,4))...
    +A15*x1(c(i,1))*x5(c(i,5))+A23*x2(c(i,2))*x3(c(i,3))+A24*x2(c(i,2))*x4(c(i,4))...
    +A25*x2(c(i,2))*x5(c(i,5))+A34*x3(c(i,3))*x4(c(i,4))+A35*x3(c(i,3))*x5(c(i,5))...
    +A45*x4(c(i,4))*x5(c(i,5));
end
disp('Model u kodiranim koordinatama')
disp('YM=a0+a1x1+a2x2+a3x3+a4x4+a5x5+a12x1x2+...+a45x4x5')
YM=[real(YM)]
for i=1:N
    SR(i)=(Y(i)-YM(i))^2;
end
Sr=sum(SR); Sad=Sr-Se; Fad=(Sad/Se)^2; b=[A1 A2 A3 A4 A5]; w=[w1 w2 w3 w4 w5];
for i=1:k
    bw(i)=b(i)*w(i);
end
[maxbw,ix]=max(bw); landa=0.5/(maxbw/w(ix));
for i=1:k
    landabw(i)=abs(landa*bw(i));
end
bw=[real(bw)]; landa=[real(landa)]; landabw=[real(landabw)];
for i=1:k
    if landabw(i)>=w(i)
        zk(i)=w(i)/2;
    else
        zk(i)=landabw(i);
    end
end
zk=[real(zk)]
%eksperiment na gradijentnoj liniji
n=input('Unesi broj eksperimentalnih tacaka na gradijentnoj liniji = ')
for i=1:n
    X1(i)=input('v= '); X2(i)=input('omega= '); X3(i)=input('alfa= ');
    X4(i)=input('d= '); X5(i)=input('D= ');
end
disp('Model u prirodnim koordinatama')
disp('YMG=b0+b1x1+b2x2+b3x3+b4x4+b5x5+b12x1x2+...+b45x4x5')
for i=1:length(X1)
    ymg(i)=B0+B1*X1(i)+B2*X2(i)+B3*X3(i)+B4*X4(i)+B5*X5(i)...
    +B12*X1(i)*X2(i)+B13*X1(i)*X3(i)+B14*X1(i)*X4(i)+B15*X1(i)*X5(i)...
    +B23*X2(i)*X3(i)+B24*X2(i)*X4(i)+B25*X2(i)*X5(i)...
    +B34*X3(i)*X4(i)+B35*X3(i)*X5(i)+B45*X4(i)*X5(i);
end
ymg=[real(ymg)]
disp('Za provjeru adekvatnosti modela usvajamo Ftad=8.64')
Ftad=8.64;
if Ftad<Fad
    disp('Model nije adekvatan')
else
    disp('Model je adekvatan')
break
end
clear;
end

```

PROGRAM P.5.2. REGRESIONA ANALIZA

```

%program regresiona analiza
clear;
%broj faktora
k=5;
%ponavljanje u centralnoj tacki plana cetiri puta
n0=4;
disp('unesi vrijednosti parametara za gornji, osnovni i donji nivo')
for i=1:3
    X1=input('v= '); X2=input('omega= '); X3=input('alfa= ');
    X4=input('d= '); X5=input('D= ');
end
load Fekap.txt;
Fx=Fekap(:,1); Fy=Fekap(:,2); Fz=Fekap(:,3);
Y=Fx;
FT=10.13;
N=2^k+n0;
T=[ 1 1 1 1 1
     -1 1 1 1 1
      1 -1 1 1 1
     -1 -1 1 1 1
      1 1 -1 1 1
     -1 1 -1 1 1
      1 -1 -1 1 1
     -1 -1 -1 1 1
      1 1 1 -1 1
     -1 1 1 -1 1
      1 -1 1 -1 1
     -1 -1 1 -1 1
      1 1 -1 -1 1
     -1 1 -1 -1 1
      1 -1 -1 -1 1
     -1 -1 -1 -1 1
      1 1 1 1 -1
     -1 1 1 1 -1
      1 -1 1 1 -1
     -1 -1 1 1 -1
      1 1 -1 1 -1
     -1 1 -1 1 -1
      1 -1 -1 1 -1
     -1 -1 -1 1 -1
      1 1 1 -1 -1
     -1 1 1 -1 -1
      1 -1 1 -1 -1
     -1 -1 1 -1 -1
      1 1 -1 -1 -1
     -1 1 -1 -1 -1
      1 -1 -1 -1 -1
     -1 -1 -1 -1 -1];
S=sum(Y);
Y0=sum(Y(2^k+1:N))/4; SE=sum((Y(2^k+1:N)-Y0).^2);
fE=n0-1;
FTAD=8.64;
for i=1:k+1
    if i==1
        b(i)=S/(N);
        Sb(i)=(N)*b(i).^2;
        Fb(i)=Sb(i)/(SE/fE);
        if FT>Fb(i)
            'b0 nije znacajan'
            b(i)=0;
        end
    else
        b(i)=(Y(1:2^k)'*T(1:2^k,i-1))/2^k;
        Sb(i)=(2^k)*b(i).^2;
        Fb(i)=Sb(i)/(SE/fE);
    end
end

```

PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI

```

if FT>Fb(i)
    ['b' int2str(i-1) ' nije znacajan']
    b(i)=0;
end
eval(['X0(i)=X' int2str(i-1) '(2);'])
eval(['W(i)=(X' int2str(i-1) '(3)-X' int2str(i-1) '(1))/2;'])
a(i)=b(i)/W(i);
end
end
a(1)=exp(b(1)-sum((b(2:length(b)).*X0(2:length(X0)))./W(2:length(W))));
for i=1:N
    if i>2^k
        YM(i)=b(1);
    else
        YM(i)=b(1)+b(2:length(b))*(T(i,1:k)');
    end
end
SR=sum((Y'-YM).^2); SAD=(SR-SE);
fR=N-k-1; fAD=fR-fE;
FAD=(SAD/fAD)/(SE/fE);
if FAD>FTAD
    'Model nije adekvatan'
end

disp('Koeficijenti stepenog modela oblika: y=a0*x1^a1*x2^a2*...*xk^ak, su:')
a=[real(a)]

```

PROGRAM P.5.3. MODELIRANJE ISTRAŽIVANIH PARAMETARA PROCESA FSW

```

clear;
%program modeliranje
x=[ 200   1000   5     7     28
      80    1000   5     7     28
     200    630    5     7     28
      80    630    5     7     28
     200   1000   3     7     28
      80   1000   3     7     28
     200    630   3     7     28
      80    630   3     7     28
     200   1000   5     5     28
      80   1000   5     5     28
     200    630   5     5     28
      80    630   5     5     28
     200   1000   3     5     28
      80   1000   3     5     28
     200    630   3     5     28
      80    630   3     5     28
     200   1000   5     7     25
      80   1000   5     7     25
     200    630   5     7     25
      80    630   5     7     25
     200   1000   3     7     25
      80   1000   3     7     25
     200    630   3     7     25
      80    630   3     7     25
     200   1000   5     5     25
      80   1000   5     5     25
     200    630   5     5     25
      80    630   5     5     25
     200   1000   3     5     25
      80   1000   3     5     25
     200    630   3     5     25
      80    630   3     5     25
     200   1000   5     5     25
      80   1000   5     5     25
     200    630   5     5     25
      80    630   5     5     25
     200   1000   3     5     25
      80   1000   3     5     25
     200    630   3     5     25
      80    630   3     5     25
     125   800    3.87  5.92  26.46
     125   800    3.87  5.92  26.46

```

```

125     800    3.87    5.92    26.46
125     800    3.87    5.92    26.46];
%ucitavanje podataka
%za silu
%load Feksp.txt
%za temperaturu
load Teksp.txt;
%za zateznu cvrstocu
%load Rmx.txt
%load Rmy.txt
%za udarnu zilavost
%load ro.txt
f=Teksp;
bet0=ones(21,1)*.1;
bet=[] ;
for j=1:6
    y=f(:,j);
    b= nlinfinit(x,y,@faktor5,bet0);
    bet=[bet;b'];
end
for i=1:36
    x1 = x(i,1);
    x2 = x(i,2);
    x3 = x(i,3);
    x4 = x(i,4);
    x5 = x(i,5);
    yf=[];
    for j=1:6
        b0 = bet(j,1);
        b1 = bet(j,2);
        b2 = bet(j,3);
        b3 = bet(j,4);
        b4 = bet(j,5);
        b5 = bet(j,6);
        b12 = bet(j,7);
        b13 = bet(j,8);
        b14 = bet(j,9);
        b15 = bet(j,10);
        b23 = bet(j,11);
        b24 = bet(j,12);
        b25 = bet(j,13);
        b34 = bet(j,14);
        b35 = bet(j,15);
        b45 = bet(j,16);
        b11 = bet(j,17);
        b22 = bet(j,18);
        b33 = bet(j,19);
        b44 = bet(j,20);
        b55 = bet(j,21);
        yf=[yf;b0+b1*x1+b2*x2+b3*x3+b4*x4+b5*x5+b12*x1.*x2+b13*x1.*x3+b14*x1.*x4...
            +b15*x1.*x5+b23*x2.*x3+b24*x2.*x4+b25*x2.*x5+b34*x3.*x4+b35*x3.*x5...
            +b45*x4.*x5+b11*x1.^2+b22*x2.^2+b33*x3.^2+b44*x4.^2+b55*x5.^2];
        yf(i,j)=yf(j);
    end
end

%break
%samo za temperaturu
Tmod=Yf;
load Tnum.txt;
xd=[12 20 27]; xdi=12:0.075:27;
xg=[7 17 27]; xgi=7:0.1:27;
for i=1:36
    Deksp=[f(i,1) f(i,2) f(i,3)]; Geksp=[f(i,4) f(i,5) f(i,6)];
    Dmod=[Tmod(i,1) Tmod(i,2) Tmod(i,3)]; Gmod=[Tmod(i,4) Tmod(i,5) Tmod(i,6)];
    Dnum=[Tnum(i,1) Tnum(i,3) Tnum(i,5)]; Gnum=[Tnum(i,6) Tnum(i,8) Tnum(i,10)];
    Dei=interp1(xd,Deksp,xdi,'cubic'); Gei=interp1(xg,Geksp,xgi,'cubic');
    Dmi=interp1(xd,Dmod,xdi,'cubic'); Gmi=interp1(xg,Gmod,xgi,'cubic');

```

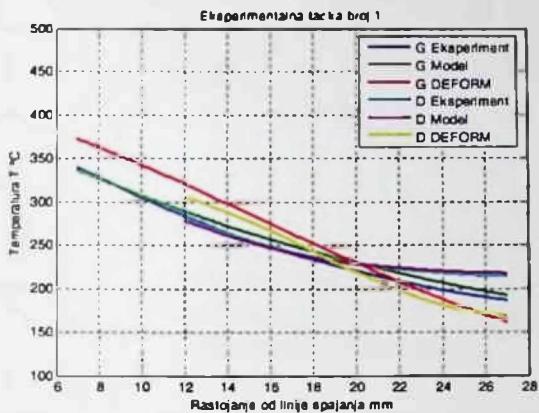
PRILOG 5. KARAKTERISTIČNI PROGRAMI

```
Dni=interp1(xd,Dnum,xdi,'cubic'); Gni=interp1(xg,Gnum,xgi,'cubic');
figure(1)
plot(xgi,Gei,xgi,Gmi,xgi,Gni,xdi,Dei,xdi,Dmi,xdi,Dni,'LineWidth',2)
title(['Eksperimentalna tacka broj ',num2str(i)]);
legend('G Eksperiment','G Model','G DEFORM','D Eksperiment','D Model','D DEFORM')
xlabel('Rastojanje od linije spajanja mm')
ylabel('Temperatura T °C')
axis([6 28 100 450])
grid
pause
end
```

PODPROMGRAM P.5.3.1. EKSPERIMENTALNI PLAN - PET FAKTORA

```
function yf=faktor5(bet,x)
b0 = bet(1);
b1 = bet(2);
b2 = bet(3);
b3 = bet(4);
b4 = bet(5);
b5 = bet(6);
b12 = bet(7);
b13 = bet(8);
b14 = bet(9);
b15 = bet(10);
b23 = bet(11);
b24 = bet(12);
b25 = bet(13);
b34 = bet(14);
b35 = bet(15);
b45 = bet(16);
b11 = bet(17);
b22 = bet(18);
b33 = bet(19);
b44 = bet(20);
b55 = bet(21);
x1 = x(:,1);
x2 = x(:,2);
x3 = x(:,3);
x4 = x(:,4);
x5 = x(:,5);
yf=b0+b1*x1+b2*x2+b3*x3+b4*x4+b5*x5+b12*x1.*x2+b13*x1.*x3+b14*x1.*x4...
+b15*x1.*x5+b23*x2.*x3+b24*x2.*x4+b25*x2.*x5+b34*x3.*x4+b35*x3.*x5...
+b45*x4.*x5+b11*x1.^2+b22*x2.^2+b33*x3.^2+b44*x4.^2+b55*x5.^2;
```

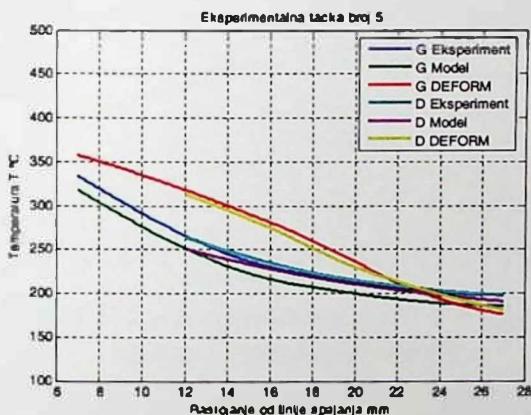
PRILOG 6. PRESJEČNI DIJAGRAMI TEMPERATURE



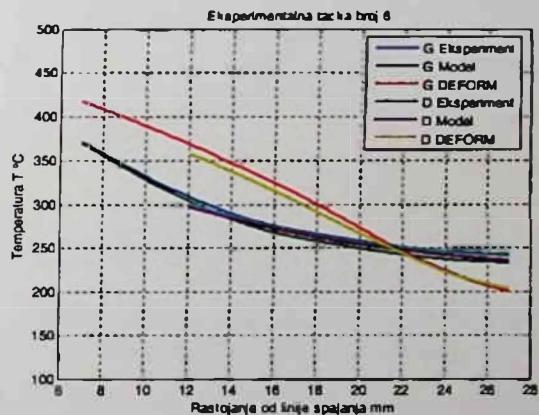
Slika P.6.1. Temperatura u 1. tački eksperimentalnog plana



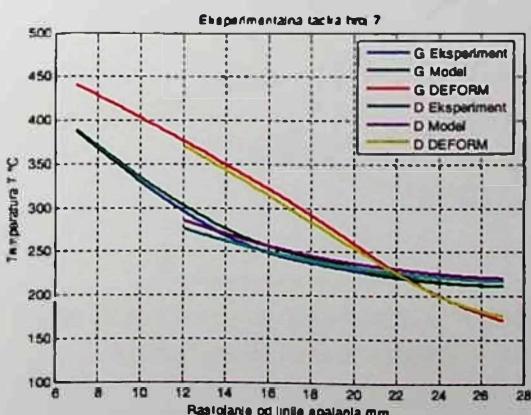
Slika P.6.2. Temperatura u 2. tački eksperimentalnog plana



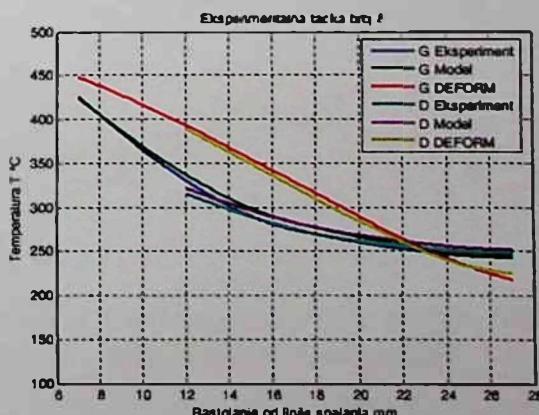
Slika P.6.3. Temperatura u 5. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.4. Temperatura u 6. tački eksperimentalnog plana

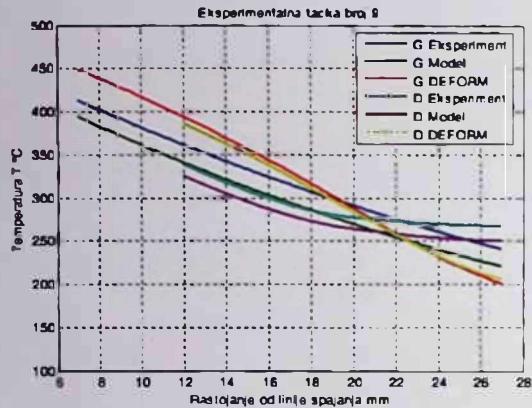


Slika P.6.5. Temperatura u 7. tački eksperimentalnog plana

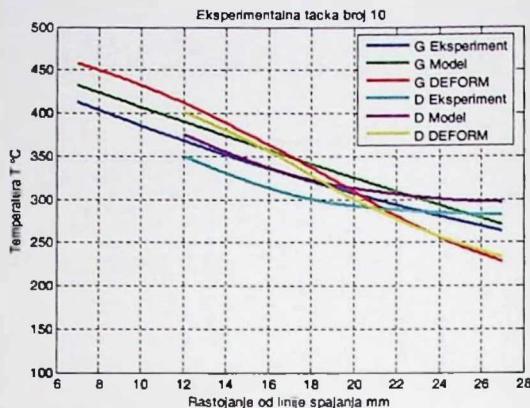


Slika P.6.6. Temperatura u 8. tački eksperimentalnog plana

PRILOG 6. PRESJEĆNI DIJAGRAMI TEMPERATURE



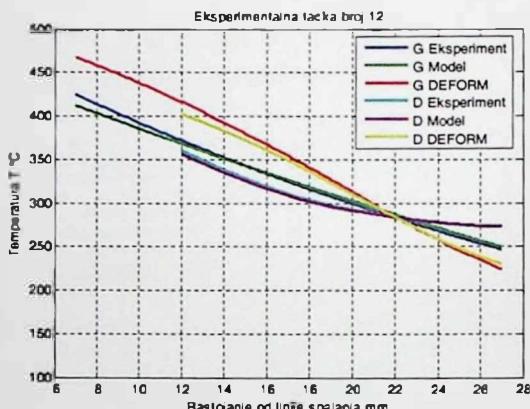
Slika P.6.7. Temperatura u 9. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.8. Temperatura u 10. tački eksperimentalnog plana



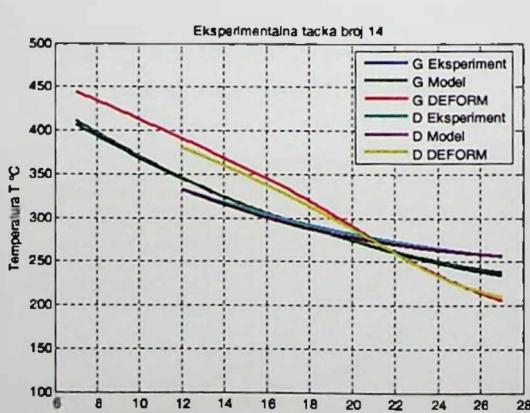
Slika P.6.9. Temperatura u 11. tački eksperimentalnog plana



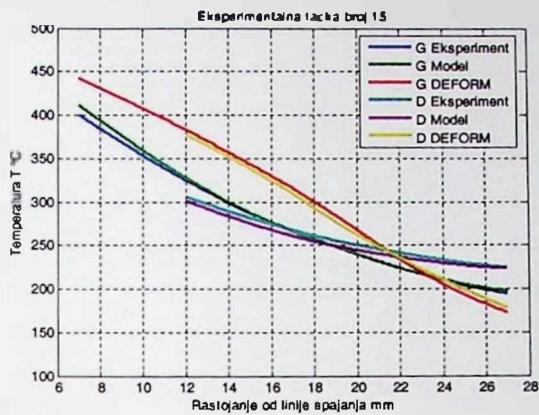
Slika P.6.10. Temperatura u 12. tački eksperimentalnog plana



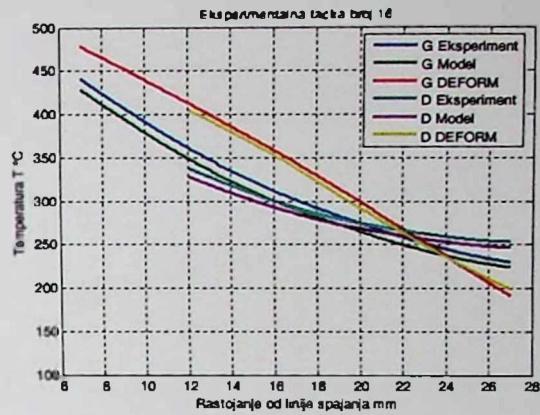
Slika P.6.11. Temperatura u 13. tački eksperimentalnog plana



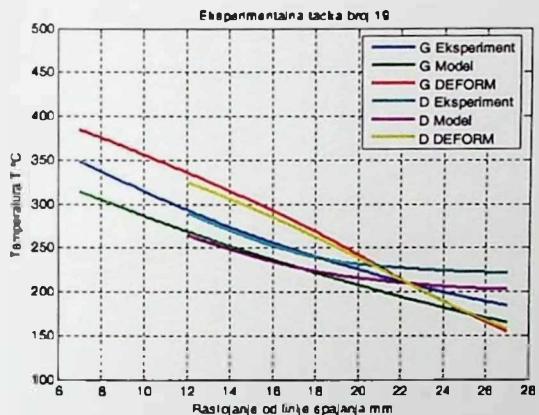
Slika P.6.12. Temperatura u 14. tački eksperimentalnog plana



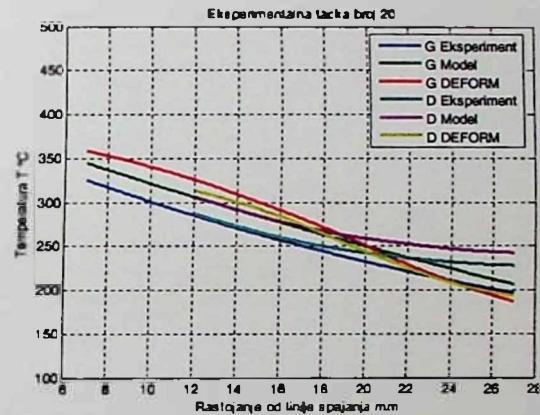
Slika P.6.13. Temperatura u 15. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.14. Temperatura u 16. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.15. Temperatura u 19. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.16. Temperatura u 20. tački eksperimentalnog plana

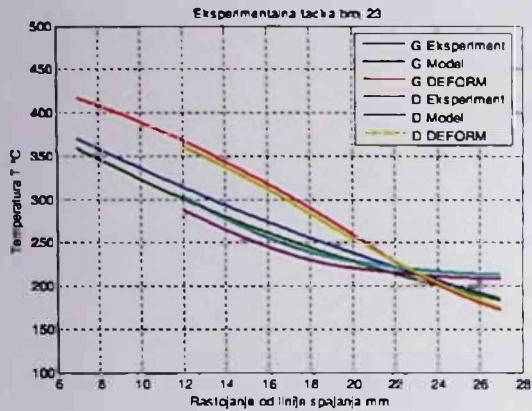


Slika P.6.17. Temperatura u 21. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.18. Temperatura u 22. tački eksperimentalnog plana

PRILOG 6. PRESJEĆNI DIJAGRAMI TEMPERATURE



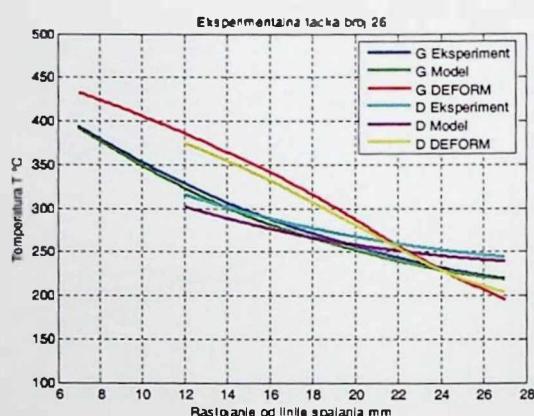
Slika P.6.19. Temperatura u 23. tački eksperimentalnog plana



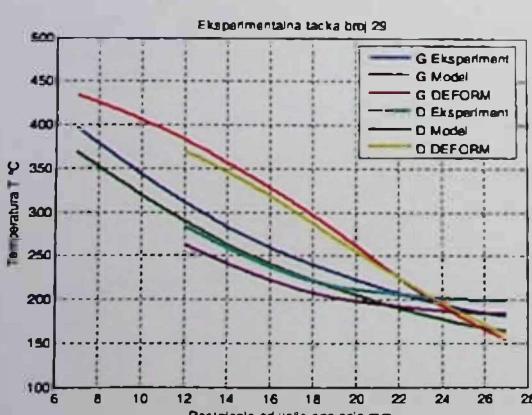
Slika P.6.20. Temperatura u 24. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.21. Temperatura u 25. tački eksperimentalnog plana



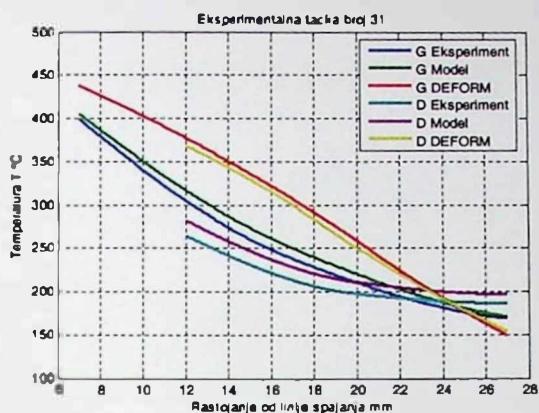
Slika P.6.22. Temperatura u 26. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.23. Temperatura u 29. tački eksperimentalnog plana



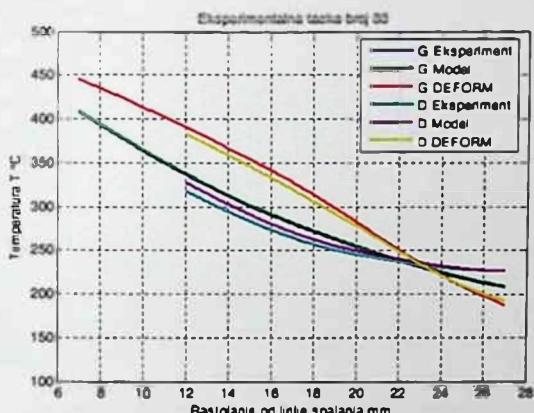
Slika P.6.24. Temperatura u 30. tački eksperimentalnog plana



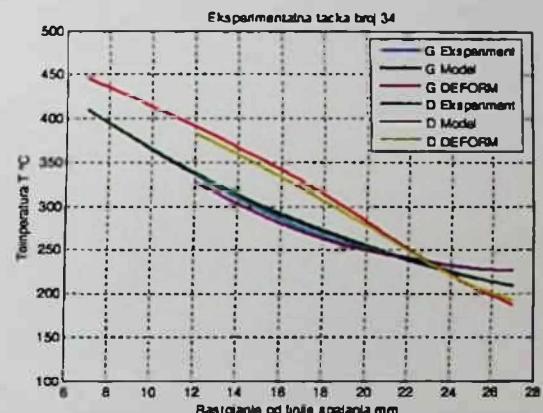
Slika P.6.25. Temperatura u 31. tački eksperimentalnog plana



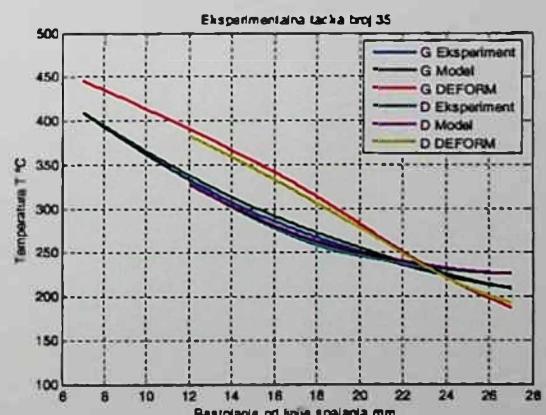
Slika P.6.26. Temperatura u 32. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.27. Temperatura u 33. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.28. Temperatura u 34. tački eksperimentalnog plana



Slika P.6.29. Temperatura u 35. tački eksperimentalnog plana

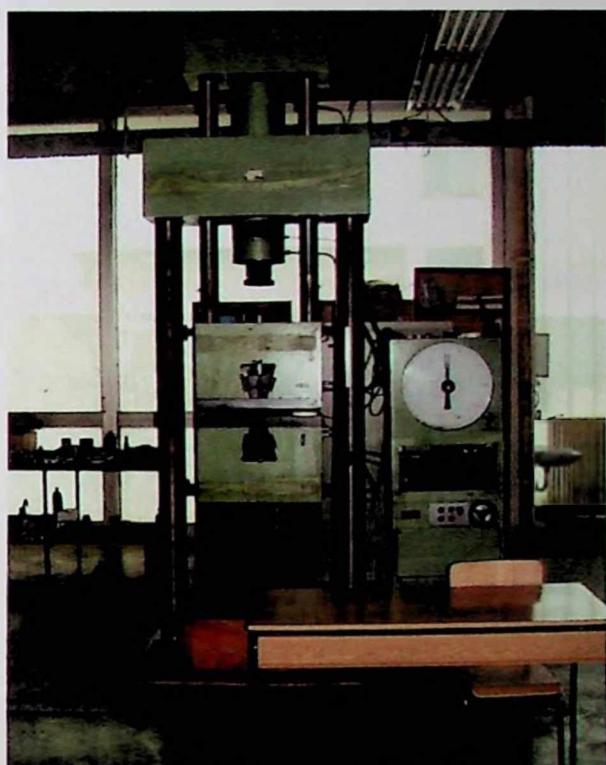




PRILOG 7. KARAKTERISTIČNE FOTOGRAFIJE



Slika P.7.1. Horizontalna glodalica,
MODEL 6P13, ruske proizvodnje



Slika P.7.2. Mašina za istezanje -
„kidalica”, R100, ruske proizvodnje



Slika P.7.3. Univerzalni strug US 400,
Alatne mašine, Skoplje



Slika P.7.4. Tračna testera UD 210,
Pobeda, Novi Sad

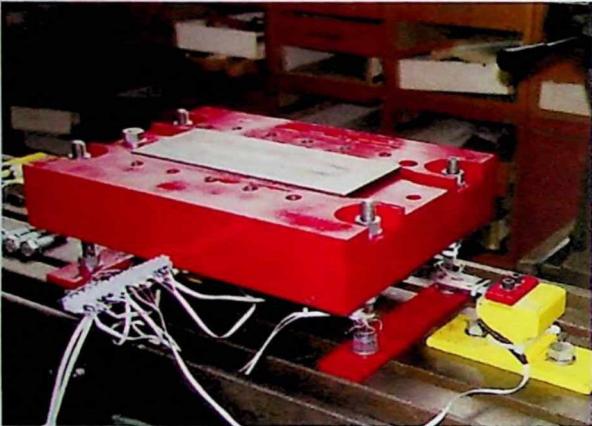
PRILOG 7. KARAKTERISTIČNE FOTOGRAFIJE



Slika P.7.5. Univerzalna brusilica 40LN,
Majevica



Slika P.7.6. Univerzalna glodalica,
UG 1000



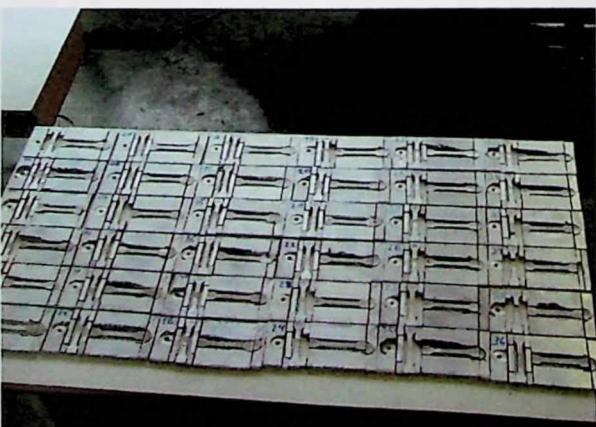
Slika P.7.7. Osnovna ploča i fino brušena
oslona ploča



Slika P.7.8. Proces FSW



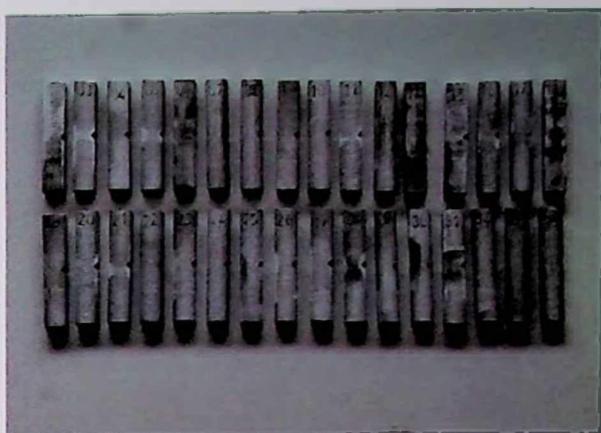
Slika P.7.9. Zavareni radni komadi
postupkom FSW



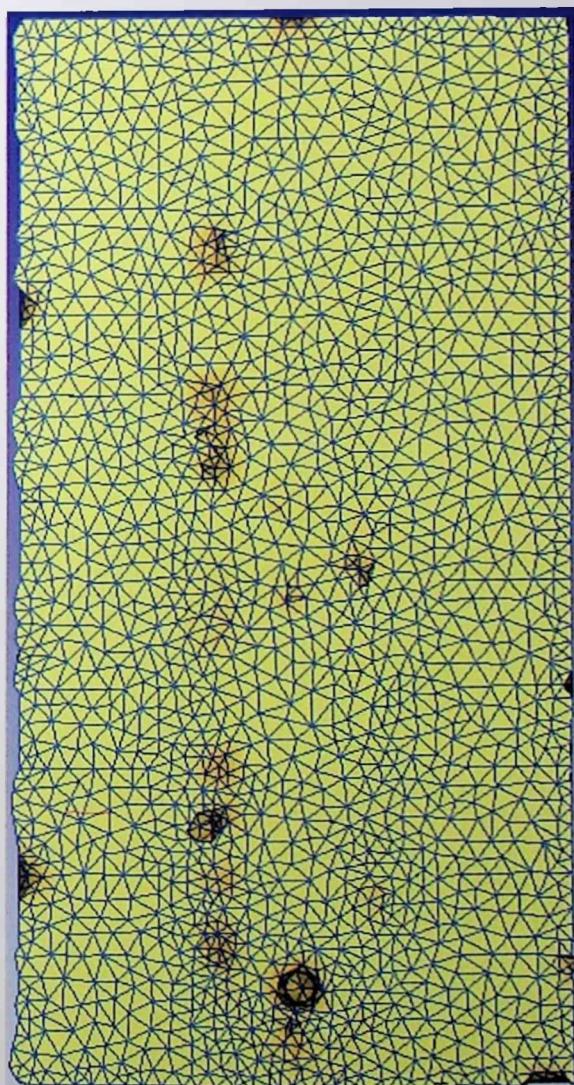
Slika P.7.10. Isjećeni uzorci iz zavarenih
radnih komada



Slika P.7.11. Pripremljene epruvete za ispitivanje istezanjem



Slika P.7.12. Pripremljene epruvete za ispitivanje udarne žilavosti



Slika P.7.13. Numerička simulacija procesa FSW sa prikazanom mrežom konačnih elemenata

PODACI POTREBNI ZA DIGITALIZACIJU DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora:

Nikola Šibalić

Godina rođenja:

1975.

E-mail:

nikola@ucg.ac.me

Organizaciona jedinica Univerziteta Crne Gore:

Mašinski fakultet

Naslov doktorske disertacije:

Modeliranje i simulacija procesa spajanja deformisanjem - FSW

Prevod naslova na engleski jezik:

Modeling and Simulation of the Process of Joining by Deformation - FSW

Datum odbrane:

10. jul 2010. godine

Signatura u Univerzitetskoj biblioteci¹:

IV 1864

Naslov, sažeci, ključne riječi (priložiti dokument sa podacima potrebnim za unos doktorske disertacije u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore) Izjava o korišćenju (priložiti potpisano izjavu):

Napomena:

¹ Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

**PODACI POTREBNI ZA UNOS DOKTORSKE DISERTACIJE U DIGITALNI
ARHIV UNIVERZITETA CRNE GORE**

Prevod naslova disertacije na engleski jezik:

Modeling and Simulation of the Process of Joining by Deformation - FSW

Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu):

1. Prof. dr Vuko Domazetović, predsjednik.
2. Prof. dr Miroslav Plančak, član.
3. Prof. dr Vanja Asanović, član.
4. Doc. dr Darko Bajić, član.
5. Prof. dr Milan Vukčević, mentor.

Sažetak * :

U radu su izvršena obimna eksperimentalna istraživanja, modeliranja i numeričke simulacije, u cilju određivanja termo-mehaničkih i mikrostrukturnih parametara procesa spajanja materijala deformisanjem - FSW. Date su teorijske postavke o procesu spajanja materijala deformisanjem, odnosno zavarivanja postupkom FSW i osnove korišćenih metoda. Izvršeno je spajanje lima legure aluminijuma 6082-T6 (AlSi1MgMn), debljine 7.8 mm. U radu su prikazana eksperimentalna istraživanja izvršena na osnovu usvojenog višefaktornog ortogonalnog plana, sa variranjem faktora na dva nivoa i ponavljanjem u centralnoj tački plana. Veličine koje su varirane u eksperimentu su: brzina zavarivanja, ugaona brzina okretanja alata, ugao nagiba trna alata, prečnik trna alata i prečnik čela alata. Na osnovu usvojenih geometrijskih parametara urađena je familija alata. Eksperiment je realizovan u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Podgorici, na sobnoj temperaturi u uslovima koji su slični proizvodnim. Eksperimentalna istraživanja su podijeljena u četiri faze. U prvoj fazi sprovedeno je spajanje (zavarivanje) radnih komada i izvršeno mjerjenje komponenti sila koje se javljaju tokom odvijanja procesa FSW (vertikalne sile - F_z , uzdužne sile - F_x i bočne sile F_y). Druga faza se odnosi na mjerjenje temperature zavarivanog materijala u šest usvojenih pozicija korišćenjem termo-parova. U trećoj fazi se izvode mehanička ispitivanja zavarenog materijala. Određuje se zatezna čvrstoća u dva normalna pravca R_{mx} i R_{my} , kao i udarna žilavost p. Četvrta faza se odnosi na metalografska ispitivanja odnosno određivanje mikrostrukture zavarenog spoja. Za sprovođenje ovih faza u radu je korišćena precizna analogno-digitalna mjerna oprema povezana u informacione mjerne sisteme.

Na osnovu izmjerениh vrijednosti vertikalne sile F_z za sve tačke eksperimentalnog plana, izvršena je optimizacija procesa. Za sve istraživane parametre sprovedena je regresiona analiza i dobijeni modeli procesa FSW. Za numeričku simulaciju koristi se softverski paket DEFORM-3D, koji je namijenjen za analizu složenih trodimenzionalnih nelinearnih problema. Numerička simulacija je urađena za sve tačke eksperimentalnog plana i izvodi se u dvije etape: kada se alat ukopava u materijal i kada se vrši zavarivanje materijala.

Analizom i poređenjem istraživanih parametara, dobijenih eksperimentalnim putem, modeliranjem i numeričkom simulacijom, izведен je veliki broj relevantnih zaključaka. Detaljnijim poznavanjem parametara koji karakterišu proces FSW, moguće je odgovoriti na sve strože kriterijume u pogledu kvaliteta zavarenog spoja, postojanosti alata, smanjenja utroška energije i smanjenja zagađenja životne sredine.

Sažetak na engleskom (njemačkom ili francuskom) jeziku:

In the thesis the extensive experimental researches are conducted, modeling and numerical simulation, in order to determine the thermo-mechanical and microstructural parameters of the process of joining by deformation - FSW. The theoretical assumptions about the process of joining

materials by deformation, or friction stir welding - FSW and basis of the methods used are provided in the thesis. The joining of the sheet aluminum alloy 6082-T6 (AlSi1MgMn), thickness 7.8 mm, is performed. The thesis presents experimental research conducted on the basis of the adopted multifactorial orthogonal plan, with varying factors on two levels and repetition in the central point of the plan. Values varied in the experiment are: welding speed, rotation speed of the pin, slope angle of the pin, pin diameter and shoulder diameter. On the basis of the adopted geometrical parameters, the family of tools was made. The experiment was carried out in the laboratory of Mechanical Engineering Faculty in Podgorica, at the room temperature under conditions similar to production. Experimental studies are divided into four phases. The first phase includes joining (welding) of workpieces and measurement of the forces that appear during the process of FSW (down force - F_z , traversing force - F_x and side force - F_y). The second phase relates to the measurement of temperature of welded material in the six position adopted by using thermocouples. In the third stage the mechanical testing of welded materials is performed. The tensile strength is determined in two normal directions R_{mx} and R_{my} and fracture toughness of P . The fourth phase is related to the metallographic microstructure examination and determination of welded joints. In order to perform these phases, the precise analog-digital measuring equipment connected with information measurement systems is used.

Based on the measured values of down force F_z for all points of the experimental plan, the optimization of the process is performed. For all researched parameters, the regression analysis is conducted and resulting models of FSW process. For numerical simulation software package DEFORM-3D was used, which is used for the analysis of complex three-dimensional nonlinear problems. Numerical simulation was performed for all points of the experimental plan and carried out in two stages: when the tool plunges into the material, and when welding of materials is performed.

By analyzing and comparing the research parameters, obtained by experimental, modeling and numerical simulation, a large number of relevant conclusions was obtained. With the detailed knowledge of the parameters that characterize the FSW process, it is possible to respond to any more stringent criteria in terms of quality of welded joint, persistence of the tools, reducing of the energy consumption and reducing of the environmental pollution.

Ključne riječi:

Spajanje deformisanjem, FSW, modeliranje, numerička simulacija, optimizacija, čelo alata, trn alata, brzina zavarivanja, sila zavarivanja, temperatura, zatezna čvrstoća, udarna žilavost, mikrostruktura zavarenog spoja

Ključne riječi na engleskom jeziku:

Joining by deformation, FSW, modeling, numerical simulation, optimization, shoulder, pin, welding speed, welding force, temperature, tensile strength, fracture toughness, microstructure of welded joints

Naučna oblast/uža naučna oblast:

Mašinstvo / Proizvodne tehnologije

Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku:

Mechanical Engineering / Production Technologies

Ostali podaci:

* Ukoliko je predviđeni prostor za polja Sažetak, Sažetak na engleskom jeziku, Ključne riječi i Ključne riječi na engleskom jeziku nedovoljan, priložiti ih u posebnom prilogu.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u **Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore** unese doktorsku disertaciju pod naslovom: **Modeliranje i simulacija procesa spajanja deformisanjem - FSW** koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio¹.

Autorstvo

Autorstvo – bez prerada

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Autorstvo – nekomercijalno

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda

Nikola Šibalić

U Podgorici, 22.03.2022. godine

¹ Odabratи (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poleđini ovog priloga)

Autorstvo

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

Autorstvo – bez prerada

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Autorstvo – nekomercijalno

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.