



# STUDIJA SLUČAJA

## ZAVARIVANJE TRENJEM

### CTC Podgorica

**Acronym:** WBC-VMnet

**Naziv projekta:** WBC Virtual Manufacturing Network – Fostering an Integration of the Knowledge Triangle,

**Broj projekta:** 144684-TEMPUS-2008-RS-JPHES

**Datum:** Maj 2012,

**Mesto:** Podgorica, Crna Gora



## Revision Sheet

Broj revizije	Datum	Opis revizije
Rev. 1	12/10/2011	Prva verzija dokumenta CTC tima
Rev. 2	31/05/2012	Finalna verzija odobrena od Koordinatora CTC Podgorica

*This publication has been funded by the European Commission. The publication reflects only the views of the authors. The European Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.*

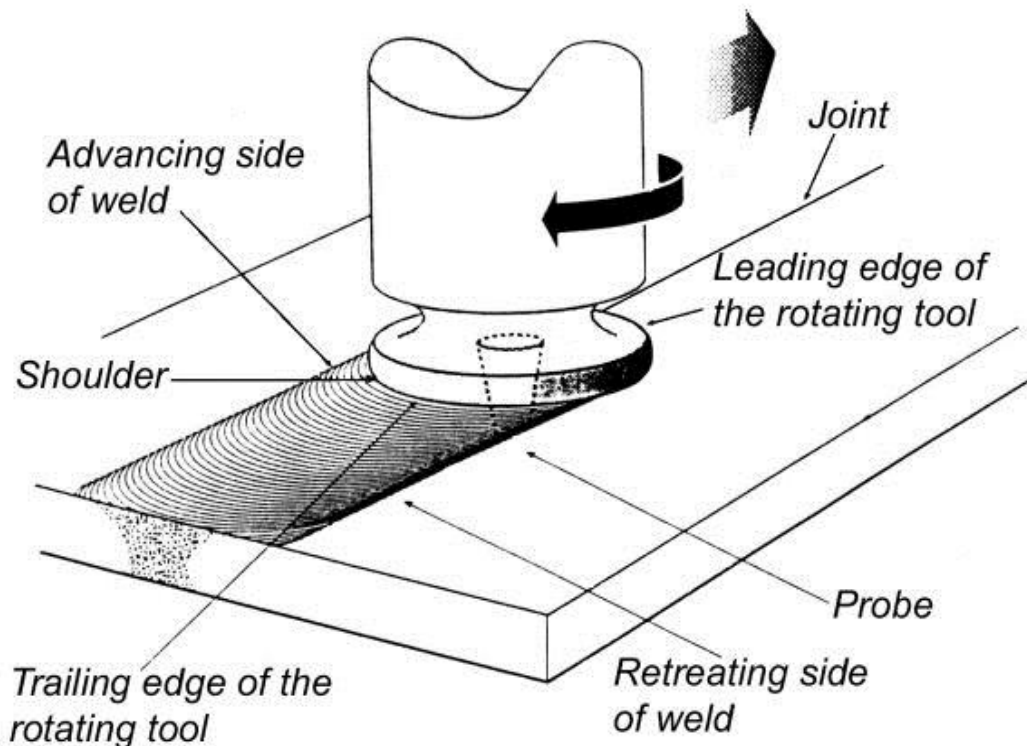
## SADRŽAJ

1. Uvod
2. Zavarivanje trenjem
  - 2.1. Struktura zavarenog spoja
  - 2.2. Geometrija spoja kod FSW
  - 2.3. Prednosti i nedostaci FSW
  - 2.4. Materijali koji se mogu zavarivati FSW
  - 2.5. Primjena FSW
3. Izvođenje FSW
4. Mjerenje komponenata sila FSW
5. Mjerenje temperature
6. Mjerenje signala akustičke emisije (AE signala)
7. Određivanje strukture presjeka spoja
  - 7.1. Izrada priprema za ispitivanje mikrostrukture
  - 7.2. Metalografsko poliranje
  - 7.3. Hemijska obrada i snimanje slike mikrostrukture
8. FEM modeliranje FSW
9. Laser Assisted FSW
10. Zaključak
11. Literatura

## 1. UVOD

Krajem 1991. patentiran je novi metod spajanja, odnosno zavarivanja metala, koji je pronašao Wayne Thomas i nazvan je Zavarivanje trenjem (**F**riktion **S**tir **W**elding - FSW). Za razliku od drugih metoda zavarivanja, FSW se izvodi u čvrstom stanju bez topljenja materijala. Od pronalaska, proces je izazvao veliku pažnju istraživača i široku primjenu u praksi.

Kod FSW cilindrični alat se okreće i lagano pomjera kroz materijal duž linije spoja (Sl.1.). Cilindrični alat je stepenastog profila, gdje se dio većeg prečnika naziva shoulder, a manjeg pin. Uzorci koji se zavaruju moraju biti čvrsto stegnuti da nebi došlo do razdvajanja tokom procesa. Frikciono zagrijavanje nastaje između alata i materijala uzoraka. Generisana toplota omogućava omekšavanje materijala uzoraka bez dostizanja tačke topljenja, i omogućava pomjeranje alata duž linije spoja. Pri tome se vrši transfer materijala dovedenog u plastično stanje sa vodeće ivice alata (leading edge) na prateću ivicu (trailing edge). Materijal se sabija čeonim kontaktom shoulder-a i profilom pin-a. Nakon procesa ostaje čvrsta faza spoja između dva uzorka.



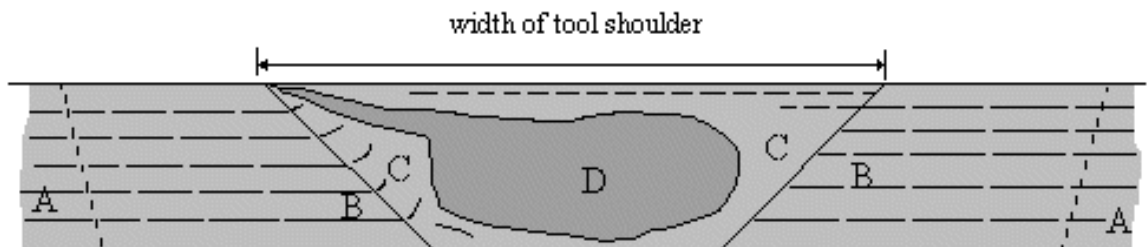
Sl.1. Friction Stir Welding (FSW)

## 2. ZAVARIVANJE TRENJEM

### 2.1. Struktura zavarenog spoja

Struktura zavarenog spoja se sastoji od četiri zone (Sl.2.):

- A - zona osnovnog materijala,
- B - zona uticaja toplote (HAZ - Heat affected zone),
- C - zona termo-mehaničkog uticaja (TMAZ - Thermo-Mechanically Affected Zone),
- D - "grumen" (nugget - dio TMAZ).



Sl.2. Struktura zavarenog spoja kod FSW

Zona osnovnog materijala je zona koja nije pretrpjela nikakve mikrostrukturne promjene.

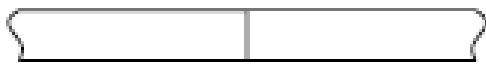
Zona uticaja toplote je zona u kojoj se modifikovane mikrostruktura amterijala i mehaničke karakteristike. Međutim, plastične deformacije se ne pojavljuju u ovoj zoni.

Zona termo-mehaničkog uticaja je zona u kojoj je materijal plastično deformisan od strane alata za FSW, uz uticaj toplote. U slučaju aluminijuma, dobijaju se značajne plastične deformacije bez rekristalizacije. Postoji jasno izražena granica sa rekristalizovanim dijelom zone termo-mehaničkog uticaja.

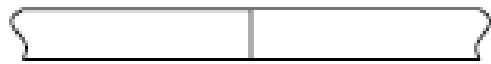
Grumen (nugget) predstavlja rekristalizovanu oblast u zoni termo-mehaničkog uticaja. Ovaj termin je deskriptivan, a manje naučan, ali je široko primijenjen u FSW. On ima oblik kao na Sl.6., a struktura mu je slojevita slična presjeku glavnice luka. S obzirom da se jasno izdvaja, tretira se kao posebna pod zona zone termo-mehaničkog uticaja.

### 2.2. Geometrija spoja kod FSW

Korišćenjem FSW mogu se dobiti: čeoni, preklopni, ugaoni i T-spoj (Sl.3.).



a)



b)



c)



d)

Sl.3. Spojevi kog FSW: a) čeonni spoj (but joint), b) preklopni spoj (lap joint),  
c) T-spoj (Tee joint), d) ugaoni spoj (angle joint)

### 2.3. Prednosti i nedostaci FSW

Prednosti procesa FSW proizilaze iz činjenice da procesi spajanja metala u čvrstoj fazi zauzimaju mjesto ispred procesa spajanja u tečnoj fazi. Prednosti uključuju mogućnost spajanja materijala koji se teško zavaruju fuzionim zavarivanjem, npr. aluminijumske legure iz serija 2000 i 7000. FSW može koristiti naročito razvijenu opremu, ili modifikovanu postojeću opremu, npr. glodalicu. Proces je pogodan za automatizaciju i korišćenje robota. Ostale prednosti su:

- male deformacije zavarenih komada, čak i kod dugačkih varova,
- odlične mehaničke karakteristike dobijene ispitivanjem na zamor, istezanje i savijanje,
- nema isparenja,
- nema poroznosti,
- nema prskanja,
- nema skupljanja,
- moguće je izvoditi proces u svim pozicijama,
- velika ušteda energije,
- koristi se netopljivi alat umjesto topljive elektrode,
- jedan alat je moguće koristiti i do 1000 m vara, npr. za aluminijumske legure serije 6000,
- nije potrebna dodatna žica za zavarivanje,
- nije potreban zaštitni gas za zavarivanje aluminijuma,
- nije potreban certifikat zavarivača,
- nije potrebno savršeno čišćenje površina,
- moguće je zavarivati različite materijale, npr. aluminijum i bakar, aluminijum i čelik.

Ograničenja FSW procesa intenzivnim naučnim istraživanjima se pokušavaju otkloniti. Međutim, glavna ograničenja su:

- radni komadi koji se zavaruju moraju biti čvrsto stegnuti,
- mora se koristiti oslona ploča,
- ostaje rupa od pina alata na kraju zavarenog spoja,
- ne može se vršiti zavarivanje kod koga se zahtijeva dodavanje materijala.

## 2.4. Materijali koji se mogu zavarivati FSW

FSW je pogodan za zavarivanje sledećih legura aluminijuma:

- serija 1000 (komercijalno cisti aluminijum)
- serija 2000 (Al-Cu),
- serija 3000 (Al-Mn),
- serija 4000 (Al-Si),
- serija 5000 (Al-Mg),
- serija 6000 (Al-Mg-Si),
- serija 7000 (Al-Zn),
- serija 8000 (Al-Li).

Maksimalna debljina u jednom prolazu kaja se može zavarivati je do 50 mm. Takođe je moguće zavarivanje aluminijumskog liva i kompozitnih materijala na bazi Al (MMC - Metal Matrix Composites) korišćenjem FSW. Od ostalih materijala FSW je moguće uspešno primijeniti na:

- bakar i njegove legure (do 50 mm debljine u jednom prolazu),
- olovo,
- titanijum i njegove legure,
- magnezijumove legure,
- cink,
- plastika,
- meki čelik,
- nerđajući čelik (austenitni, martensitni i duplex),
- niklove legure.

## 2.5. Primjena FSW

FSW je našao primjenu kod zavarivanja različitih metala koji se drugim postupcima ne mogu zavarivati. Koristi se za zavarivanje djelova u:

- brodogradnji i pomorskoj industriji,
- aero i svemirskoj industriji,
- željezničkoj industriji,
- industriji zemaljskog transporta,
- drugim industrijskim sektorima.

U svijetu postoji veliki broj institucija i istraživača koji se bave istraživanjima iz oblasti FSW. Na osnovu publikovanim naučnih i stručnih radova može se zaključiti da se u istraživanjima FSW vrši određivanje mikrostrukture presjeka spoja, a pored toga vrše i sledeća mjerenja:

1. komponenta sila u različitim pravcima,
2. obrtnog momenta alata,
3. mjerenje signala akustičke emisije,
4. mjerenja tvrdoće presjeka vara,
5. određivanje mehaničkih karakteristika spoja.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti navedenih veličina i strukturne analize dolazi se do optimalnih vrijednosti parametara režima FSW - broja obrtaja alata i brzine pomjeranja, a takođe i do optimalnih dimenzija i geometrije alata.

Značajan broj publikovanih radova odnosi se na FEM modeliranje FSW. Za modeliranja se razvija softver ili se koriste univerzalni softverski paketi tipa: FLUENT, ABAQUS, ANSYS i dr. Vrifikacija modelski dobijenih rezultata se vrši upoređenjem sa izmjerenim vrijednostima. Cilj je da se izvrši što bolji izbor ulaznih parametara, kako bi se dobili rezultati koji se što bolje poklapaju sa eksperimentalno izmjerenim vrijednostima.

Kako još nema konačnih rešenja, istraživanja iz oblasti FSW su još uvijek aktuelna i naučno veoma interesantna.

## 3. IZVOĐENJE FSW

FSW se izvodi na specijalizovanoj alatnoj mašini za tu namjenu. U nedostatku takve mašine pogodna je za korišćenje univerzalna glodalica. Ukoliko se koristi glodalica mora biti velikih gabaritnih dimenzija i velike krutosti i kao takva pogodna je za izvođenje FSW sa velikom dubinom vara. Glodalicu je potrebno prilagoditi za navedenu namjenu na odgovarajući način. Na radnom stolu mašine moniran je pribor na kome se nalazi oslona ploča i vijci za pritezanje komada koji se zavaruju. Na lijevoj strani stola vidi se pribor za stezanje i set alati za zavarivanje manjih debljina ploča. Na desnom kraju stola je alat za zavarivanje komada veće debljine (Sl.4).





Sl.4. Pripremljena glodalica marke "Cincinati", nominalne snage 50 kW za FSW sa potrebnom priborom i materijalom

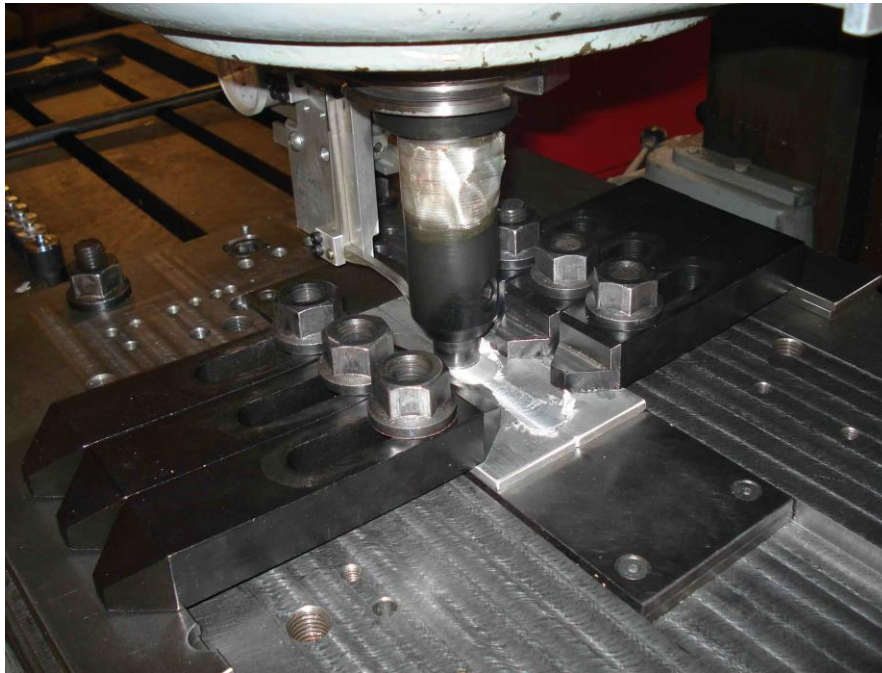
Sa lijeve strane radnog vretena mašine je komparator koji se podesi na nulu prije početka zavarivanja i služi za određivanje tačke dodira shoulder-a alata i materijala, nakon penetracije pin-a alata u materijal. Uz pomoć komparatora se određuje i dubina penetracije shoulder-a u materijal. Potrebno je da ta dubina iznosi 0.05-0.15 mm.

Nakon stezanja komada koji se zavaruju i odabiranja pogodnih režima zavarivanja glavno vreteno se pušta u pogon. Način stezanja prikazan je na Sl.28. koja predstavlja radnu fazu procesa FSW.

Radni sto glodalice se dovede u položaj tako da se osa alata poklapa sa početnom tačkom vara. Nakon toga se sto podiže naviše do željene penetracije alata u materijal. Zatim se pomjera u stranu i vrši se radni hod FSW. Sto se zaustavlja kada osa alata dođe u poziciju završne tačke vara.

Na Sl.5. dat je primjer zavarivanja komada od legure aluminijuma 6061-T6 dimenzija 200x50x6.4 mm. Shoulder alata je prečnika  $\phi D=24$  mm, a pin dimenzija:  $\phi d \times h=6 \times 6$  mm. Izabrani režimi zavarivanja su:

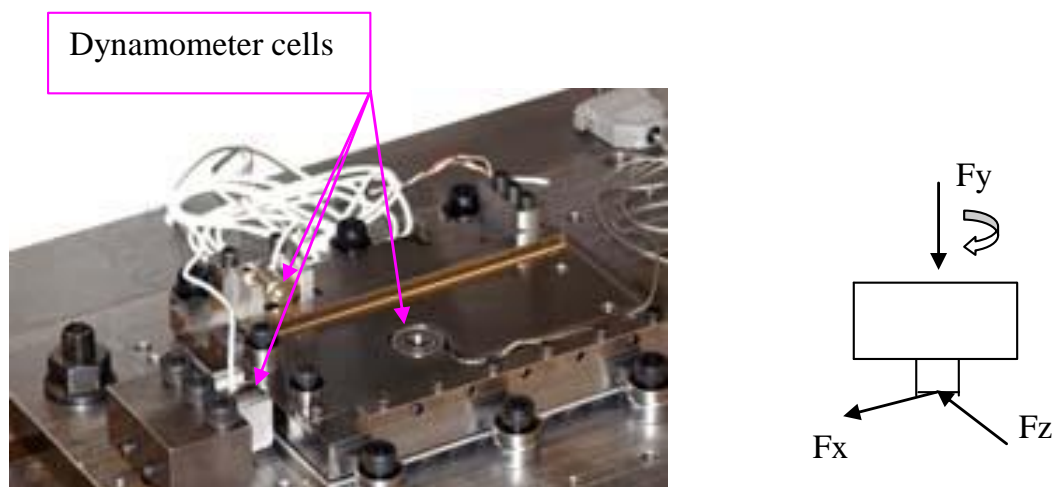
- broj obrtaja glavnog vretena:  $n=500 \text{ min}^{-1}$ ,
- brzina pomjeranja radnog stola:  $v=140 \text{ mm/min}$ .



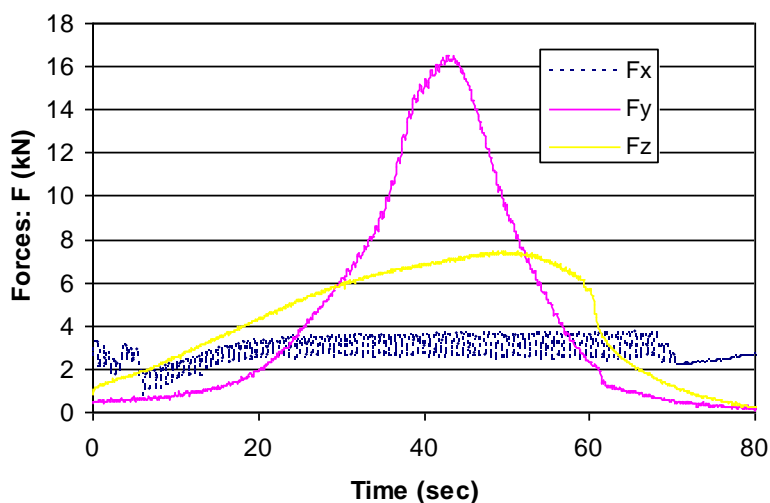
Sl.5. Izvođenje FSW

#### 4. MJERENJE KOMPONENATA SILA FSW

Za mjerenje sila zavarivanja metodom FSW koristi se pribor dat na Sl.6. Pribor se sastoji od nepokretnog i pokretnog dijela koji se kreće između kotrljajnih ležajeva, kako bi se mogla registrovati sila na dinamometričkim senzorima. Komadi koji se zavaruju stežu se na pokretnom dijelu. Za razliku od komponenata sila u x i z pravcu, komponenta u y pravcu se mjeri u jednoj tački. Izmjerene vrijednosti komponenata sila FSW za uslove zavarivanja prethodno date, prikazane su na Sl.7.



Sl.6. Pribor za mjerenje komponenata sila kod FSW

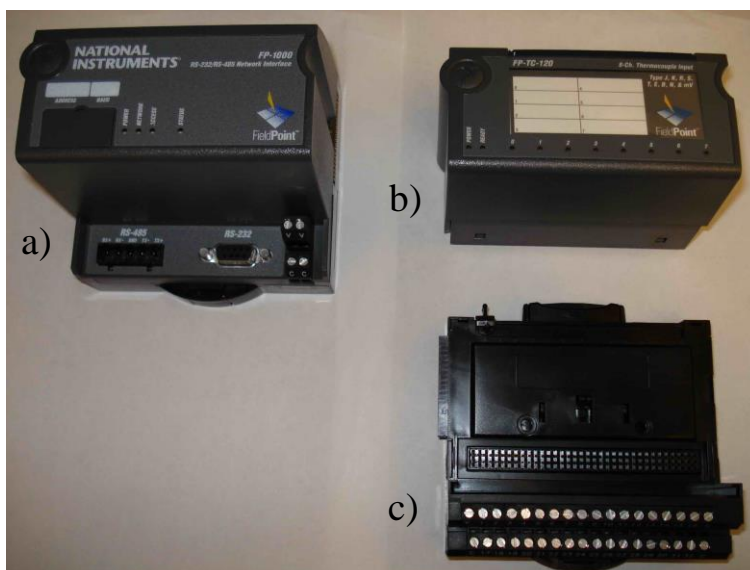


SI.7. Izmjerene vrijednosti komponentata sila kod FSW

## 5. MJERENJE TEMPERATURE

Mjerenje razvoja temperature u zapremini materijala koji se zavarujemo se vršiti pomoću opreme koja radi na osnovu termoparova. Primjer takve opreme je oprema marke "National Instruments", koju čine:

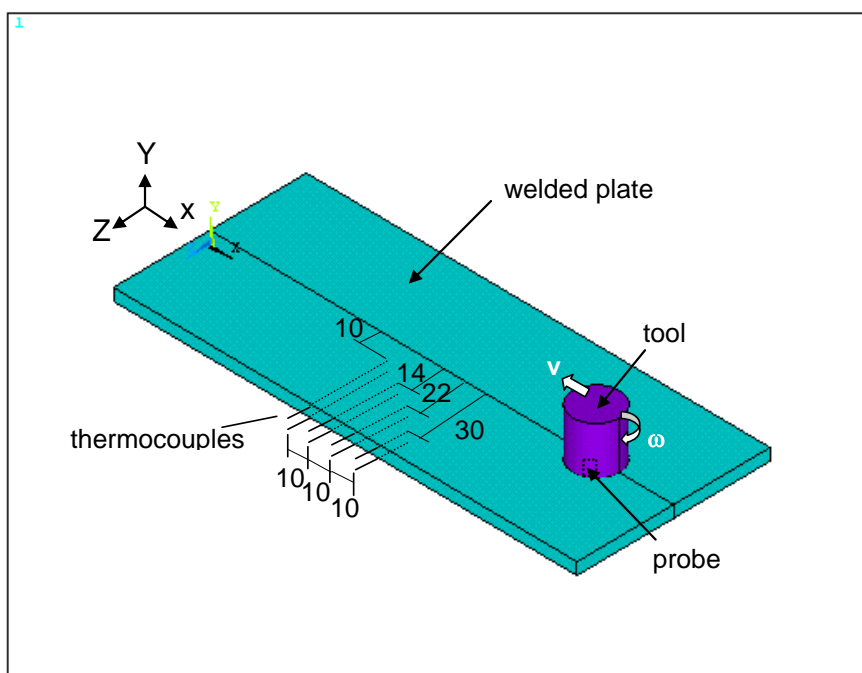
1. FP-1000 - Mrežni modul (SI.8.a),
2. National Instruments FP-TC-120 - Osmokanalni ulazni uređaj za termoparove (SI.8.) i
3. National Instruments FP-TB-1 - Priključni terminal sa vicima (SI.8.c).



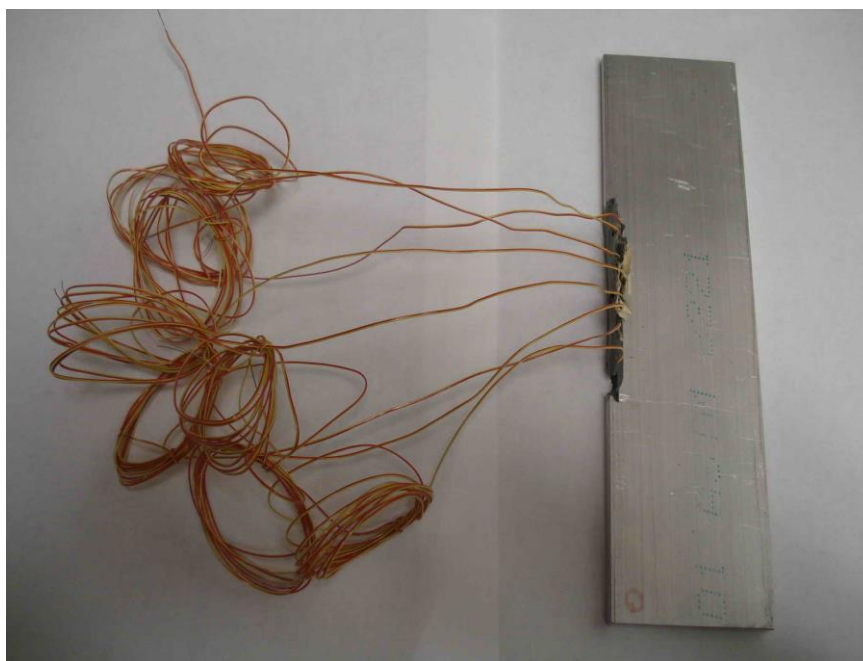
SI.8. NI oprema za mjerenje temperature na principu termoparova



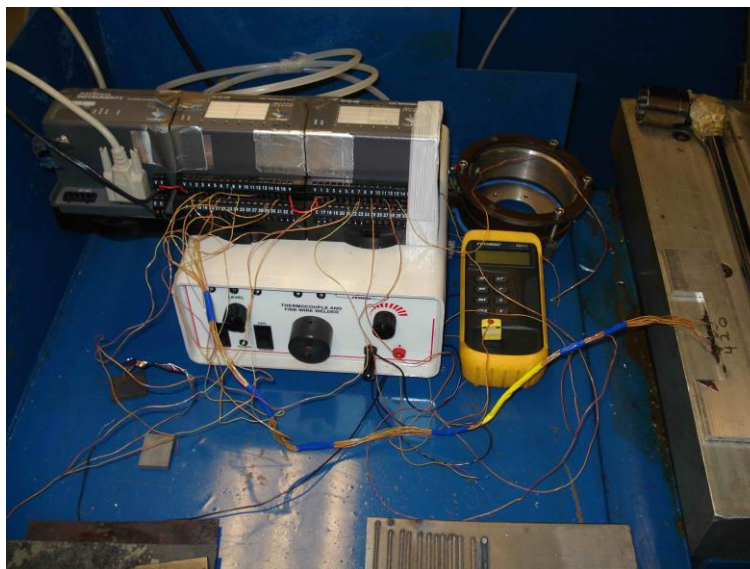
Termoparovi se prave od Al-Cr žice. U uzorku se buše poprečne rupe prečnika 1.5 mm do pozicije određene mjerne tačke. U rupe se uvlače termoparovi i lijepe dvokomponentnim ljepljivom. Šema postavljanja termoparova data je na Sl.9. Na Sl.10. su prikazani postavljeni termoparovi u uzorku, a na Sl.11. Uzorak sa termoparovima povezan na mjernu opremu priključenu na kompjuter.



Sl.9. Šema mjernih tačaka temperature u uzorku koji se zavaruje

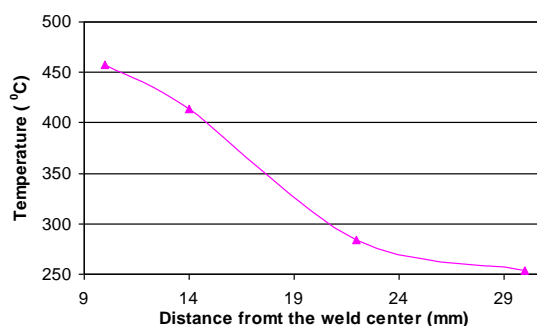


Sl.10. Postavljeni termoparovi u uzorku



Sl.11. Povezana oprema za mjerenje temperature

Za akviziciju podataka koristi se program napravljen pomoću LabVIEW softvera čiji je proizvođač National Instruments. Izmjerene vrijednosti temperature u pojedinim tačkama uzorka date su na Sl.12.



Sl.12. Eksperimentalno dobijena promjena temperature u funkciji rastojanja od linije spoja

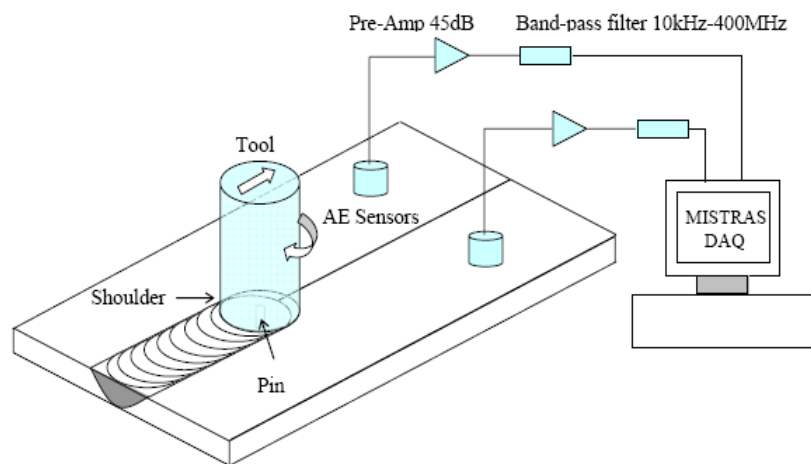
## 6. MJERENJE SIGNALA AKUSTIČKE EMISIJE (AE SIGNALA)

Prilikom izvođenja FSW od velikog je značaja praćenje procesa, zbog mogućeg oštećenja alata. Ovo je naročito izraženo kod varova velike dužine. S obzirom na prirodu postupka, može se desiti da dođe do loma pin-a alata, a da se to ne može vizuelno uočiti, jer shoulder alata ostavlja trag identičan kao da je alat ispravan. Dabi se ovakve pojave spriječile potrebno je vršiti monitoring procesa u realnom vremenu. Monitoring se vrši korišćenjem

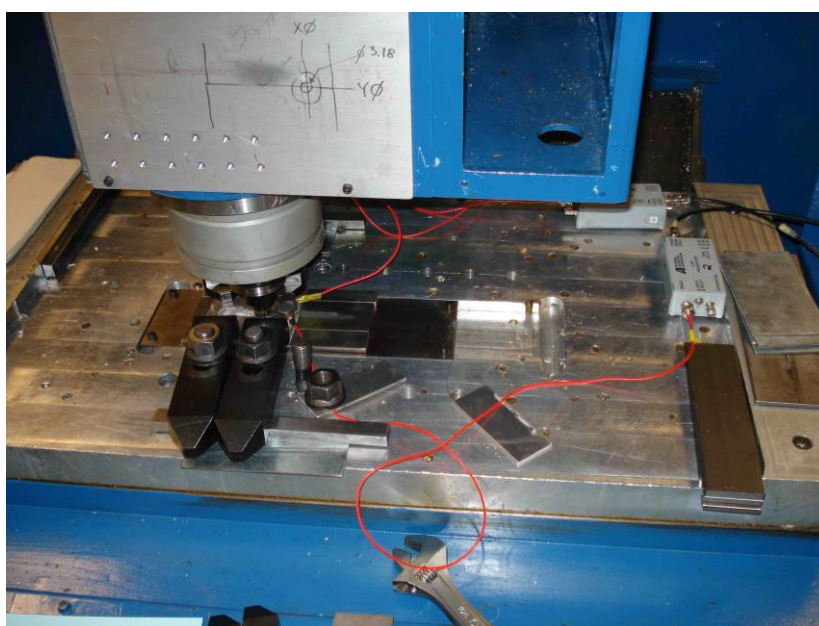
signala akustičke emisije (AE). Na osnovu ovog signala moguće je još pratiti, habanje alata i stanje zavarene površine.

AE signal jeste visokofrekventni signal (10-800 kHz) koga generišu kretanja deformacija kristalne rešetke - dislokacija, prilikom plastične deformacije. Analiza EA signala se vrši na osnovu FFT transformacije i Wavelet analize. Poteškoće kod korišćenja AE signala su što ovaj signal generiše veliki broj komponenata, pa je problem razdvojiti uticaje tih komponenata.

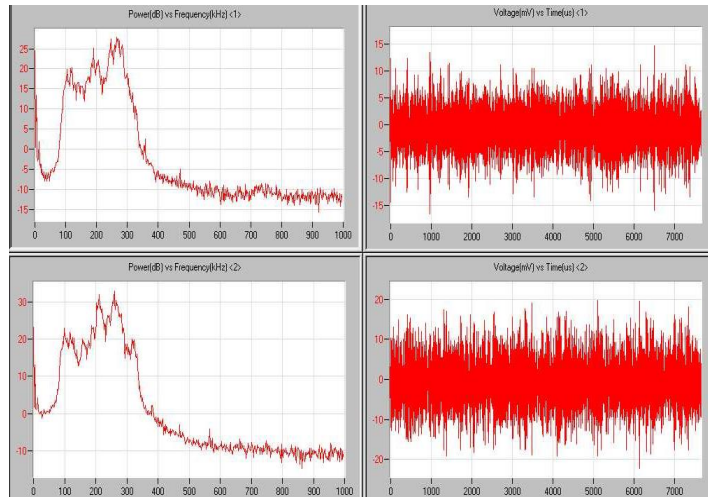
Za mjerenje signala AE koriste se davači koji se radi upoređenja postavljaju na obadva komada koji se zavaruju. Na Sl.13. je prikazana šema postavljanja senzora i ostale opreme za AE monitoring procesa FSW, a na Sl.14. izvođenje FSW sa priključenom opremom za mjerenje AE signala. Na slikama Sl.15. do Sl.17. dati su primjeri analize AE signala



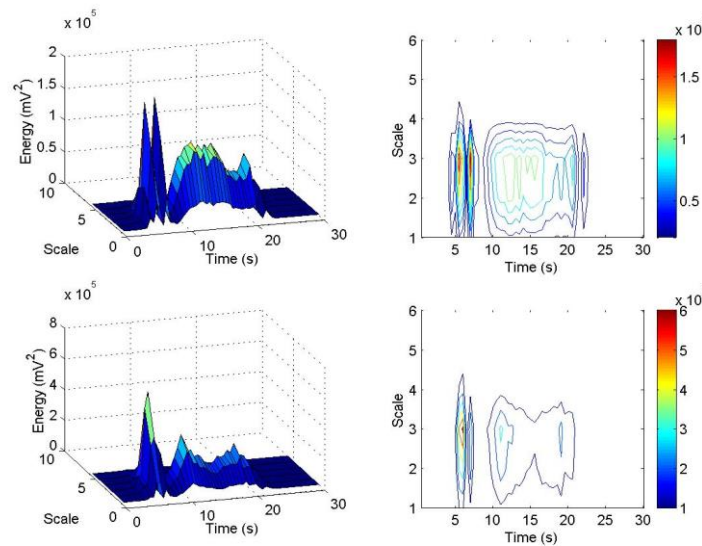
Sl.13. Šematski prikaz AE monitoringa FSW



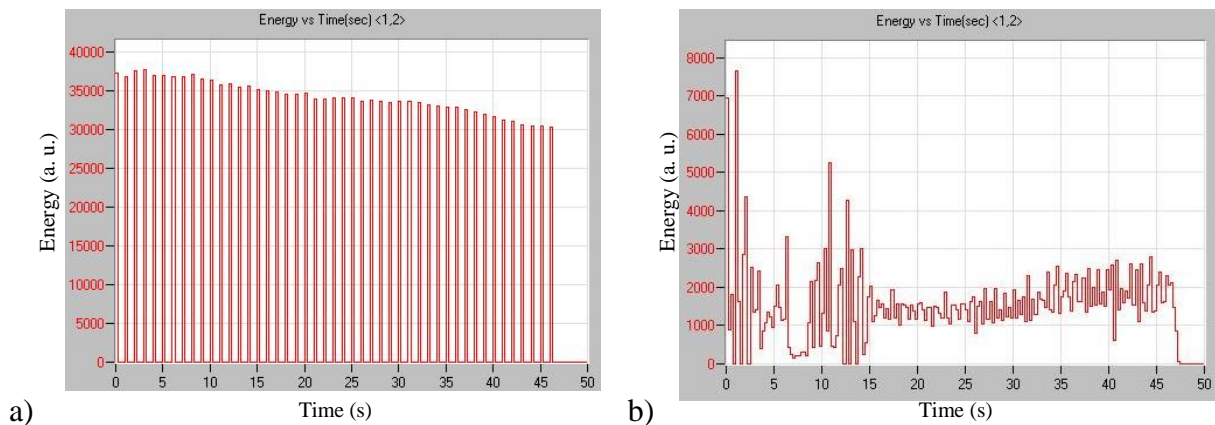
Sl.14. Izvođenje FSW sa mjerenjem AE signala



Sl.15. AE signali sa dva davača i njihova FFT transformacija



Sl.16. Wavelet analiza AE signala sa dva davača prilikom penetracije i izlaska pin-a



Sl.17. Energija distribucije AE signala: a) sholuder-a, b) pin-a



## 7. ODREĐIVANJE STRUKTURE PRESJEKA SPOJA

### 7.1. Izrada priprema za ispitivanje mikrostrukture

Za izradu priprema za ispitivanje mikrostrukture najprije se isijeku uzorci iz objekta čija se mikrostruktura želi ispitati. U ovom slučaju to je zavareni spoj Friction Stir Welding (FSW) postupkom. Uzorak koji predstavlja zavareni spoj FSW postupkom je dat na Sl.18. Na Sl.19. dat je uzorak iz koga su isiječeni uzorci za ispitivanje mikrostrukture. Uzorci su isječeni na tračnoj testeru po principu rezanja stakla. Na WaterJet uređaju moguće je isjeći uzorke potrebne veličine i oblika. To mogu biti i uzorci krivolinijske konture, npr. oblika epruvete za ispitivanje istezanjem.



Sl.18. Uzorak zavaren FSW postupkom





SI.19. Uzorak iz koga su isječeni uzorci za ispitivanje mikrostrukture

Isječeni uzorci se fino rasporede unutar okruglog kalupa izradjenog od plasticne mase (teflon) odgovarajuće veličine. Zatim se u plastičnu čašu uspe potrebna količina smole, koja služi za zatapanje uzoraka (reiser, SI.20.). Smola je vrlo gusta, a da bi postala tečna stavi se u mikrotalasnu peć i drži 5-10 sec. Nakon toga smola je dovoljno tečna da se uzorci mogu dobro zaliti. Smoli se dodaje očvršćivač (hardener, SI.21. ), u razmjeri 10:1. Količina se izmjeri menzutom. Smješa se dobro promiješa i pažljivo se zaliju uzorci.

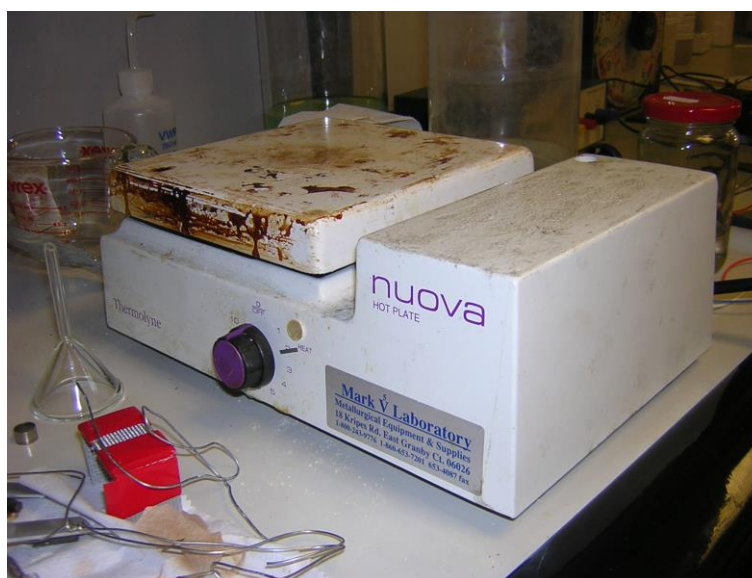


SI.20. Resin - smola za zalivanje uzoraka



Sl.21. Hardener - očvršćivač

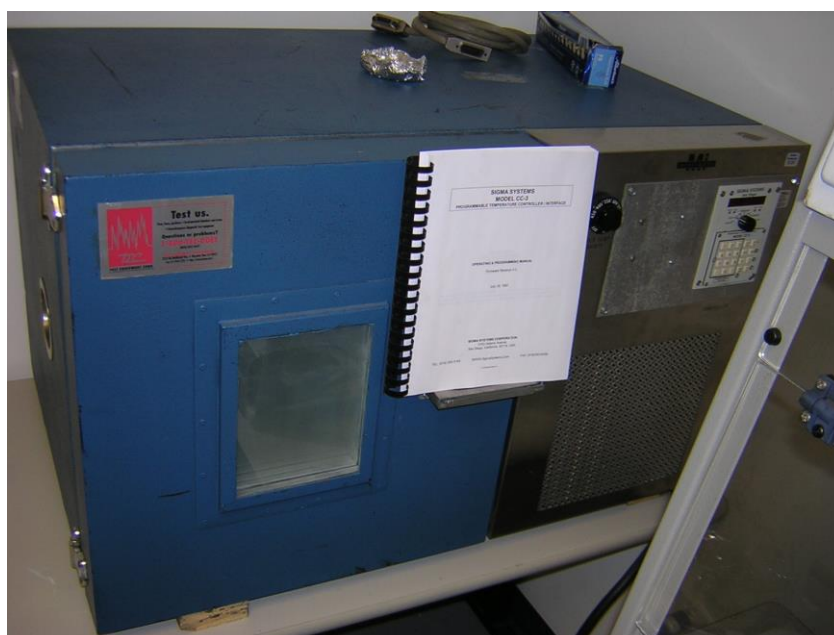
Kalup sa zalivenim uzorcima je pogodno postaviti na pokretnu ravnu ploču, npr. od aluminijuma. Može se staviti na uređaj za zagrijavanje (Sl.22.) u kabinetu za pripremu hemikalija (Sl.23.). Uređaj se podese na 60 °C. Ovo je korisno da se istisnu mjehurići vazduha. Nakon toga se ostavlja da očvršćava. Može se obrađivati nakon 8 sati. Pored toga, može se staviti u uređaj za kontrolisanje mikroklimatskih uslova SIGMA SYSTEMS (Sl.24. i Sl.25.). Temperatura se podese na 70 °C i drži se oko 1 sat i nakon toga, uzorak je spreman za dalju obradu.



Sl.22. Uređaj za zagrijavanje u kabinetu za pripremu hemikalija



SI.23. Kabinet za pripremu hemikalija



SI.24. Uređaj za kontrolisanje mikroklimatskih uslova SIGMA SYSTEMS





Sl.25. Kontroler uređaja SIGMA SYSTEMS

## 7.2. Metalografsko poliranje

Dalja obrada se sastoji od brušenja i poliranja do metalnog sjaja, kao priprema za hemijsko nagrizanje. Brušenje i poliranje se vrše na metalografskom uređaju za poliranje (Sl.26.). Najprije se vrši vodeno brušenje strane uzorka koja se želi ispitivati, vodobrusnim papirom granulacije 240. Uzorak se naizmjenično okreće pod uglom od  $90^\circ$  u odnosu na pravac okretanja papira, kako bi se smanjila hrpaost površine. Nakon vodobrusnog papira granulacije 240 vrši se brušenje sa papirima finoće 400, 600 i 1000. Fino poliranje do postizanja efekta ogledala, postiže se poliranjem sa platnom uz koršćenje abraziva finoće  $1 \mu\text{m}$ , pa zatim  $0.3 \mu\text{m}$  i  $0.05 \mu\text{m}$  (Sl.27.). Nakon finog poliranja uzorak se ispere vodom i alkoholom i osuši fenom. Na opisani način dobija se uzorak spreman za hemijsku obradu i analizu mikrostrukture.



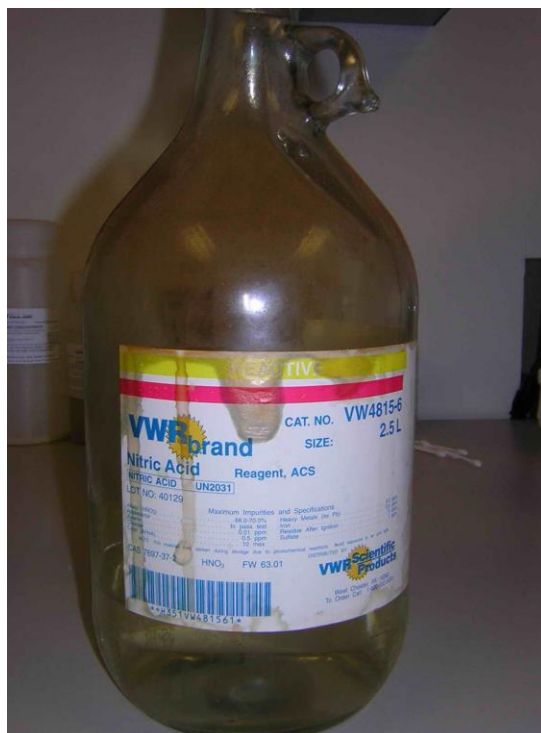
Sl.26. Metalografski uređaj za vodeno brušenje i fino poliranje



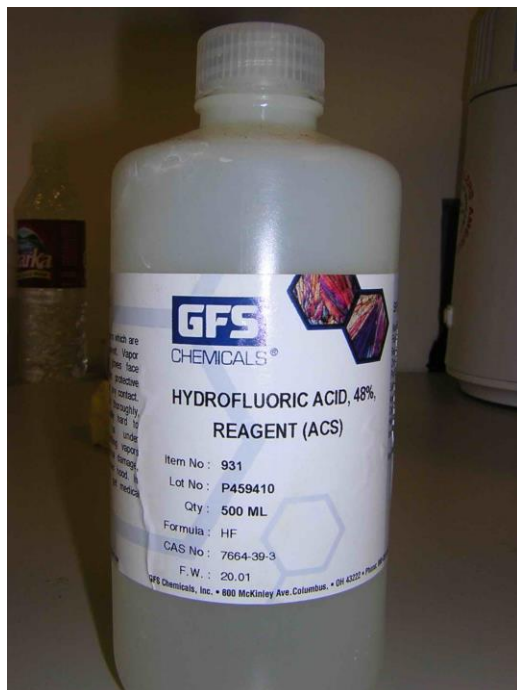
Sl.27. Abrazivi različite granulacije za fino poliranje

### 7.3. Hemijska obrada i snimanje slike mikrostrukture

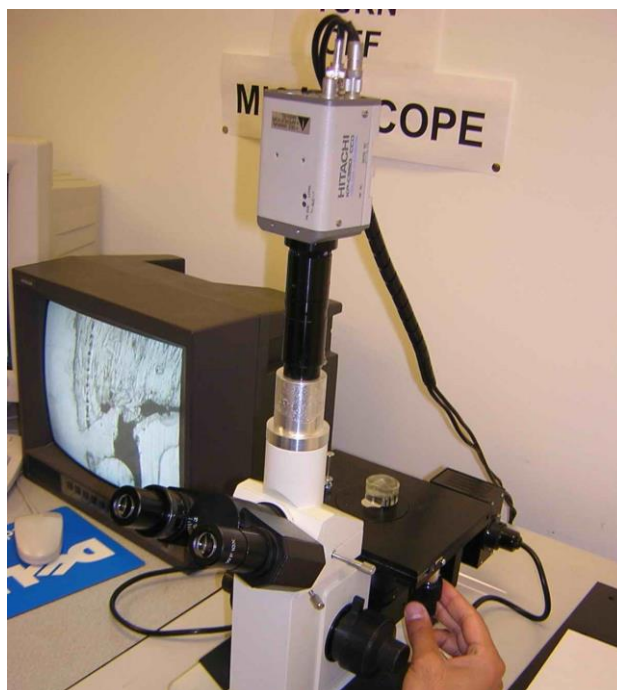
Hemijska obrada uzoraka od legura aluminijuma vrši se Kralovim reagensom. Reagens se priprema tako što se u menzuri izmjeri 60 ml azotne kiseline (Sl.28.) i lagano pomiješa sa 120 ml destilovane vode u odgovarajuću staklenu posudu. U plastičnu posudu se izmjeri 20 ml 48 procentnog rastvora fluorovodonične kiseline (Sl.29), doda prethodnoj smjesi i Kralov reagens je spreman za upotrebu.



Sl.28. Azotna kisjelina



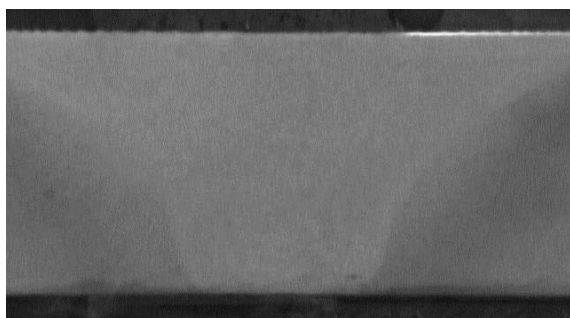
SI.29. 48% rastvor fluorovodonične kiseline



SI.30. Mikroskop uveličanja sa kamerom HITACHI za snimanje mikrostrukture

Dovoljna količina pripremljenog Kralov reagensa se uspe u odgovarajuću staklenu posudu i u nju se potopi polirana strana zatopljenih uzoraka u trajanju 15 s. Nakon toga se ispira vodom, pa alkoholom, osuši fenom i uzorak je spreman za mikrostrukturnu analizu.

Mikrostrukturna slika uzoraka se snima na mikroskopu opremljenom kamerom marke HITACHI (SI.30.). Pomoću kamere slika mikrostrukture uzorka se prenosi na ekran računara, može biti snimljena na hard disku. Snimljene slike uzoraka uzetih na mjestima 2 i 4 (SI.19.) date su na SI.31. Na slikama se jasno vide pojedine zone presjeka vara, kao i zaostalu šupljinu na mjestu 4 (SI.31.b).



a)



b)

SI.31. Snimak mikrostrukture presjeka: a) na mjestu 2, b) na mjestu 4

## 8. FEM MODELIRANJE FSW

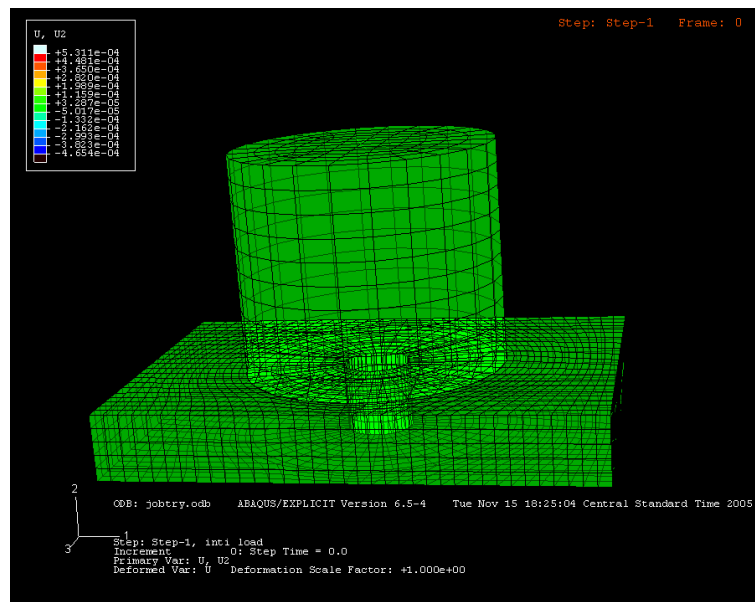
Modeliranje FSW procesa je od velikog značaja za ptimizaciju procesa, tj. izbor optimalnih dimenzija i geometrije alata i režima procesa. Najamoćniji metodi za modeliranje su numerički. Od numeričkih metoda najviše se koristi Finite Element Method (FEM). Međutim, kod modeliranja FSW postoje određene poteškoće. One se ogledaju u sledećem:

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

Zbog navedenih poteškoća, ne postoji softver koji u potpunosti modelira FSW i daje kompletne rezultate svih termičkih, deformacionih, naponskih i kinematskih parametara. Istraživanja treba da budu usmjerena u pravcu postizanja toga cilja.

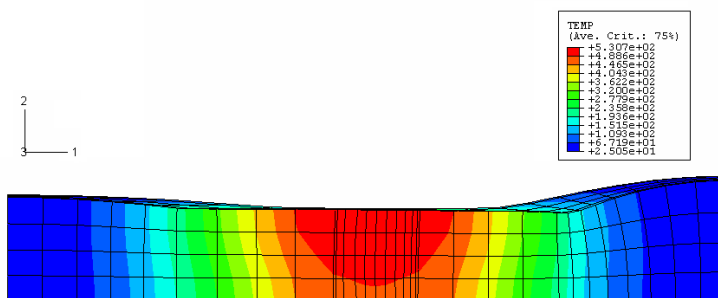
Od postojećih softvera za modeliranje FSW najviše se koriste ANSYS i ABAQUS. Ovi softveri se baziraju na Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulaciji FEM. Na Sl.31. do Sl.35. se daju primjeri rezultata FEM modeliranja dobijeni u ABAQUS-u i

ANSYS-u.

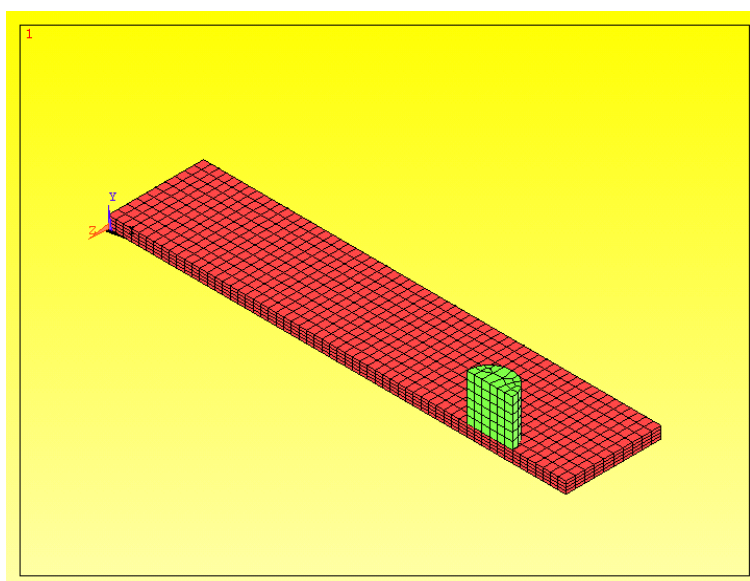


Sl.31. Mreža konačnih elemenata modela u ABAQUS-u

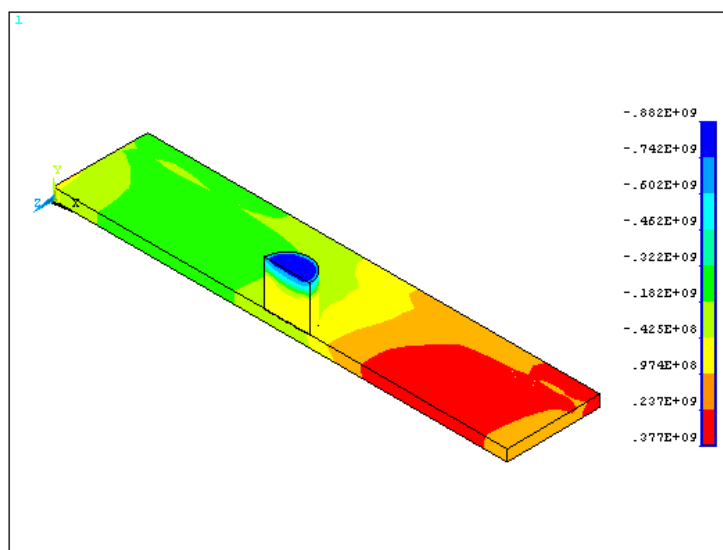




Sl.32. Dobyjena distribucija temperature u ABAQUS-u duz ravni spoja

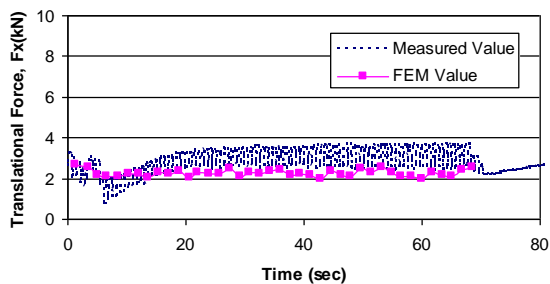


Sl.33. Mreža konačnih elemenata modela u ANSYS-u

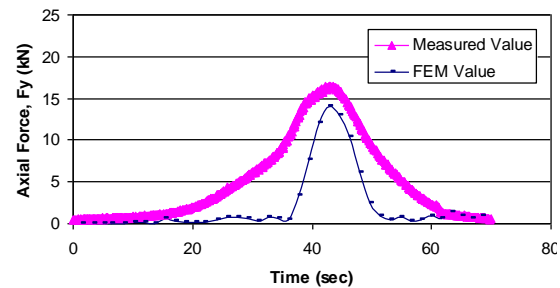


Sl.34. Distribucija maksimalnog glavnog napona dobijena u ANSYS-u

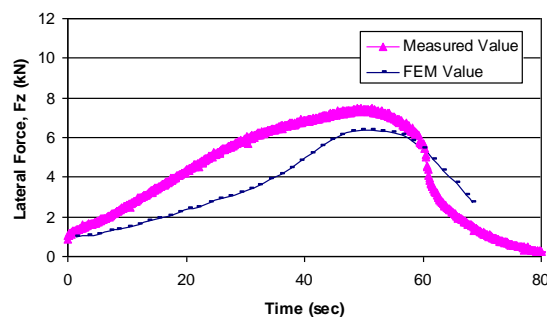




a)



b)



c)

Sl.35. Poređenje komponenta sila FSW dobijenih eksperimentalno i ANSYS simulacijom:

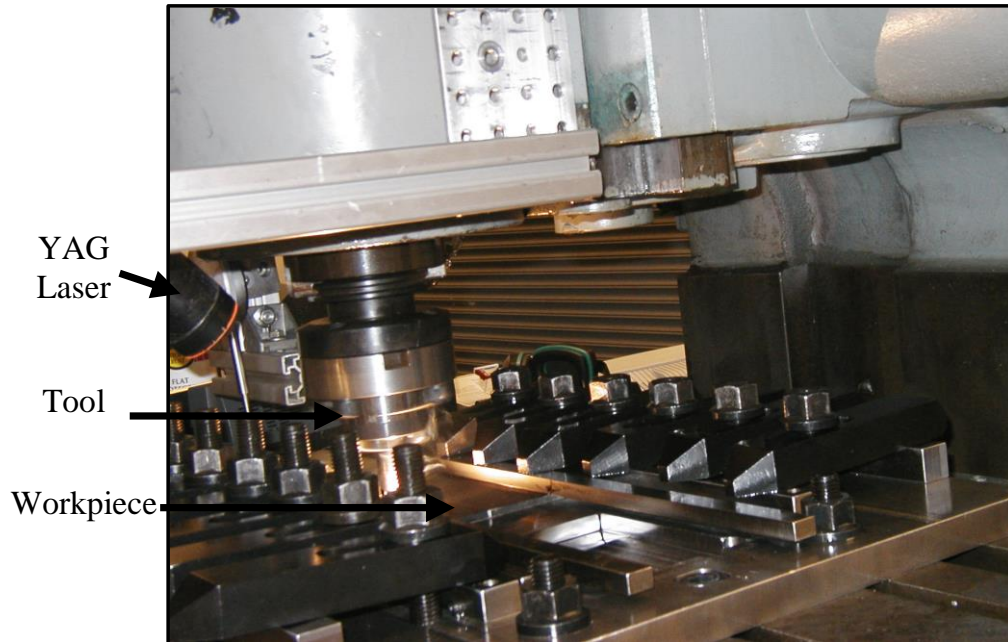
a) uzdužna, b) vertikalna, c) poprečna

## 9. LASER ASSISTED FSW

Kao što je već rečeno, procesom FSW se mogu međusobno zavarivati materijali veoma različitih mehaničkih i termičkih karakteristika. Npr. čelik i aluminijum, ili bakar i aluminijum. Kada je u pitanju velika razlika navedenih karakteristika, kao kod čelika i aluminijuma, primjenom FSW usled trenja može doći do topljenja mekšeg materijala, u ovom slučaju aluminijuma, prije nego što tvrdi (čelik) dođe u fazu tečenja. Da bi se spriječila ova pojava i unapredio proces FSW vrši se loaklno predgrijavanje čelika, neposredno prije prolaska alata. Ovo predgrijavanje se može izvesti na različite načine, a jedan od najpogodnijih načina je laserom. U tom slučaju u pitanju je Laser Assisted FSW. Na Sl.36. dat je prikaz FSW sa predgrijavanjem YAG laserom. Zavarivani su komadi dimenzija 200×50×6.4 mm od legure aluminijuma 6061-T6 i čelika AISI 1018. Zavareni komadi prikazani su na Sl.37.

Dobijene su veoma dobre mehaničke karakteristike vara. Epruveta napravljena na presjeku zavarenih komada, ispitivanjem na zatezanje prekinuta je na strani materijala sa

manjom zateznom čvrstoćom, u ovom slučaju legure aluminijuma (SI.38.). Činjenica da je mjesto spoja dva materijala ostalo neoštećeno, govori o visokom kvalitetu vara.



SI.36. Laser assisted FSW



SI.37. Zavareni komadi od čelika i legure aluminijuma



SI.38. Epruveta napravljena na presjeku zavarenih komada od čelika i legure aluminijuma

## 10. ZAKLJUČAK

Zavarivanje trenjem je veoma aktuelna tematika, što se ogleda publikovanjem velikog broja radova, u svim aspektima primjene ovog procesa. U Studiji slučaja su prezentirani svi aspekti FSW-a, od teorijskih osnova, opreme, mjerenja najbitnijih parametara, do ispitivanja, modeliranja i hibridnog FSW-a.

FSW je nova proizvodna tehnologija spajanja materijala i veoma interesantna za naučna istraživanja. Aktuelnost problematike potkrijepljena je informacijom AWS-e (American Welding Society) da, ako se 10% drugih postupaka zavarivanja zamijeni sa FSW-om, godišnja ušteda na nivou USA bi bila oko 4 milijarde dolara.

Kroz prikazanu studiju slučaja, pokazano je da istraživanja iz oblasti zavarivanja trenjem mogu biti veoma uspješno realizovana, što bi predstavljao hvatanje koraka sa savremenim trendovima institucija razvijenog dijela svijeta iz oblasti novih proizvodnih tehnologija.

## 11. LITERATURA

- [1] G. R. Bradley, M. N. James: Geometry and Microstructure of Metal Inert Gas and Friction Stir Welded Aluminium Alloy 5383-H321, 2000
- [2] C. M. Chen, R. Kovacevic: Finite element modeling of friction stir welding - thermal and thermomechanical analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43 (2003) 1319-1326
- [3] Vijay Soundararajan, Eswar Yarrapareddy, Radovan Kovačević: Investigation of the Friction Stir Welding of Aluminium Alloys AA 5182 and AA 6022. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003.
- [4] Guohong Luan, Yajun Wang, Enming Guo, Delun Guo: Friction Stir Welding Takes of from China FSW Center. China FSW Center, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, 2003, China
- [5] Changming Chen, Radovan Kovacevic, Dragana Jandrić: Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminium. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43 (2003) 1383-1390
- [6] C. M. Chen, R. Kovacevic: Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effect of fusion and solid state welding. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 (2004) 1205-1214
- [7] Research Center for Advanced Manufacturing - RCAM, Dallas, USA, 2006