

# Pomično zavarivanje trenjem

---

**Gorički, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:088984>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

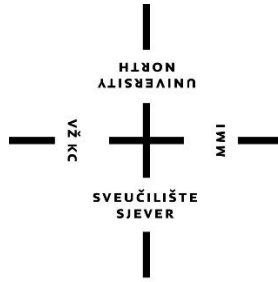
Završni rad br. 187/PS/2016

## **Pomično zavarivanje trenjem**

**Antonio Gorički, 5216/601**

Varaždin, srpanj 2016. godine





# Sveučilište Sjever

**Odjel za proizvodno strojarstvo**

**Završni rad br. 187/PS/2016**

## **Pomično zavarivanje trenjem**

**Student**

Antonio Gorički, 5216/601

**Mentor**

Ivan Samardžić, prof.dr.sc.

Varaždin, srpanj 2016. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Antonio Gorički	MATIČNI BROJ	5216/601
DATUM	24.06.2016.	KOLEGIJ	Tehnologija III
NASLOV RADA	Pomično zavarivanje trenjem		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Friction stir welding		
MENTOR	Ivan Samardžić	ZVANJE	red. prof. u trajnom zvanju
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. prof.dr.sc. Živko Kondić		
	2. prof.dr.sc. Ivan Samardžić		
	3. Marko Horvat, dipl.ing., predavač		
	4. _____		
	5. _____		

## Zadatak završnog rada

BROJ	187/PS/2016
OPIS	1. Uvod. Općenito o postupcima zavarivanja. 2. Postupci zavarivanja pritiskom. Opisati češće korištene postupke zavarivanja pritiskom. 3. Detaljniji opis pomičnog zavarivanja trenjem (friction stir welding postupak). Materijali pogodni za primjenu ovog postupka zavarivanja, oprema za zavarivanje, parametri zavarivanja, primjeri uspješne primjene ovog postupka zavarivanja u praksi. 4. Zaključak

ZADATAK URUČEN

07.07.2016.



*I. Samardžić*

Zahvala:

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Ivanu Samardžiću na svim savjetima tijekom izrade ovog rada. Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i Ivani na podršci tijekom studiranja. Zahvaljujem svim kolegama i djelatnicima sveučilišta na svakoj vrsti pomoći tijekom studija.

## **Sažetak**

U ovom radu se obrazlaže postupak pomičnog zavarivanja trenjem. Ovaj postupak spada u skupinu postupaka zavarivanja pritiskom. U uvodnom dijelu se govori općenito o zavarivanju i njegovoj klasifikaciji postupaka. Opisano je nekoliko postupaka zavarivanja pritiskom unutar kojih se svrstava i zavarivanje trenjem. U razradi završnog rada govori se o vrstama materijala koji su pogodni za pomično zavarivanje trenjem te je opisan sam postupak zavarivanja, alat potreban za zavarivanje trenjem. Opisan je, i slikama prikazan vanjski izgled zavara, ali i njegove mikrostrukturne karakteristike i utjecaj na osnovni materijal. Navedeni su tehnološki parametri zavarivanja kako bi se postigla željena svojstva zavara. Zatim su navedene prednosti i nedostaci samog postupka i nabrojane industrije u kojima primjenjuje.

**KLJUČNE RIJEČI:** zavarivanje trenjem, oblik alata, svojstva zavara

## Sadržaj:

1. Uvod .....	1
2. Podjela postupaka zavarivanja.....	2
3. Zavarivanje pritiskom.....	4
3.1. Podjela postupaka .....	4
3.1.1. Kovačko zavarivanje .....	4
3.1.2. Elektrootporno zavarivanje.....	5
3.1.3. Točkasto elektrootporno zavarivanje.....	6
3.1.4. Bradavičasto elektrootporno zavarivanje .....	6
3.1.5. Šavno elektrootporno zavarivanje .....	7
3.1.6. Sučeljeno elektrootporno zavarivanje .....	8
3.1.7. Elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem ili iskrenjem .....	8
3.1.8. Elektroindukcijsko zavarivanje .....	9
3.1.9. Eksplozijsko zavarivanje .....	10
3.1.10. Difuzijsko zavarivanje .....	11
3.1.11. Zavarivanje trenjem.....	11
3.1.12. Hladno zavarivanje pritiskom.....	12
4. Pomično zavarivanje trenjem .....	13
4.1. Materijali pogodni za zavarivanjem postupkom FSW .....	14
4.2. Princip postupka .....	14
4.2.1. Osnovni parametri postupka.....	15
4.2.2. Broj okretaja i translacijska brzina alata.....	16
4.2.3. Sile zavarivanja.....	16
4.2.4. Kut nagiba i dubina penetracije čela alata .....	17
4.3. Alat za zavarivanje .....	19
4.3.1. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW.....	20
4.3.2. Oblik čela alata za zavarivanje .....	21
4.3.3. Oblik trna alata kod FSW zavarivanja.....	23
4.2. Karakteristike zavara .....	25
4.2.1. Mikrostrukturne promjene .....	25
4.2.2. Tvrdoća zavara .....	27
4.2.3. Čvrstoća i zamor materijala.....	28
4.2.3. Vanjski izgled spoja.....	29
4.2.4. Vrste spojeva .....	30
4.4. Prednosti postupka.....	31
4.5. Nedostaci postupka.....	33
4.6. Primjena.....	33



5. Zaključak .....	36
Popis slika.....	39
Popis tablica.....	40

# 1. Uvod

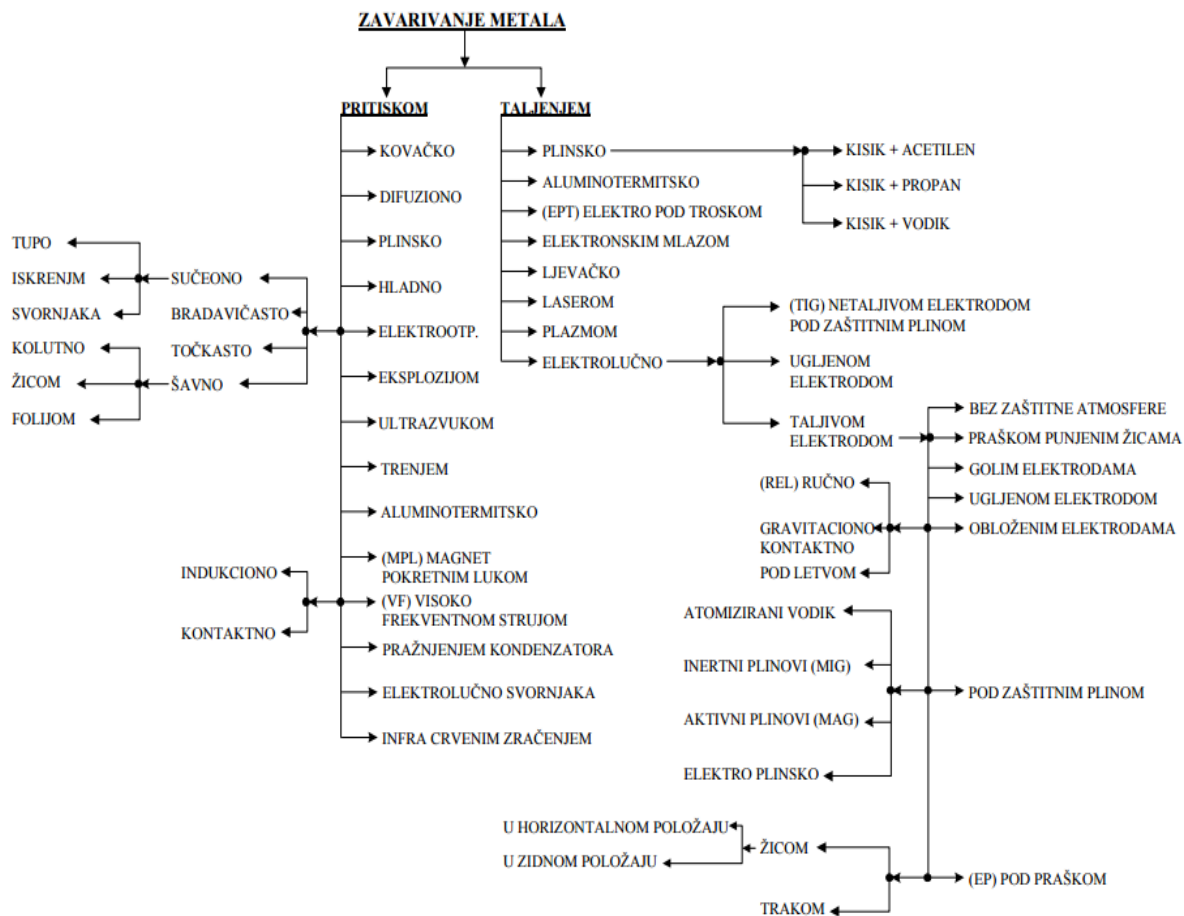
Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen i čvrsti spoj. Ono ima neograničeno područje primjene u proizvodnji metalnih proizvoda u strojarskoj, zrakoplovnoj, automobilskoj, građevinskoj i energetske industriji. Postupak zavarivanja je postao najekonomičniji način spajanja metala. Prema načinu spajanja postupci zavarivanja se dijele u dvije velike grupe. Prva grupa je zavarivanje taljenjem kod kojeg se zavaruju materijali u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega. Druga grupa je zavarivanje pritiskom kod kojeg se zavarivanje materijala vrši u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja pomoću pritiska ili udarca, bez dodavanja dodatnog materijala.

Za razumijevanje i korištenje ove tehnologije nužna su znanja sa područja:

- znanosti o materijalima i metalurgije (metalurgija zavarivanja),
- termodinamike (temperaturna polja pri zavarivanju),
- elektrotehnike (izvori struje, električni luk, spajanje različitih senzori – U, I, zvuk, svjetlost,...),
- kemije (metalurški i drugi procesi koji se odvijaju pri zavarivanju),
- informatike (ekspertni sustavi, različiti proračuni, baze podataka, ...) i dr.

## 2. Podjela postupaka zavarivanja

Postupci zavarivanja se dijele na postupke zavarivanja trenjem i postupke zavarivanja taljenjem kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1 Klasifikacija postupka zavarivanja [1]

Oni se klasificiraju i prema energiji za zavarivanje kao što je prikazano na slici 2.

KEMIJSKA	Gorivo u čvrstom stanju	Kovačka vatra		Kovačko
		Eksploziv		Eksplozijom
	Gorivo u plinovitom stanju	Egzotermna termitna reakcija		Aluminotermijsko (taljenjem i pritiskom)
Izgaranje gorivog plina (napr. acetilen)		Plinsk zavarivanje (taljenjem i pritiskom)		
ELEKTRIČNA	Istosmjerna (Direct Current - DC) ili izmjenična (Alternating Current - AC) električna struja	Električni luk		REL, EPP, TIG, MIG, MAG, gravitacijsko, kontaktno, EHV, Elektroplynsko, Circomatic, Elektrolučno zavarivanje svornjaka, Zavarivanje MP, ...
		Električni otpor (Joule-ova toplina)	Rastaljenog materijala	Zavarivanje pod troskom
			Čvrstog materijala	Elektrootporno: točkasto, šavno (kolutno), bradavičasto, tupo, iskrenjem Visokofrekventno: indukcijisko, kontaktno
		Elektronskim mlazom (snopom) u vakuumu ili djelomičnom vakuumu		Zavarivanjeelektronskim mlazom (snopom)
		Svjetlosne zrake		Zavarivanje laserom (krutim, plinovitim)
MEHANIČKA	Mehanički rad kao posljedica djelovanja sile na određenu površinu, trenje, vibracije	Unutrašnje trenje		Kovačko, hladno, difuzijsko
		Površinsko trenje		Zavarivanje trenjem
		Mehaničke vibracije		Zavarivanje ultrazvukom (točkasto, šavno ili kolutno)
OSTALE	Solarna	Sunčeva svjetlost		Postupci u razvoju
	Elektromagnetsko zračenje	Zračenje energije volframskog vlakna u inertnom plinu		
	Zračenje	Halogeno kvarne lampe		

Slika 2 Klasifikacija zavarivanja prema potrebnoj energiji [2]

### **3. Zavarivanje pritiskom**

Zavarivanje pritiskom je spajanje metalnih dijelova pritiskom, bez ili uz lokalno ograničeno zagrijavanje, uglavnom bez korištenja dodatnog materijala.

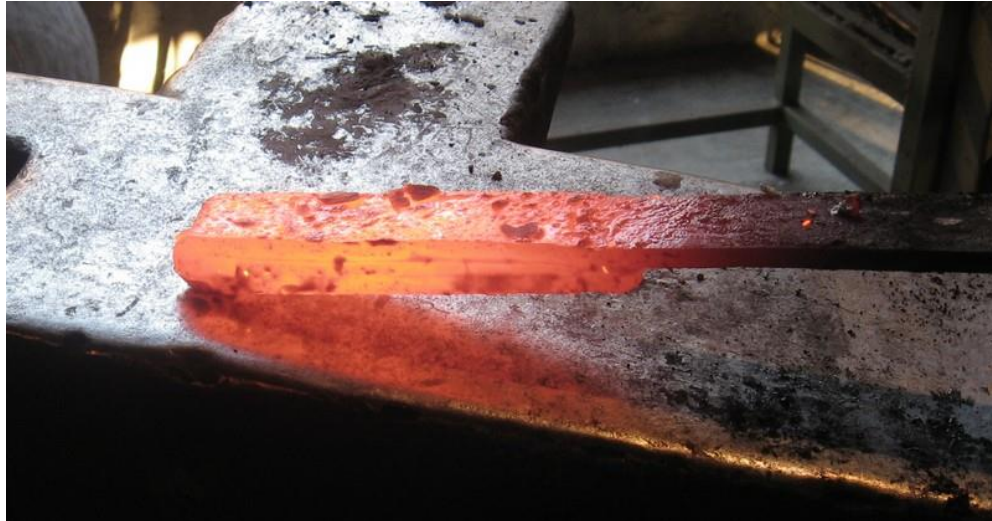
#### **3.1. Podjela postupaka**

Postupci zavarivanja pritiskom se dijele na:

- kovačko zavarivanje,
- elektrootporno zavarivanje,
- točkasto elektrootporno zavarivanje,
- bradavičasto elektrootporno zavarivanje,
- šavno elektrootporno zavarivanje,
- sučeljeno vodootporno zavarivanje,
- elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem ili iskrenjem,
- elektroindukcijsko zavarivanje,
- eksplozijsko zavarivanje,
- difuzijsko zavarivanje,
- zavarivanje trenjem,
- hladno zavarivanje pritiskom
- te na druge manje poznate postupke.

##### **3.1.1. Kovačko zavarivanje**

Kovačko zavarivanje je najstarija vrsta zavarivanja metala, kada se krajevi dva dijela koje želimo zavariti (spojiti) zagriju u kovačkoj vatri do bijelog usijanja (slika 3) i ako je potrebno pospu određenim prahom (pijeskom) za "čišćenje". Udarcima čekića po spoju istiskuju se s dodirnih površina rastaljeni oksidi ili troska, te se sučeljavaju čiste metalne površine kada počinju djelovati međuatomske sile dvaju dijelova i dolazi do čvrstog zavarenog spoja. [3]



*Slika 3 Kovačko zavarivanje [4]*

### **3.1.2. Elektrootporno zavarivanje**

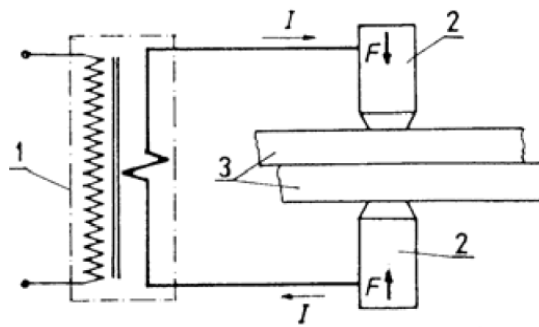
Elektrootporno zavarivanje (engl. Electric Resistance Welding – ERW) je način zavarivanja električnom energijom gdje se uvijek koristi pritisak i toplina, koja nastaje zbog velikog električnog otpora na mjestu dodira zavarivanih dijelova. To je tzv. Jouleova toplina, za koju vrijedi jednačina:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ (J)}$$

gdje je: I – jakost električne struje zavarivanja, R – električni otpor na mjestu dodira zavarivanih dijelova, t – trajanje zavarivanja. Koristi se uglavnom izmjenična struja niskog napona, vrlo velike jakosti i kratkog trajanja. Samo pri sučeljenom elektrootpornom zavarivanju dolazi do zavara u čvrstom stanju, bez rastaljivanja, dok pri svim drugim načinima elektrootpornog zavarivanja dolazi i do taljenja metala. Prednost ovog postupka da je čist, brz i bez dodatnog materijala. Koristi se naročito u industriji vozila (automobili, bicikli, motocikli, zrakoplovi, tračnička vozila, nuklearna i ratna tehnika), vojnoj industriji, građevinarstvu, prehrambenoj industriji, industriji bijele tehnike i drugo. Spajaju se tanki limovi do najviše 6 mm. Pogodan je za proces masovne proizvodnje, uz mogućnost jednostavnog automatiziranja. [3]

### 3.1.3. Točkasto elektrootporno zavarivanje

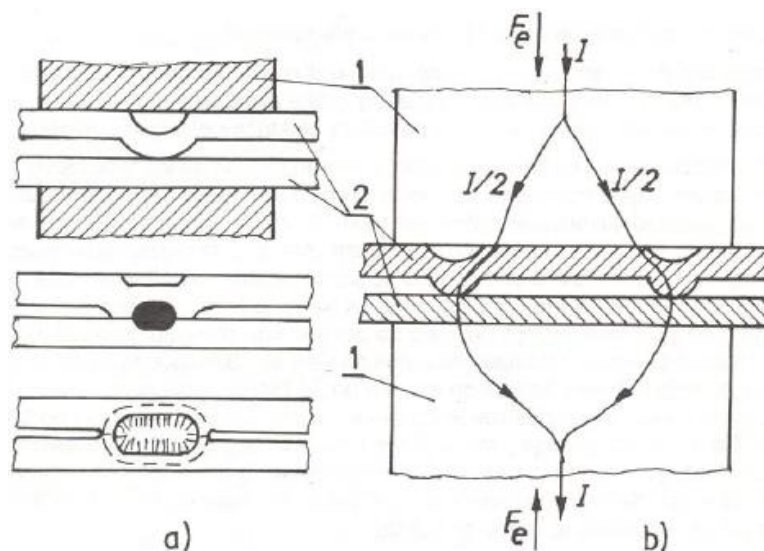
Točkasto elektrootporno zavarivanje je preklopno zavarivanje taljenjem dvaju dijelova stegnutih između dviju elektroda, kroz koje se dovodi električna struja (slika 4). Na dodirnom se mjestu obaju dijelova koji se zavaruju stvara Jouleova toplina, koja rastali materijal i talina se izmiješa. Nastali zavar ima oblik točke, a presjek mu je u obliku leće. Koristi se za izradu strojeva i aparata, u elektrotehnici, zrakoplovnoj industriji (u putničkom je zrakoplovu oko milijun elektrootporno zavarenih točaka), automobilskoj industriji (u automobilu je preko 15 000 elektrootporno zavarenih točaka), nuklearnoj, raketnoj i svemirskoj tehnici. [5]



Slika 4 Shema točkastog elektrootpornog zavarivanja [6]

### 3.1.4. Bradavičasto elektrootporno zavarivanje

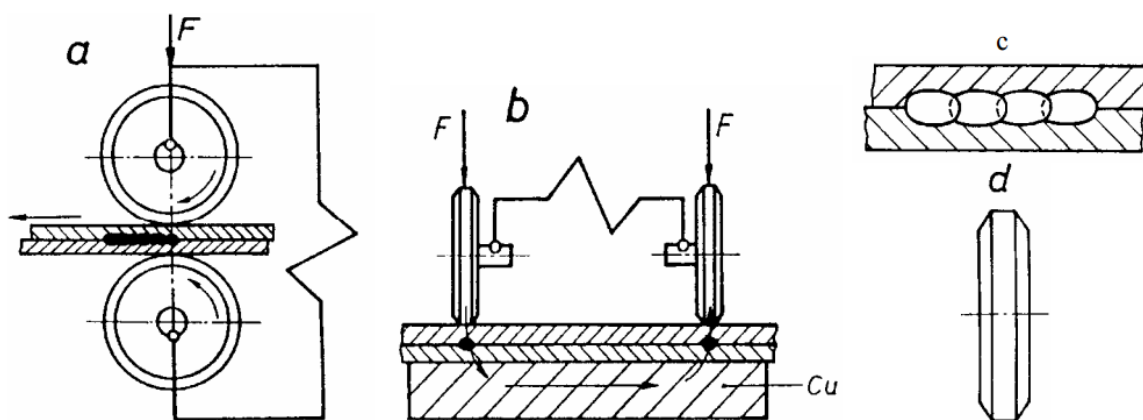
Bradavičasto elektrootporno zavarivanje istodobno je jedno ili višetočkasto zavarivanje dvaju dijelova na mjestima gdje su načinjene izbočine (“bradavice”), koje pritišću na drugi zavarivani dio i preko kojih proteče električna struja zavarivanja. Kada poteče električna struja zavarivanja, izbočina se slegne. Na tom se mjestu materijal rastali, te nastane točkasti zavar, kao i pri točkastom elektrootpornom zavarivanju (slika 5). Koristi se u strojogradnji za privarivanje vijaka i matica, čepova, kutnika, te u industriji igračaka, bijele tehnike (gdje je zavarivanje u velikim serijama). [5]



Slika 5 Shema bradavičastog zavarivanja [6]

### 3.1.5. Šavno elektrootporno zavarivanje

Šavno elektrootporno zavarivanje je preklopno (postoji i sučeljeno) zavarivanje dvaju dijelova pomoću elektroda u obliku koluta (diska), koji zavarivane dijelove pritišću s obje strane i istovremeno se pomiču, dok preko njih na mjestu dodira, neprekidno ili u prekidima, protječe električna struja zavarivanja (slika 6). Nastali zavareni spoj je neprekidan niz preklopnih točkastih zavara (vodonepropusni zavar) ili niz međusobno razmaknutih točkastih zavara (isprekidano zavarivanje). Koristi se za privarivanje ojačanja spremnika goriva ili njihovo zavarivanje, zavarivanje karoserija automobila, vagona, cijevi, posuda, bubnjeva strojeva za pranje, radijatora i slično. [5]

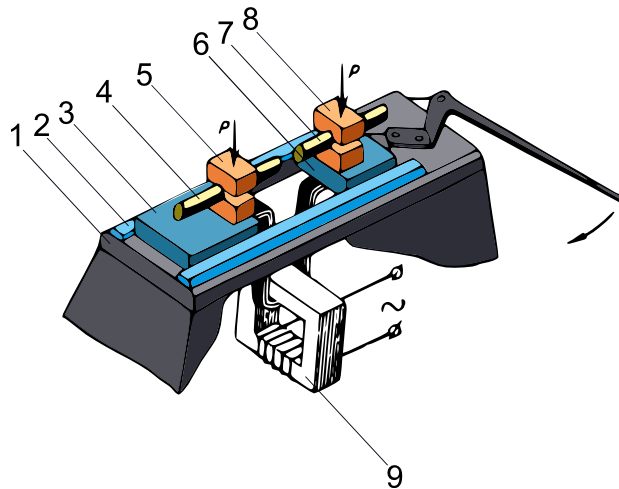


Slika 6 Šavno elektrootporno zavarivanje [6]



### 3.1.6. Sučeljeno elektrootporno zavarivanje

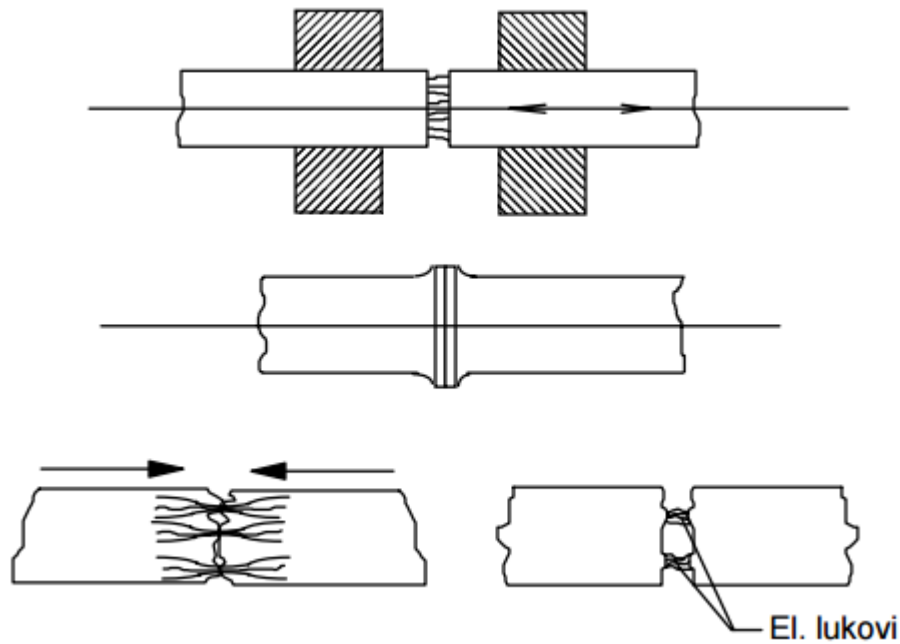
Sučeljeno vodootporno zavarivanje je vrsta elektrootpornog zavarivanja bez taljenja, pri čemu dijelovi koji se zavaruju imaju oblik štapa (različitog oblika i presjeka) ili traka. Zavarivani dijelovi u sučeljenom položaju pritisnu se silom, tako da na dodirnom mjestu nastane tlak, a ujedno se kroz njih određeno vrijeme propušta električna struja zavarivanja određene jakosti (slika 7). Zbog nastale Jouleove topline i tlaka nastane zadebljani zavareni spoj (deformacija zavarenog mjesta). Koristi se za zavarivanje žice, karika lanca, cijevi i drugo. [8]



Slika 7 Sučeljeno elektrootporno zavarivanje [8]

### 3.1.7. Elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem ili iskrenjem

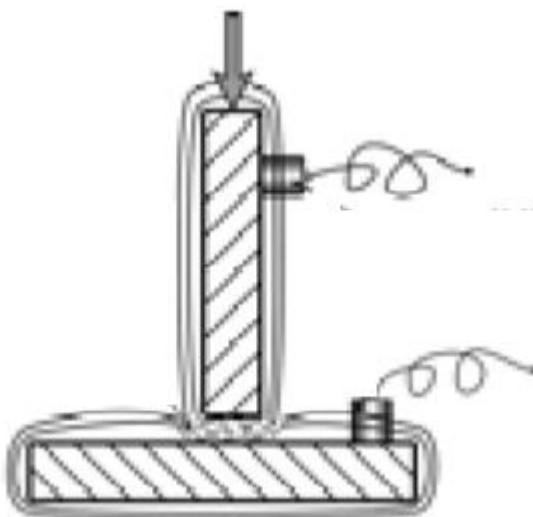
Elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem (iskrenjem) je vrsta elektrootpornog zavarivanja gdje je jedan korak postupka zavarivanja tzv. ogorijevanje (rastaljivanje površina električnom strujom kratkog spoja blagim dodirnom, tj. bez pritiska), kako bi se očistile i izravnale površine. Nakon toga, uz povećanje pritiska na zavarivane dijelove (čime se istisne talina) i pojačanje električne struje zavarivanja, slijedi zavarivanje obaju dijelova u krutom stanju, kao pri sučeljnem elektrootpornom zavarivanju (slika 8). Deformacija na zavarenom mjestu znatno je veća i posebnog je oblika (varni greben). Takvim zavarivanjem mogu se zavariti dijelovi različitih materijala, čelika s većim udjelom ugljika i visokolegiranog čelika, te drugi materijali osjetljivi na temperaturni ciklus. Koristi se za zavarivanje tračnica, pogonskih osovina, betonskog željeza, teških strojnih dijelova, u valjaonicama i drugo. [6]



Slika 8 Elektrootporno zavarivanje iskrenjem [6]

### 3.1.8. Elektroindukcijsko zavarivanje

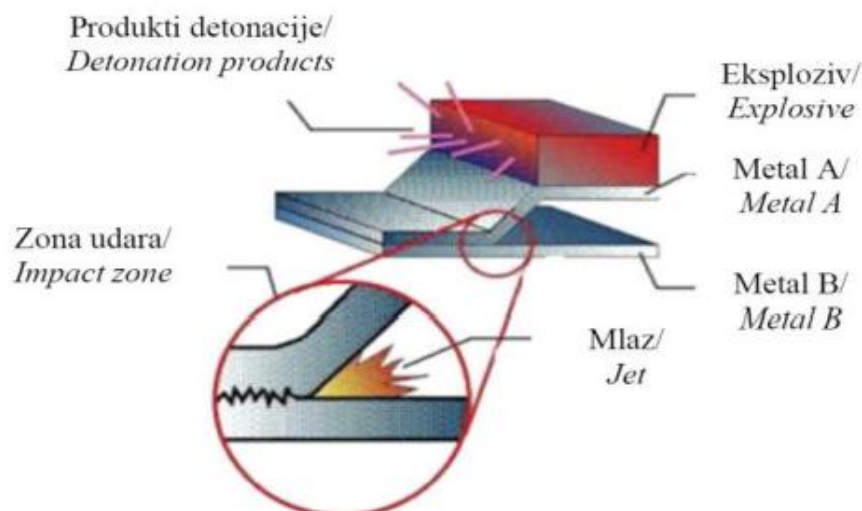
Indukcijsko elektrootporno zavarivanje je vrsta elektrootpornog zavarivanja gdje se mjesto zavora zagrijava visokofrekventnim induciranim strujama kratkog spoja, što ih u zavarivanim dijelovima inducira izmjenično magnetsko polje induksijske zavojnice (induktora). Zavarivanje se postiže pritiskom ili bez njega (slika 9). Brzina je od 6 do 300 m/min, a debljina metala od 0,1 do 12 mm. Visokofrekventna struja stvara jako magnetsko polje, a teče putem najniže inuktivnosti. Najgušći tok magnetskih silnica je na mjestu najmanje zračnosti, gdje je i zagrijavanje najveće. Uslijed zagrijavanja dolazi do lokalnog taljenja i omekšanja, te uz djelovanje pritiska do trenutnog spajanja. Primjenjuje se za izradu konstrukcijskih profila, šavnih cijevi, pločastih izmjenjivača topline i drugo. Šavne cijevi se tim postupkom izrađuju iz trake neograničene duljine, namotane na kolut. [3]



*Slika 9 Elektroindukcijsko zavarivanje [7]*

### **3.1.9. Eksplozijsko zavarivanje**

Eksplozijsko zavarivanje je spajanje metala pritiskom u hladnom stanju, koji koristi udarni val eksplozije, brzine (do 6 500 m/s) veće od brzine zvuka i izuzetno velike energije te tlaka i do 100 000 bara, tako da se materijal rastali i dijelovi zavare u spoj. Naglim širenjem eksplozijskog vala izbacuje se površinski sloj oksida i nečistoća s priležećih ploha (slika 10). Sam postupak zavarivanja je kratkotrajan, ali je potrebna nešto duža priprema. Pogodan je za zavarivanje u teško pristupačnim prostorima i neprikladnim uvjetima, primjerice pod površinom vode. Najčešće se koristi za spajanje čelika, aluminija, bakra, titana, cinka, raznorodnih metala i drugih. Koristi se za zavarivanje cijevi, cijevi s prirubnicama, za platiniranje (oblaganje) čelika i drugih metala i drugo. Postupak je primjenjiv za zavarivanje vrlo malih dijelova, kao i za proizvodnju dvoslojnih limova mase do 10 tona. Česta primjena je kod proizvodnje tzv. bimetalnih gredica za brodske konstrukcije. [9]



Slika 10 Eksplozijsko zavarivanje [9]

### 3.1.10. Difuzijsko zavarivanje

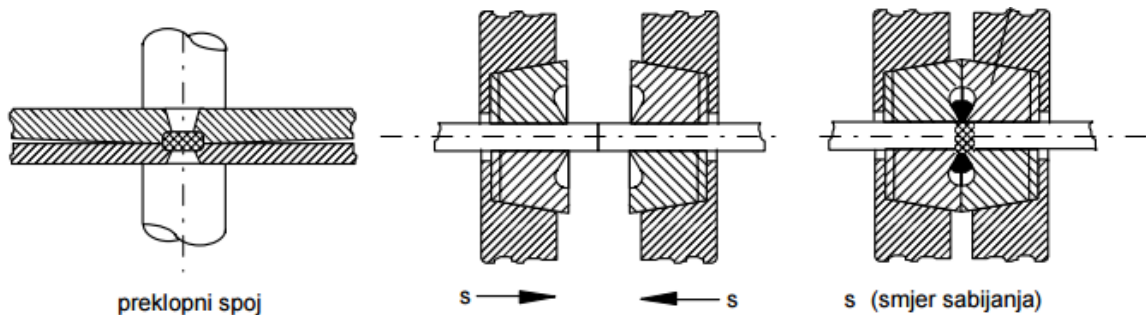
Difuzijsko zavarivanje je način zavarivanja veoma slabim pritiskom i tlakom, pri temperaturi na mjestu zavarivanja povišenoj iznad temperature kristalizacije, jednostranom ili izmjenjivom difuzijom površinskih atoma na maloj udaljenosti. Obavlja se u vakuumu, ali i u zaštitnim plinovima i solnim kupkama. Difuzijsko zavarivanje se koristi za zavarivanje obloga kočnica, u elektrotehnici, fluidnoj tehnici, vakuumskoj i raketnoj tehnici. Moguće je međusobno zavarivati metale i nemetale. Svojevrsne su vrlo male deformacije i velika točnost zavarivanja do oko  $\pm 0,01$  mm, uz istovremeno zavarivanje svih zavarnih mjesta. [10]

### 3.1.11. Zavarivanje trenjem

Zavarivanje trenjem je vrsta zavarivanja pritiskom, gdje se dijelovi između dodirnih površina zagrijavaju toplinom trenja nastalom vrtnjom jednog ili obaju dijelova koji se zavaruju, nakon čega slijedi zavarivanje povećanim pritiskom na dijelove, uz istovremenu obustavu vrtnje. Zavari su rotacijski simetrični. Postoji više načina zavarivanja trenjem. Mogu se zavarivati metali i njihove legure, ali i tvrdi polimeri. Moguće je međusobno zavarivanje raznovrsnih metalnih materijala. Zavarivanje trenjem se koristi u automobilskoj industriji za zavarivanje ventila, čepova, svrdala, tlačnih posuda, pogonskih vratila, alata i drugo. Prednost je ovog postupka zavarivanja da je zona utjecaja topline vrlo uska. Ova vrsta zavarivanja je tema završnog rada, te će detaljnije biti opisana u sljedećim poglavljima.

### 3.1.12. Hladno zavarivanje pritiskom

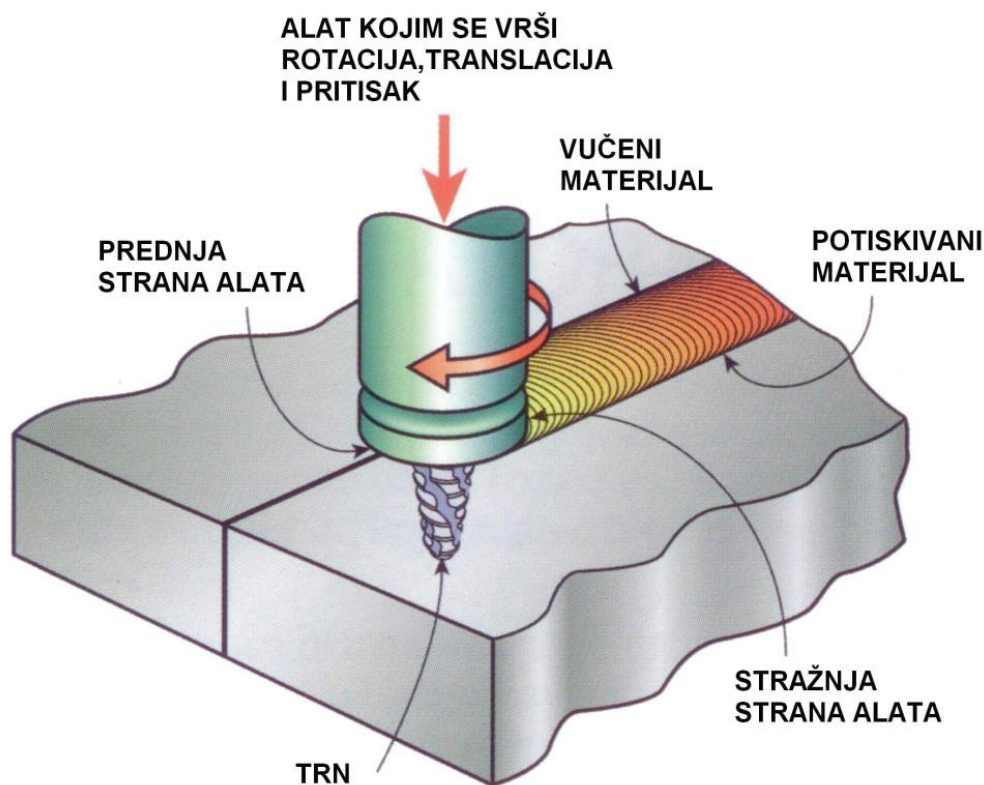
Hladno zavarivanje pritiskom je postupak zavarivanja na sobnoj temperaturi samo mehaničkom energijom ili pritiskivanjem obaju dijelova koji se zavaruju, jednog prema drugom (slika 11). Izvodi se većinom bez dodatnog materijala. Plastičnom deformacijom i kristalizacijom na mjestu zavarenog spoja nastaje metalni spoj (zavar). Deformacije iznose i do 200% pri sučeljnem zavarivanju pritiskom, a pri preklopnom točkastom i kolutnom (disk) zavarivanju pritiskom do 90%. Za ovaj postupak najprikladniji su mekši materijali kao što su aluminij, nikal, titanij, meki čelik i drugi. Legure tih metala su teže hladno zavarive pritiskom. Hladno zavarivanje pritiskom se koristi za zavarivanje električnih vodiča (npr. bakar s aluminijem), kućišta poluvodiča, cijevi, posuda i drugo. [6]



Slika 11 Hladno zavarivanje pritiskom [6]

## 4. Pomično zavarivanje trenjem

Pomično zavarivanje trenjem (engl. FSW – Friction Stir Welding) je jednostavan, čist i inovativan postupak zavarivanja. Nastao je 1991. godine na institutu „The Welding Institute“ u Velikoj Britaniji kao rezultat istraživanja vršenih u cilju pronalaženja novih rješenja pri zavarivanju aluminijskih legura. Tim postupkom su se željeli izbjeći problemi koji se javljaju kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja (lokalno zagrijavanje materijala preko točke taljenja, pri čemu se u značajno mjeri smanjuju mehanička svojstva materijala). Obzirom na čvrstoću ostvarenog spoja omogućuje znatno smanjenje mase konstrukcija u odnosu na druge konvencionalne postupke zavarivanja. Postupak koristi rotirajući cilindrični alat koji ima trn promjera od 5 do 6 mm i visinu od 5 do 6 mm. Alat se postavlja pod kutom na smjer zavarivanja. Pritiskanjem rotirajućeg alata u sredinu pripremljenog šava razvija se toplina uslijed nastajanja trenja (slika 12). [11]



Slika 12 Shema zavarivanja FSW [12]

## 4.1. Materijali pogodni za zavarivanjem postupkom FSW

Postupkom FSW mogu se zavarivati:

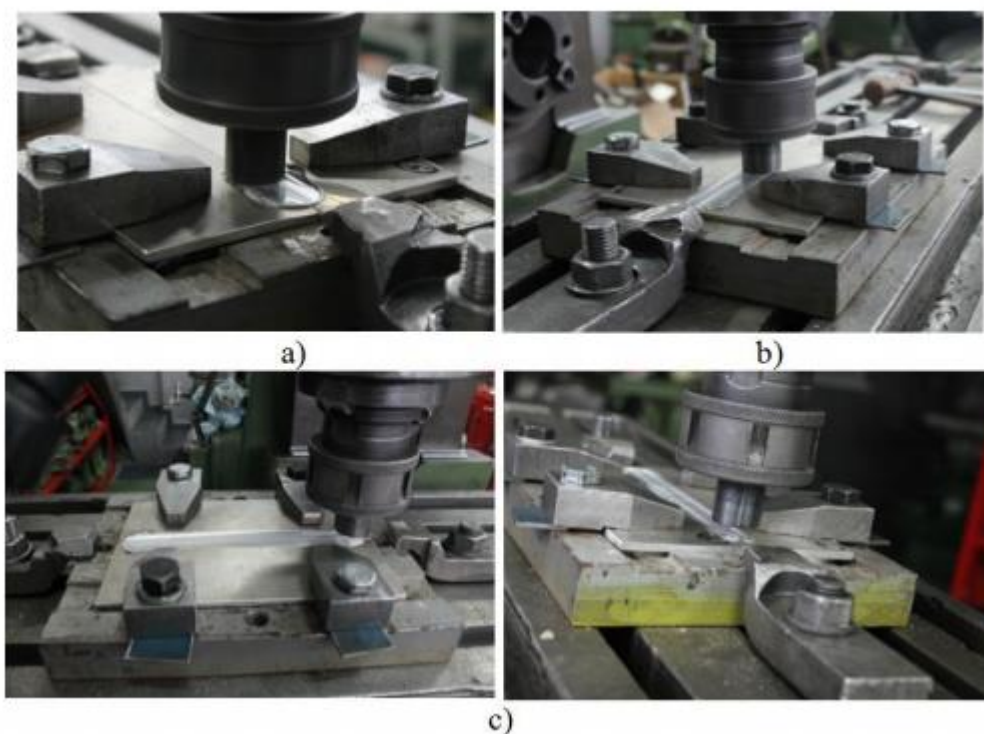
- aluminij i njegove legure:
  - serija 1XXX (komercijalno čist aluminijum)
  - serija 2XXX (Al-Cu)
  - serija 3XXX (Al-Mn)
  - serija 4XXX (Al-Si)
  - serija 5XXX (Al-Mg)
  - serija 6XXX (Al-Mg-Si)
  - serija 7XXX (Al-Zn)
  - serija 8XXX (Al-Li)
- Bakar i njegove legure
- Olovo
- Titan i njegove legure
- Legure magnezija
- Cink
- Plastika
- Niskougljenični čelici
- Austenit, martenzit, dupleks čelici
- Legure nikla. [13]

## 4.2. Princip postupka

U prvoj fazi postupka kod kontakta između rotirajućeg trna alata i površine osnovnog materijala nastaje toplina koja uzrokuje omekšavanje materijala i plastično deformiranje u cilindričnom području oko trna. Sve većim ulaskom trna u materijal povećava se količina omekšanog područja sve do maksimalne dubine penetracije, odnosno do kontakta cilindričnog tijela alata s gornjom površinom materijala. Širina omekšanog područja najveća je na mjestu kontakta tijela alata i limova koji se zavaruju i sužava se sve do vrha trna alata. Uobičajeno je zadržavanje pomicanja alata, uz konstantnu rotaciju, nakon ulaska trna, kako bi se trenjem postigla dodatna toplina i omogućilo daljnje zavarivanje. Vrijeme zadržavanja ovisi o debljini i brzini provođenja topline materijala koji se zavaruje. U nastavku postupka alat se pravocrtno giba u smjeru zavarivanja. Oko rotirajućeg trna stvara se tanko plastificirano područje i prenosi

materijal s jednog lima na drugi pojavom „ključanice“ u krutom stanju. Završetak zavora izvodi se prekidanjem pravocrtnog gibanja, te se alat uz stalnu rotaciju izvlači iz materijala (slika 13).

[14]



*Slika 13 Početak zavarivanja (a), prilikom zavarivanja (b) i završetak zavarivanja (c) [15]*

#### **4.2.1. Osnovni parametri postupka**

Osnovni parametri procesa su: broj okretaja alata (kutna brzina okretanja alata), translacijska brzina alata (brzina zavarivanja) i aksijalna sila. One najviše ovise o toplinskim svojstavima materijala i debljini lima, a njihove optimalne vrijednosti se određuju isključivo eksperimentalno. Kao parametri procesa, određuju se i odgovarajući geometrijski parametri pojedinih elemenata alata (promjer trna alata, promjer čela alata i kut nagiba trna alata). Pored ovih parametara značajni su i dubina prodiranja čela alata u materijal, kao i kut nagiba osi alata.



#### 4.2.2. Broj okretaja i translacijska brzina alata

Postoje dvije brzine kretanja alata koje su važne kod postupka FSW. Kutna brzina kojom se okreće alat i translacijska brzina koja određuje brzinu zavarivanja željenog materijala odnosno brzina zavarivanja. One moraju biti pravilno odabrane, da bi se ostvarilo uspješno i efikasno odvijanje zavarivanja. Povećanje ili smanjenje brzine će rezultirati hladnijim ili toplijim zavarima. U cilju da se dobije što bolji zavar, potrebno je da materijal oko alata bude dovoljno zagrijan da omogući plastično tečenje materijala i smanji silu koja djeluje na alat. Ako alat nije dovoljno zagrijan, onda je moguće da će se pojaviti određene praznine ili druge greške koje mogu biti prisutne u zoni miješanja, a može doći i do loma alata. Pretjeran unos topline može biti štetan za konačanu kvalitetu zavara, jer može doći do topljenja materijala. Broj okretaja tijekom 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. Translacijska brzina (Tablica 1) je istovremeno i brzina zavarivanja i ona zavisi od mehaničkih svojstava i debljine materijala limova. [13]

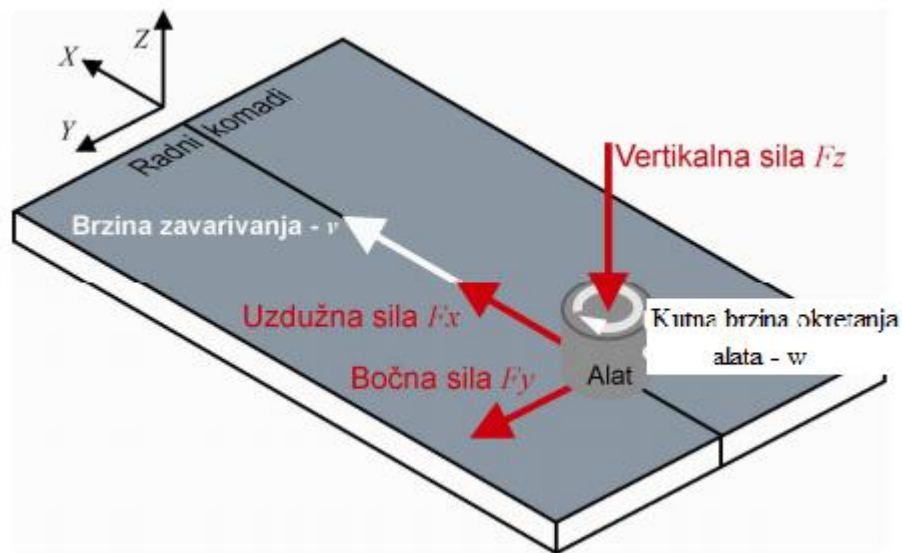
Tablica 1 Broj okretaja i translacijska brzina zavarivanja [16]

Legura	n (o/min)	v (cm/s)
6061 Al	225	0,466
5083 Al	180	0,191
7075 Al	250	0,127
6082 Al	230	0,466
1010 čelik	280	0,127
Ti-6Al-4 V	300	0,169

#### 4.2.3. Sile zavarivanja

Sile koje djeluju na alat tijekom postupka 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. Vertikalna (aksijalna) sila kod postupka FSW je sila kojom alat djeluje na materijal. Ona je najveća u početnom periodu prodiranja trna kroz materijal, a zatim se smanjuje, dok čelo alata ne dohvati gornju površinu materijala koji se zavaruje. Tada ponovo počinje rasti dok se ne dostigne određena temperatura kad počinje opadati i zadržava svoju

konstantnu vrijednost sve do završetka zavarivanja. Aksijalna sila kod postupka FSW mnogo je manja, zbog načina nastajanja topline, ona ne ovisi o površini zavarivanih dijelova, već o svojstvima materijala zavarivanih dijelova i geometrijskih karakteristika trna i čela alata te se kreće do 200 kN. Kako je komponenta vertikalne sile dominantna kod postupka FSW, ona se često naziva i sila zavarivanja ( $F_z$ ). Uzdužna ( $F_x$ ) ili longitudinalna sila djeluje paralelno smjeru kretanja alata, a pozitivan smjer je smjer kretanja alata. Bočna sila ( $F_y$ ) djeluje normalno na pravac kretanja alata i pozitivan smjer se definira prema istosmjernoj strani zavara. U cilju sprječavanja loma alata i smanjivanja pretjeranog habanja alata, sila koja djeluje na alat treba biti što je moguće manja i potrebno je izbjegavati nagle promjene. Na slici 14 je prikaz sila koje djeluju tijekom postupka FSW. [24]



Slika 14 Prikaz sila koje djeluju kod postupka FSW [13]

#### 4.2.4. Kut nagiba i dubina penetracije čela alata

Dubina penetriranja je definirana kao dubina najniže točke čela alata ispod površine zavarivanih ploča i utvrđeno je da je ovaj parametar ključan za ostvarivanje kvalitetnog zavara. Penetriranje ispod površine materijala povećava pritisak ispod alata, a to može dovesti do zakrivljenja osi alata. Dubina prodiranja mora biti pravilno podešena jer se mora osigurati nesmetan silazni pritisak, ali i da se osigura da alat ne prodire previše u materijal koji se zavaruje. Sa druge strane pretjerana penetracija može dovesti do prodiranja trna alata kroz radne komade u ploču oslonca, što može dovesti do loma trna alata ili do loše kvalitete zavara. Ovaj problem je riješen strojevima sa hidrauličnim podešavanjem položaja čela alata, kojima se ostvaruje odgovarajući pritisak na ploče koje se zavaruju. Na ovaj način se kontrolira dubina

penetracije u materijal i sprječava se pojava deformacija ispupčenja ploča u blizini metala zavara. Na Institutu za zavarivanje TWI, dizajniran je mehanički sustav upravljanja za kontrolu i održavanje položaja čela alata u odnosu na površinu materijala. Sustav se sastoji od dva valjka koja su postavljena pored alata koji osiguravaju da alat ne penetrira previše u materijal i na taj način omogućava kvalitetno zavarivanje kao što je prikazano na slici 16. [13]



Slika 15  $D$  - promjer čela alata,  $d$  - promjer trna alata,  $\alpha$  - kut nagiba trna alata [13]



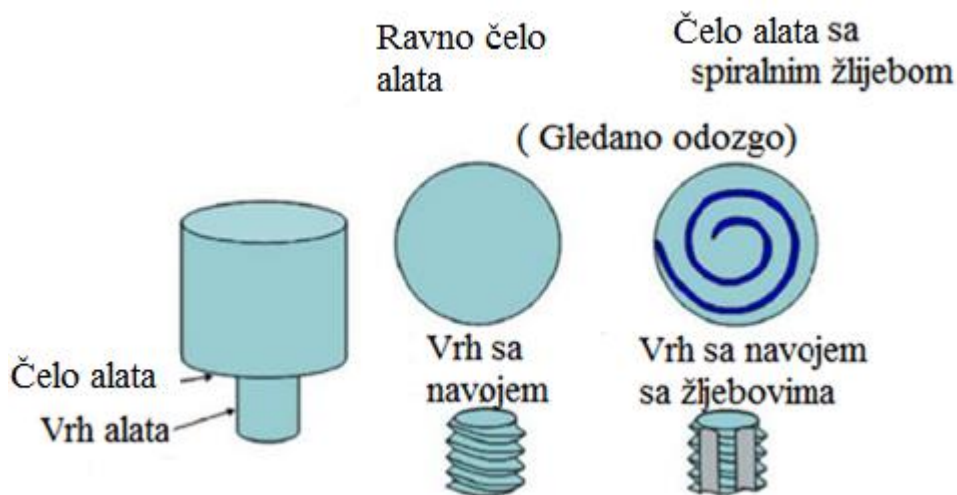
Slika 16 Sistem za kontrolu dubine prodiranja čela alata u materijal koji se sastoji od dva pomoćna valjka [13]

### 4.3. Alat za zavarivanje

Geometrija alata je najvažniji faktor kod postupka FSW zavarivanja. Geometrija alata igra glavnu ulogu u tečenju materijala i određuje brzinu pri kojoj se može ostvariti FSW postupak. Alat za FSW se sastoji od vrha i čela alata. Alat ima dvije glavne funkcije:

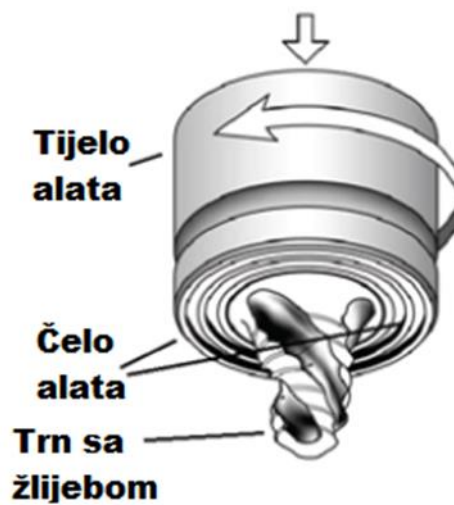
- lokalizirano zagrijavanje i
- tečenje materijala.

U početnoj fazi ulaza alata, zagrijavanje je rezultat trenja između vrha alata i radnog dijela. Dodatno zagrijavanje je rezultat deformacije materijala. Alat nastavlja penetrirati u materijal sve dok čelo alata ne dodirne radni dio. Trenje između čela alata i radnog dijela najvišim dijelom doprinosi stvaranju topline. Sa aspekta zagrijavanja, važna je relativna veličina između promjera vrha alata i promjera čela alata, dok ostale veličine nisu toliko bitne. Čelo alata također osigurava poravnanje zagrijanog materijala. Druga funkcija alata je “mješanje” i “pomicanje” omekšanog materijala. Jednolikost mikrostrukture, karakteristike spoja i sile otpora prilikom zavarivanja trenjem također zavise od konstrukcije alata. Najčešće se koristi konkavno čelo alata, i cilindrični vrh alata sa navojem kao što je prikazan na slici 17.



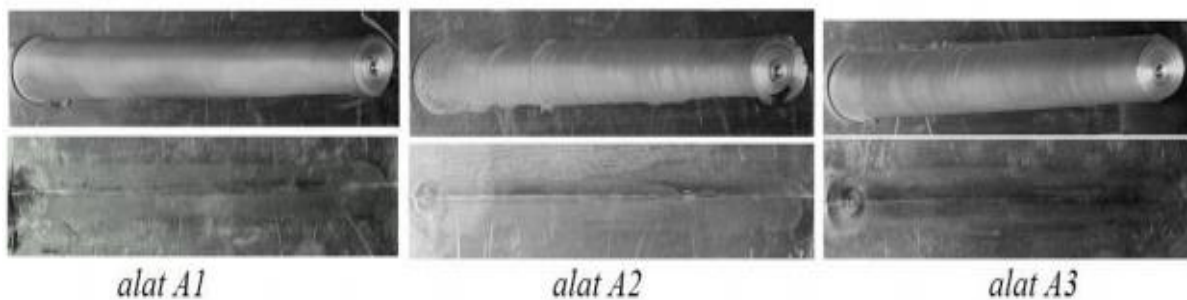
Slika 17 Shematski prikaz FSW alata [12]

Alat se sastoji od gornjeg dijela – tijela i donjeg dijela – trna (slika 18). Površina alata koja uzrokuje nastanak trenja i razvijanje topline u dodiru sa površinom materijala naziva se čelo alata. Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala što omogućuje njegovo miješanje i povezivanje i u manjoj mjeri za dovođenje topline. Alati bez trna s ravnom površinom čela se koriste za zavarivanje tanjih limova.



Slika 18 Rotirajući alat za zavarivanje FSW [11]

Oblik alata utječe na tok omekšanog materijala, te različiti oblici alata mogu za posljedicu imati različito gibanje omekšanog materijala između limova u spoju. Tijelo alata može biti cilindričnog oblika ili izrađeno konusno. Oblik tijela nema značajan utjecaj na zavarivanje radi zanemarivog ulaza tijela alata u osnovni materijal pri zavarivanju od svega 1 do 5% debljine spoja. Dimenzije alata utječu na količinu razvijene topline, aksijalnu i radijalnu silu alata na osnovni materijal, moment i mehaničko opterećenje koje djeluje na alat. Važnije dimenzije kod izrade alata su promjer na mjestu čela, dužina i širina trna alata. Dobiveni izgled zavara direktno ovisi o izgledu alata za zavarivanje (slika 19). [19]









Slika 19 Dobiveni zavareni spoj FSW postupkom primjenom različitih alata [15]

#### 4.3.1. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW

Dizajn alata je ključan faktor koji može utjecati na kvalitetu zavara i maksimalnu brzinu zavarivanja. Poželjno je da materijal koji se koristi za izradu alata posjeduje dovoljnu čvrstoću

i tvrdoću na temperaturi zavarivanja. Isto tako trebao bi imati dobru otpornost na oksidaciju i nisku toplinsku vodljivost da bi se smanjio gubitak toplina i oštećenja na strojevima. Poboljšanja u konstrukciji alata su pokazala velika unaprijeđenja kod produktivnosti i kvalitete. Institut za zavarivanje TWI je razvio specijalno konstruirane alate (slika 20) i na taj način povećao debljine ploča koje mogu zavarivati. Primjer je spirala 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. Većina alata imaju konkavan profil čela alata, koji sprečava da materijal koji je izašao uslijed penetracije trna alata ostane ispod čela alata. Trifluete serija alata koristi alternativni sistem sa nizom koncentričnih žljebova koji su namijenjeni da proizvedu dodatno kretanje materijala u gornjim slojevima zavara.

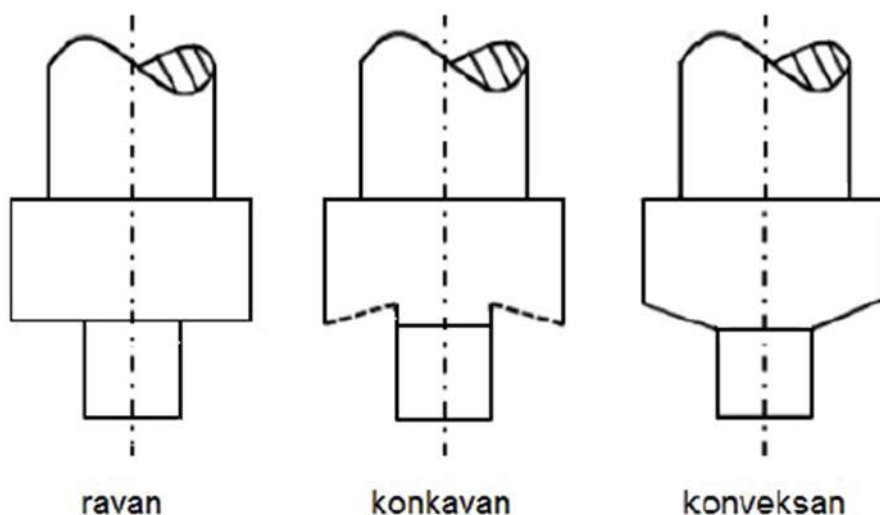
<i>Cylindrical</i>	<i>Whorl<sup>TM</sup></i>	<i>MX triflaute<sup>TM</sup></i>	<i>Flared triflaute<sup>TM</sup></i>	<i>A-skew<sup>TM</sup></i>	<i>RE-stir<sup>TM</sup></i>
cilindrični	spiralni	MX-trožljebni	šireći trožljebni	A-zakošeni	Re-mješajući
					

Slika 20 Alati konstruirani u TWI [17]

#### 4.3.2. Oblik čela alata za zavarivanje

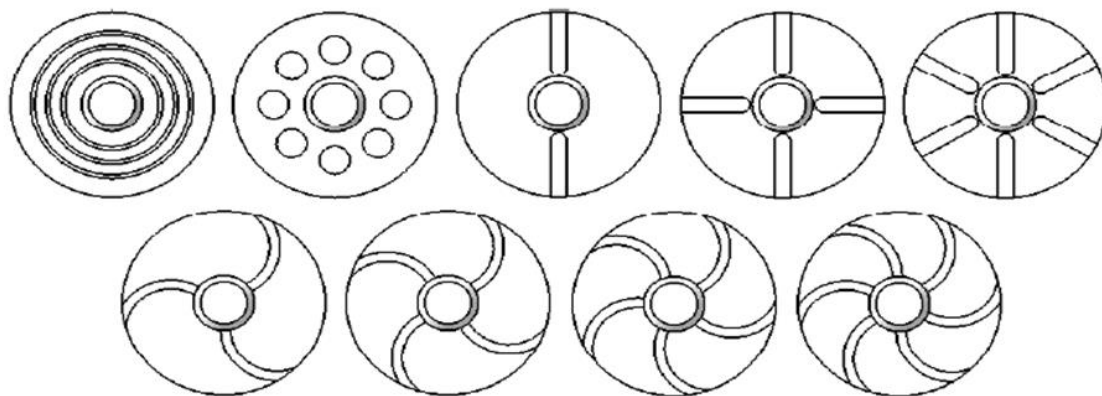
Oblik čela alata utječe na dovođenje topline trenjem, utiskivanje materijala i oblikovanje lica zavara. Čelo alata može imati ravni, konkavan ili konveksan uzdužni presjek (slika 21). Alat sa ravnim uzdužnim presjekom čela nije učinkovit u zaustavljanju izlaza omekšanog materijala iz područja zavarivanja. Zavari izrađeni alatom s ravnim čelom imaju savijene rubove zbog istiskivanja materijala. Prednost alata s ravnom površinom čela je jednostavnost izrade. Konkavan presjek čela alata s kutom od 6° do 10° sprječava izlaz omekšanog materijala. Pri utiskivanju alata na početku zavarivanja dio materijala ulazi u konkavnu šupljinu te kasnije

služi kao zaliha ujedno stvarajući pritisak na preostali materijal u presjeku. Pomicanjem alata u smjeru zavarivanja materijal iz zalihe kontinuirano izlazi i ostaje u zavaru iza alata dok novi materijal, ispred alata, ponovo ulazi u konkavnu šupljinu i dalje služi kao zaliha sve do završetka zavara. Pri zavarivanju ovakvim alatom potrebno je postaviti vertikalnu os alata od  $1^\circ$  do  $3^\circ$  suprotno od smjera zavarivanja kako bi se omogućio ulaz materijala ispred alata i povećala pritisna sila na zadnjoj strani alata.



Slika 21 Oblici uzdužnog čela alata kod FSW [12]

Površina čela alata može biti glatka ili s izrađenim različitim oblicima žlijeba odnosno gravura (slika 22). Svi oblici poprečnog presjeka čela alata mogu sadržavati žljebove. Pri zavarivanju omekšani materijal radi hidrostatičkog pritiska ulazi u žlijeb i povećava trenje i miješanje tečenjem materijala ispod čela alata. Alat s žljebovima na čelu daje lošiji izgled lica zavara. Najčešće se izrađuje žlijeb u obliku zavojnice koja počinje na rubu tijela alata, a završava u centru (ako nema trna) ili uz rub trna alata. Ovakav žlijeb poboljšava površinski tok materijala tečenjem od ruba čela alata prema sredini zavara, smanjuje povinutost rubova zavara i eliminira potreban nagib alata izvan okomite osi na zavar. [17]

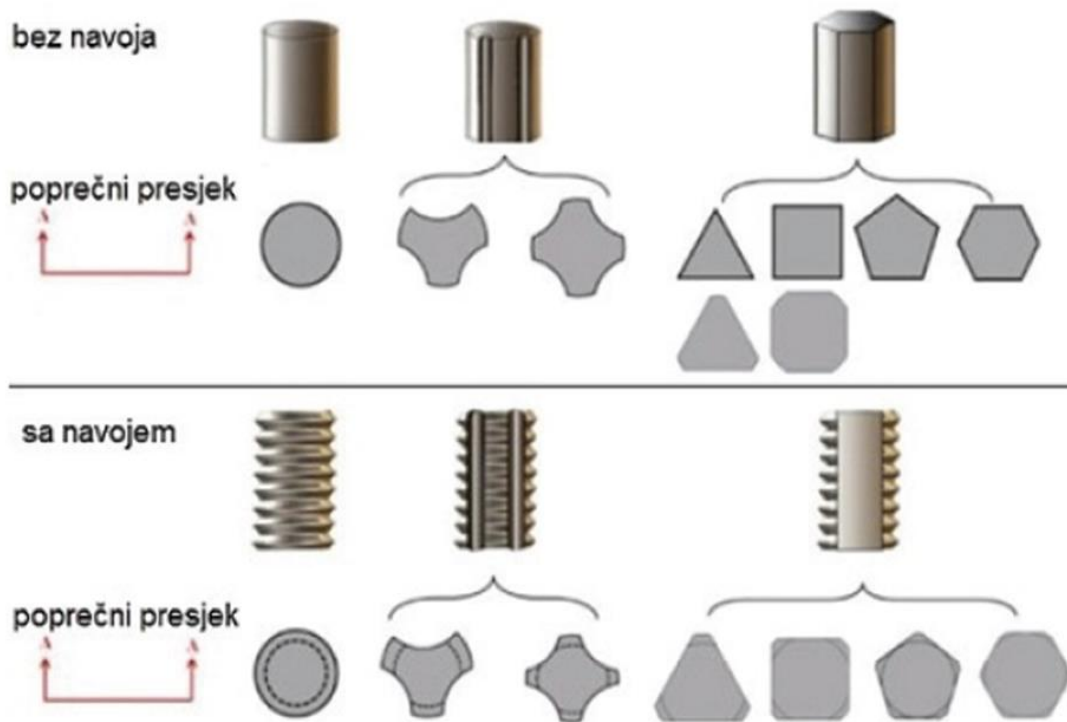


*Slika 22 Najčešći oblici žljebova na čelu alata [12]*

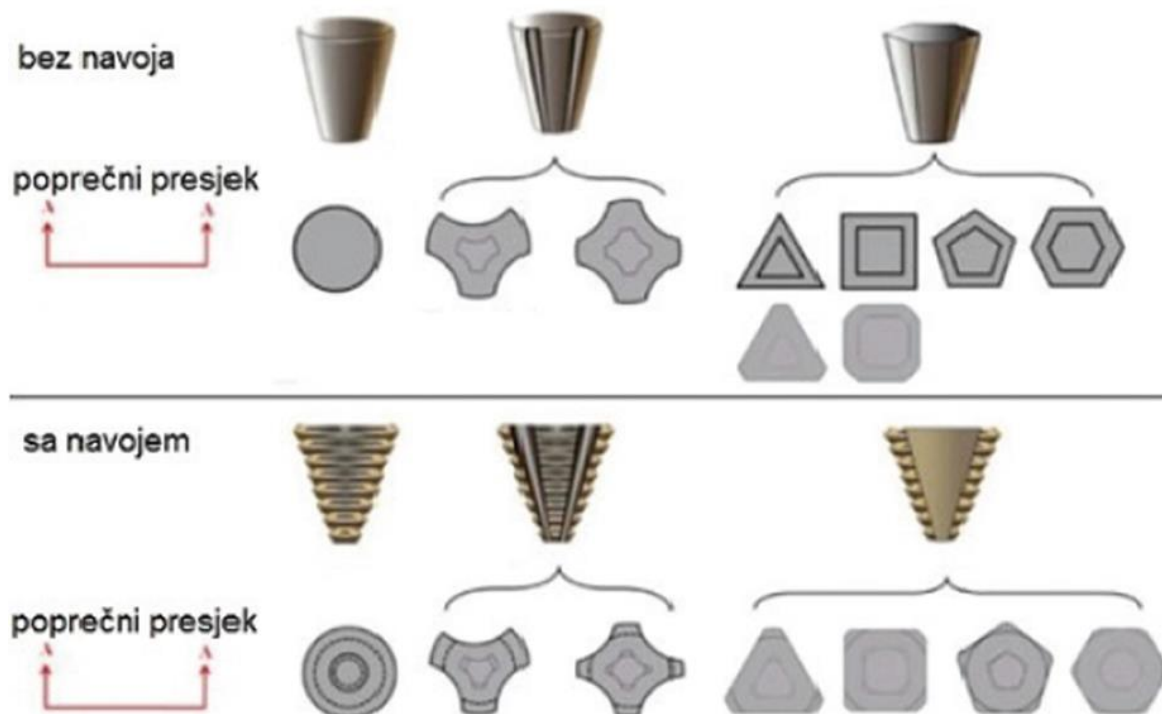
### **4.3.3. Oblik trna alata kod FSW zavarivanja**

Alati za zavarivanje trenjem razlikuju se prema izgledu trna od jednostavnog cilindričnog trna ravnog dna do složenih konusnih trnova sa zavojnicama i izrađenim navojima na bočnim površinama. Trn omogućava tečenje materijala s prednje strane alata na stražnju miješajući materijal dva lima u dodiru i u manjoj mjeri služi za dovođenje topline trenjem. Trn alata može biti cilindričnog ili konusnog oblika i s ravnim stranicama na boku. Prema tome poprečni presjek trna može biti kružnica, trokut, kvadrat, peterokut, šesterokut, osmerokut itd. Slika 23 prikazuje neke od najčešćih oblika cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini. Slika 24 prikazuje neke od najčešćih oblika konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini. Jednostavni alati s cilindričnim trnom najčešće se koriste za zavarivanje limova do 12 mm debljine, a konusni za veće debljine limova. [17]





Slika 23 Oblici cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [12]



Slika 24 Oblici konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [12]

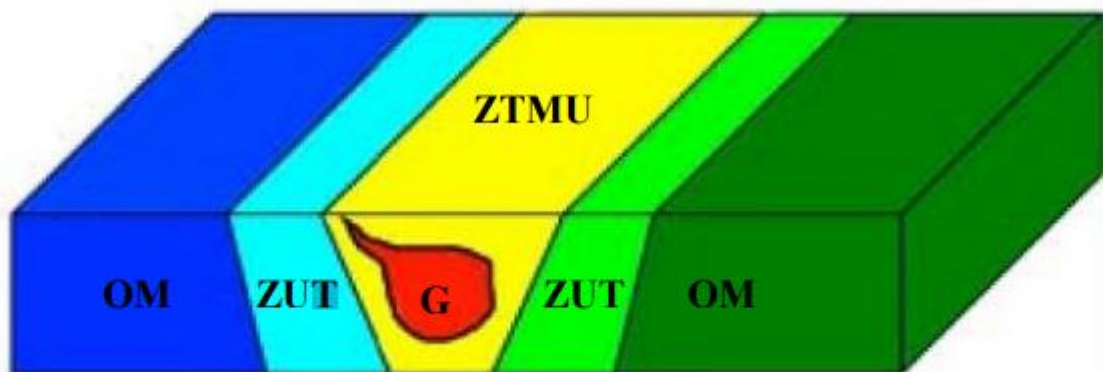
Na trnu alata može biti izrađen navoj bilo koje vrste: metrički, cijevni, trapezni, obli itd. Isto tako na bočnim stranama trna alata može biti izrađeno više žljebova bilo da se radi o cilindričnom ili konusnom trnu sa ili bez urezanog navoja. Alati s navedenim oblicima izrađenim na bočnim stranama trna najčešće se koriste za zavarivanje mekših materijala kao što su aluminijske legure ili legure bakra. Za zavarivanje materijala veće čvrstoće i tvrdoće obično se koriste alati s jednostavnim cilindričnim trnom koji omogućava duže trajanje alata. Vrh trna alata može biti ravan, zaobljen ili konusan. Zaobljen ili konusan vrh trna smanjuje potrebnu silu pritiska pri uranjanju trna u materijal na početku zavarivanja, a time i povećava trajnost alata.

## 4.2. Karakteristike zavara

Kod zavarivanja postupkom FSW javljaju se zone u kojima se povećava temperatura materijala. Ona se povećava uslijed trenja nastalog između alata za zavarivanje i materijala koji se zavaruje. Prilikom toga mijenja se mikrostruktura materijala zavarivanja, njegova tvrdoća, čvrstoća te druga mehanička svojstva.

### 4.2.1. Mikrostrukturne promjene

Asimetrična priroda metala zavara i neobičan oblik alata za zavarivanje, doveli su da, kao rezultat zavarenog spoja imamo veoma karakterističnu mikrostrukturu. Prvi pokušaji mikrostrukturne podjele zavarenog spoja izvedeni su 1997. godine samo za legure aluminija. Mikrostrukturna podjela je izvedena na Institutu za zavarivanje TWI i nju sačinjavaju 4. zone.

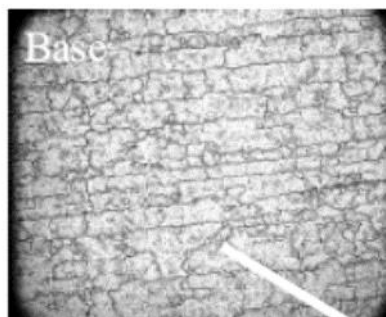


Slika 25 Struktura zavarenog spoja kod postupka FSW [11]

Struktura zavarenog spoja kod postupka FSW se sastoji od sljedećih zona (slika 25):

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

U zoni osnovnog materijala nema plastičnog deformiranja materijala, niti utjecaja topline, koji može utjecati na mehaničke osobine, tako da u zoni osnovnog materijala nema mikrostrukturnih promjena (slika 26).



*Slika 26 Mikrostruktura osnovnog materijala [18]*

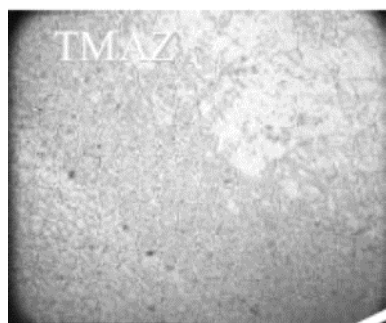
Zona utjecaja topline je zajednička za sve procese zavarivanja, pa postoji i kod postupka FSW. Ova zona je izložena toplinskom utjecaju, ali se ne deformira tijekom procesa zavarivanja. Tijekom procesa zavarivanja, ona prolazi kroz odgovarajući temperaturni ciklus koji dovodi do promjena mehaničkih osobina i mikrostrukture kao što je prikazano na slici 27. Veličina zone utjecaja topline direktno ovisi o količini dovedene topline. Temperature u ovoj zoni su niže od onih u TMAZ zoni, ali još uvijek imaju značajan utjecaj.



*Slika 27 Mikrostruktura zone utjecaja topline [18]*

U zoni termo-mehaničkog utjecaja topline, materijal je izložen plastičnim deformacijama i temperaturnim utjecajima od strane alata koji se javljaju na obje strane zone miješanja. Za razliku od zone miješanja, mikrostruktura se može razlikovati od strukture osnovnog materijala, iako je značajno deformirana, a i temperature su niže, pa je prilikom procesa zavarivanja i odgovarajuća mikrostruktura manje promijenjena kao što je prikazano na slici 28. Kod

aluminija u ovoj zoni izdvajaju se jasno tri područja: tzv. (nugget) - „grumen” zona, dio izvan „grumen” zone i dio rukavaca iznad „grumen” zone. Dio izvan „grumen” zone je manje deformirana.



*Slika 28 Mikrostrukutra zone termo-mehaničkog utjecaja topline [18]*

Zona miješanja je (tzv. nugget - „grumen” dinamički rekristalizirana zona) zona velike deformacije materijala, koja odgovara otprilike lokaciji trna alata tijekom postupka FSW. Zrna u ovoj zoni su grubo promiješana i manja od veličine zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna u zavisnosti od vrste legure kreće se od 1  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Taj dio se formira odmah ispod čela alata, a širina joj je neznatno veća od promjera trna alata (slika 29). [11, 17, 18]

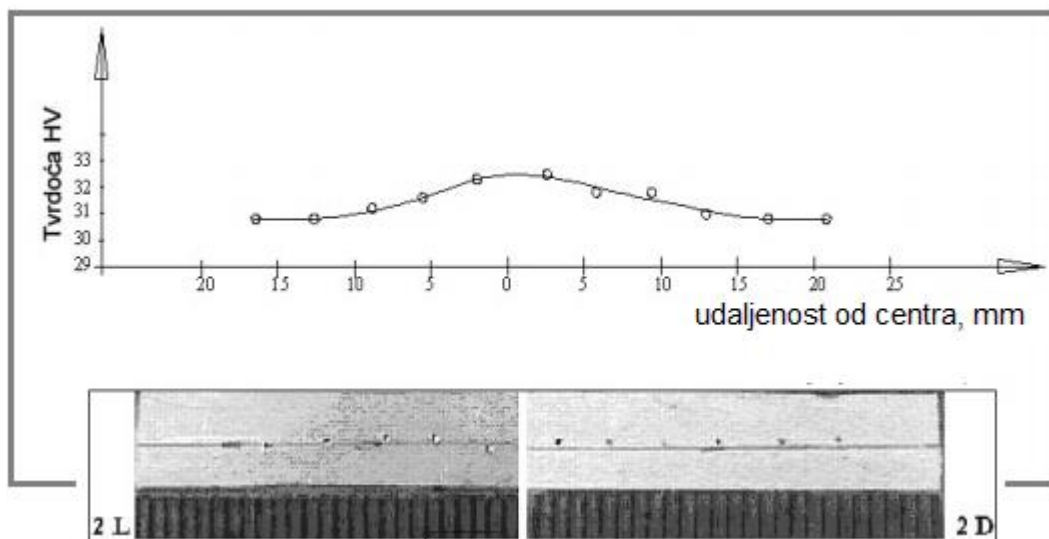


*Slika 29 Mikrostruktura "grumen" zone [18]*

#### **4.2.2. Tvrdoća zavara**

Kod termički neobradivih legura, primjećuje se malo povećanje tvrdoće u zoni utjecaja topline (ZUT), zoni termo-mehaničkog utjecaja (ZTMU) i grumenu, u odnosu na osnovni materijal (OM). Kao posljedica usitnjavanja zrna uslijed intenzivnog mehaničkog miješanja i povišene temperature, u samom grumenu javlja se najveća tvrdoća materijala. U zoni termo-mehaničkog utjecaja materijal je izložen djelovanju mehaničkog miješanja, ali i temperature, što ima za posljedicu nešto veću tvrdoću u odnosu na preostale zone. Dok je materijal u zoni utjecaja topline izložen djelovanju samo povišene temperature, tako da je struktura veoma malo

izmenjena u odnosu na osnovni materijal (slika 30). Tvrdoća u grumenu se može povećati povećanjem brzine zavarivanja i smanjenjem broja okretaja alata. [11, 19]



Slika 30 Tvrdoća kod legure aluminija 5052 [11]

#### 4.2.3. Čvrstoća i zamor materijala

Zone grumena i ZUT-a, imaju veliku sposobnost plastične deformacije. Uglavnom, vlačna čvrstoća svih tipova aluminijumskih legura se povećava sa porastom parametara zavarivanja, prije svega brzine zavarivanja. Pri tome, postignuta kvaliteta zavara veoma ovisi o tipu legure. Kvaliteta zavara dobivenog FSW postupkom je znatno bolja u odnosu na kvalitetu spoja dobivenog klasičnim postupkom zavarivanja sa taljenjem. Dodatna toplinska obrada zavara povećava kvalitetu spoja, ali znatno smanjuje elastičnu čvrstoću, što je posljedica povećanja zrna u ZTMU. Toplinska obrada utječe na mjesto i vrstu prijeloma. Iz ovih razloga se naknadna toplinska obrada spojeva dobijenih FSW postupkom ne preporučuje. Kvaliteta površine dobijene FSW postupkom, odnosno izgled lica zavara ima veliki utjecaj na otpornost spoja na zamor. Ispitivanjem na zamor uzoraka opterećenih u poprečnom i uzdužnom pravcu, utvrđeno je da otpornost zavara na zamor iznosi svega 50% od otpornosti osnovnog materijala. Međutim, ukoliko se sa strane lica zavara naknadnom strojnom obradom skine sloj debljine 0,1 do 0,15 mm, otpornost materijala zavara na zamor je približno jednaka osnovnom materijalu. Mala nadvišenja lica zavara, kao i prisutni grebenasti tragovi čela alata na strani zavarivanja, koji nastaju nakon postupka FSW su mjesta koncentracije napona na kojima se stvaraju i razvijaju pukotine. Naknadnom strojnom obradom uklanjaju se koncentracije napona, te se pukotine javljaju u dijelu s najmanjom tvrdoćom. Ukoliko se kod postupka FSW primenjuje

veća brzina zavarivanja nastali spoj ima veću otpornost na zamor. Otpornost zavara na zamor, dobijenih FSW postupkom je ipak veća nego zavara dobijenih MIG postupkom. U zavarenim spojevima dobijenim FSW postupkom javljaju se zaostali naponi i deformacije, nastali kao posljedica nejednolikog hlađenja i zagrijavanja materijala. Ove razlike izazivaju nejednako širenje materijala i pojavu lokalnih plastičnih deformacija. Tijekom hlađenja materijal se skuplja i stvara zaostale napone. Pri tome se javlja asimetričnost u raspodjeli zaostalih napona u odnosu na os kretanja alata. Ove negativne prapratne posljedice su daleko manje od onih koje se javljaju u zavarenim spojevima dobivenim taljnjem materijala, kod klasičnih i konvencionalnih postupaka zavarivanja. [11, 19]

#### 4.2.3. Vanjski izgled spoja

Lice metala zavara je gornja površina zavarenih limova koja se formira poslije prolaska čela alata, a korijen metala zavara je donja površina. Na licu metala zavara se nalaze karakteristični otisci od alata u obliku polukružnih rubova (slika 31). Razmak između dva ruba odgovara putu koji prijeđe alat pravocrtnim kretanjem po radnim komadima u smjeru zavarivanja za vrijeme jednog okretaja. U ovisnost od vrste legure i parametara zavarivanja ovi rubovi mogu biti više ili manje uočljivi.



*Slika 31 Izgled rubova zavara nastalih djelovanjem alata [21]*

Na suprotnoj strani lica metala zavara, 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 postupka FSW u metalu zavara 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 postupku FSW (slika 32, slika 33).



*Slika 32 Gornja površina zavara FSW postupkom [13]*


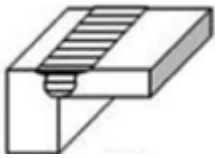
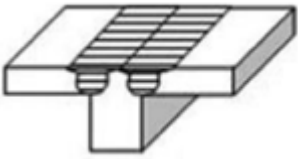


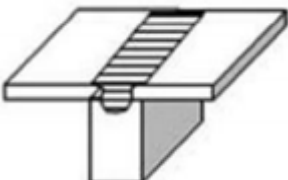
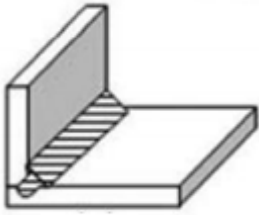


*Slika 33 Donja površina zavara FSW postupkom [13]*

#### **4.2.4. Vrste spojeva**

Najpogodniji spojevi za ostvarivanje FSW-om su čeoni i kombirani čeoni i preklopni spojevi (Tablica 2). Tijekom početne faze ulaska alata u materijal, sile koje se javljaju su dosta visoke i potrebno je poduzeti posebne mjere opreza i dobro učvrstiti radne dijelove. Nije potrebna nikakva specijalna priprema dijelova koji se zavaruju FSW zavarivanjem. [11]

Tablica 2 Vrste spojeva kod FSW zavarivanja [11]

Vrste spojeva kod FSW zavarivanja	
	- sučioni spoj
	- kutno sučioni spoj
	- T spoj tri elementa
	- jednostruki preklopni spoj
	- višestruki preklopni spoj
	- T spoj dva elementa
	- kutni spoj

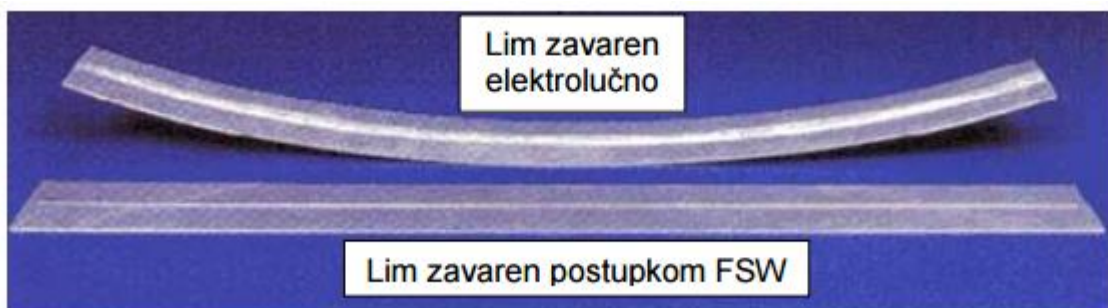
#### 4.4. Prednosti postupka

Postupak FSW je razvijen s ciljem da se izbjegnu problemi nastali kod zavarivanja taljenjem materijala. Taj se problem najčešće javlja kod zavarivanja limova aluminijska do 75 mm debljine. Prednosti postupka FSW su:

- dodatni materijal nije potreban



- nema potrošnog materijala
- mogućnost potpune automatizacije (čak i na glodalicama)
- zavareni spoj je homogene sitnozrnate strukture sa dobrim mehaničkim i drugim svojstvima
- minimalna skupljanja zavora i plastične deformacije
- nije potreban certifikat zavarivača
- nema isparavanja štetnih plinova
- nije potrebna zaštitna maska kod zavarivanja aluminija
- nema poroznosti, ni prskanja
- velika ušteda energije i manja upotreba snage nego kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja (tablica 3)
- moguće je zavarivanje u svim pozicijama (horizontalno, vertikalno...) jer nema tečenja materijala iz zavora
- zavar ne sadrži nemetalne uključke i nečistoće
- širina zavora je po dužini ravnomjerna
- može se koristiti za izvođenje linernih, nelineernih i kružnih zavarenih spojeva
- estetski zavar lijepog izgleda
- minimalna debljina ispod i iznad zavarenog spoja zbog čega se smanjuje potreba za naknadnom obradom odvajanjem čestica
- neprisutnost distorzije spoja (slika 34) [11]



*Slika 34 Distorzije limova zavarenih elektro-lučno i postupkom FSW [16]*

Tablica 3 Utrošena snaga i toplina kod FSW, TIG i MIG postupka [16]

LEGURA	FSW		TIG		MIG	
	P (W)	Q (kJ/cm)	P (W)	Q (kJ/cm)	P (W)	Q (kJ/cm)
6061 Al	3265	6,59	3850	6,05	5200	6,10
5083 Al	2030	9,57	3850	6,05	5200	6,10
7075 Al	2105	14,36	3850	6,05	5200	6,10
6082 Al	3382	6,53	3850	6,05	5200	6,10
1010 čelik	2710	12,8	-	-	10120	6,38
Ti-6 Al-4	2200	8,31	-	-	9300	9,38

#### 4.5. Nedostaci postupka

Kod postupka FSW postoje i neki nedostaci. Zbog nedovoljne temperature zavarivanja, male brzine okretanja alata ili velike brzine uzdužnog pomaka mogu se javiti velike plastične deformacije materijala. Nedostaci FSW postupka su:

- rupa na kraju zavara zbog izlaza alata
- potrebna je velika aksijalna sila na materijal
- potrebno je jako dobro pritegnuti limove koje varimo da nebi došlo do njihovog pomaka tijekom procesa
- ne može se vršiti zavarivanje kod kojeg se zahtjeva dodavanje materijala
- manja fleksibilnost procesa u odnosu na elektrolučno zavarivanje (problemi s promjenama debljine materijala)
- uglavnom sporiji postupak zavarivanja od ostalih tehnika zavarivanja [11]

#### 4.6. Primjena

Brodogradnja je prvi sektor u kome je postupak FSW dobio svoju punu primjenu. Njegova primjena u industriji započela je u tvornici „SAPA“ u Švedskoj i to za izradu jednostavnih platformi od aluminija kod brodskih uređaja za zamrzavanje ribe. Kasnije je u ovoj tvornici razvijena čitava serija automatiziranih strojeva za postupak zavarivanja FSW. U ovoj industrijskoj grani postupak FSW se koristi u izgradnji paluba (slika 38), blokova broda, podova, pregrada, konstrukcije broda, jarbola, čamaca za jedrenje itd., zaključno sa platformama za slijetanje helikoptera na brodovima. Posljednjih godina postupak FSW, se intenzivno koristi u proizvodnji željezničkih vagona, vagona cisterni, putničkih vagona, tramvaja, teretnih vagona, tijela kontejnera, itd. Pri izradi vlakova nove generacije postupak

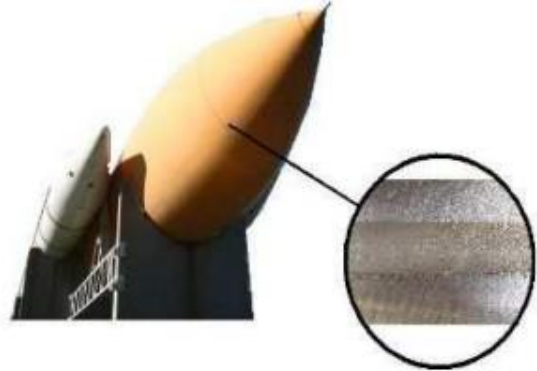
FSW se koristi pri zavarivanju: noseće konstrukcije, stranica vlakova, krovova, podova i mnogih drugih elementa koji se izrađuju od legura aluminija (slika 37). Umjesto tradicionalnih postupaka zavarivanja, sada se u željezničkoj industriji koristi isključivo postupak FSW. Dobre karakteristike i visoka pouzdanost zavarenih spojeva ostvarenih postupkom FSW došle su do izražaja u izradi velikog broja različitih djelova u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Kod svemirskih letjelica spojevi 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 (slika 36). U zrakoplovnoj industriji preko 40.000 zakovičnih spojeva zamijenjeno je spojevima izvedenim postupkom FSW, sa tendencijom daljnjeg rasta. Kako je postupak FSW visoko produktivan, vrijeme izrade rezervoara za gorivo kod Delta programa u tvornicama Boeing je skraćeno sa 23 na 6 dana, a ukupni troškovi su smanjeni za 60%. Zavarivanje postupkom FSW, koristi se i u nekoliko vodećih svjetskih automobilskih kompanija (slika 40). Cilj je da se proizvedu vozila manje težine, čime se povećava njihova nosivost i smanjuje potrošnja goriva te tako smanjuje onečišćenje okoliša. Ovaj postupak zavarivanja se koristi pri izradi: motora i šasija, naplataka, veze sa hidrauličnim cijevima, karoserija, tijela kamiona, cisterni za gorivo, prikolica, autobusa i vozila za prijevoz na aerodromima, okvira motocikala i bicikala. U tvrtki Shoma Aluminium & Rubber u Japanu zavarene su vulkanizirane cijevi promjera od 20 mm do 30 mm. Ove cijevi se koriste kod izrade amortizera za osobne automobile. Zavarivanje 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 bakra, cinka, magnezija i njihovih legura, zatim kod mnogih vrsta čeličnih limova, ali i kod kombinacija različitih metala, kao što je titan i čelik, kao i kod pojedinih kompozitnih materijala na bazi metalne matrice. Aluminij, bakar, ugljični i niskolegirani čelici i mnogi drugi metali zavaruju se postupkom u normalnim vanjskim uvjetima. Kod zavarivanja čelika sa velikim sadržajem legirajućih elemenata, preporučuje se upotreba nekog od zaštitnih plinova u cilju sprječavanja štetnog utjecaja atmosfere. Limovi od nisko ugljeničnog čelika i čelika sa 12% kroma debljine od 3 mm do 12 mm, mogu se uspješno zavarivati samo sa jedne strane. Limove debljine veće od 25 mm treba zavarivati dvostrano. [11, 17, 18]

Tablica 4 Primjena postupka FSW [20]

PRIMJENA FSW POSTUPKA ZAVARIVANJA



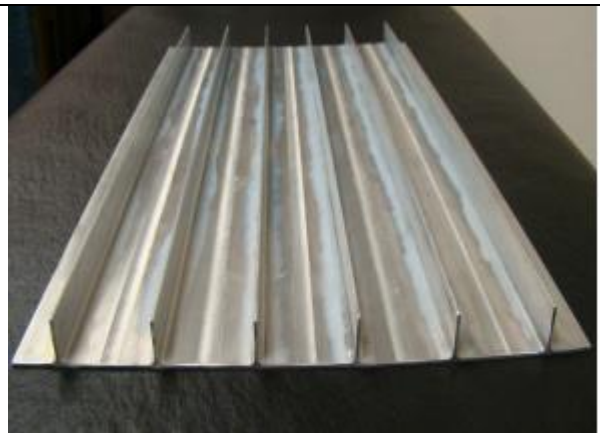
Slika 35 Zavarivanje trupa zrakoplova [13]



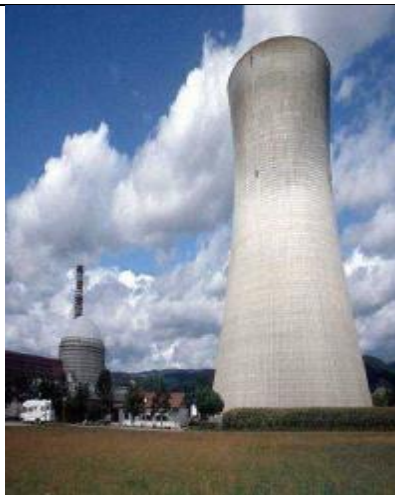
Slika 36 Zavarivanje spremnika goriva rakete [13]



Slika 37 Zavarivanje podova suvremenih željezničkih vlakova [11]



Slika 38 Zavarivanje palube broda [13]



Slika 39 Zavarivanje nuklearnih rektora [11]



Slika 40 Zavarivanje u automobilskoj industriji [11]

## 5. Zaključak

Postupak FSW zavarivanja se vrlo brzo širi i dobio je veliku važnost kod zavarivanja u mnogim granama industrije zahvaljujući izuzetno dobrim karakteristikama u odnosu na ostale konvencionalne postupke zavarivanja. Njegova primjena je relativno jednostavna i učinkovita. Postupak je visokoproduktivan te znatno smanjuje vrijeme vrijeme zavarivanja. Zavarivanje je čisto i moguće ga je izvoditi pomoću glodalice pa je moguće i njegovo automatiziranje prilikom čega se ostvaruje visokokvalitetan zavar.

Prilikom zavarivanja FSW postupkom ne dolazi do taljenja materijala pa ne dolazi ni do velike promjene u njegovoj mikrostrukturi. Kada bi se uspoređivalo, FSW zavarivanje daje znatno bolje rezultate kod čvrstoće zavara, tvrdoće, elastičnosti, otpornosti prema zamoru materijala te otpornosti prema lomu. Broj ciklusa kada dolazi do loma materijala je znatno manji nego kod osnovnog materijala, ali znatno veći nego kod zavara ostvarenih MIG postupkom ili laserskim zavarivanjem. Velika prednost ovakvog postupka je što se ova mana zavara može otkloniti određenim naknadnim postupcima te zavar postaje gotovo istih karakteristika kao osnovni materijal.

Zavarivati se mogu gotovo svi materijali, dok se najčešće zavaruje aluminij te njegove legure. Njegova primjena je moguća u svim smjerovima zavarivanja jer ne dolazi do taljenja materijala.

Zbog svih svojih dobrih karakteristika očekuje se daljnje ulaganje u istraživanje FSW zavarivanja te ulaganje u njegov razvitak i poboljšanje sadašnjih karakteristika. Ulaganje će dovesti do još veće primjene u industriji te zavarivanja raznosvrasnijih materijala uz manje ulaganje energije i snage.

## Popis literature

- [1] <http://www.sfsb.unios.hr/~sklaric/Osnove%20tehnologije%20%20prof%20Samardzic.pdf>, preuzeto 12.5.2016.
- [2] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf>, preuzeto 6.5.2016.
- [3] [https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwic\\_qDt6L7NAhXJChoKHX\\_DWIQFghMMAc&url=https%3A%2F%2Fww.ffri.hr%2F~mdundjer%2FStrojarska%2520tehnologija%2520I%2F06%2520Spajanje%2520dijelova.doc&usg=AFQjCNE7Y7Ob89wnmS29iOyPTE63oztV2w](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwic_qDt6L7NAhXJChoKHX_DWIQFghMMAc&url=https%3A%2F%2Fww.ffri.hr%2F~mdundjer%2FStrojarska%2520tehnologija%2520I%2F06%2520Spajanje%2520dijelova.doc&usg=AFQjCNE7Y7Ob89wnmS29iOyPTE63oztV2w), preuzeto 6.5.2016.
- [4] [https://www.google.hr/search?q=kova%C4%8Dko+zavarivanje&espv=2&biw=1680&bih=925&tbm=isch&imgil=r4BKsr6W-y6hiM%253A%253BwN7hslCTa3sbhM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fsurvival.forumfree.com%25252Ft5832-santoku&source=iu&pf=m&fir=r4BKsr6W-y6hiM%253A%252CwN7hslCTa3sbhM%252C\\_&usg=\\_\\_eN0QtnA62tTxbJsVhm26qywCGk%3D&dpr=1&ved=0ahUKEwjtk9exg7\\_NAhUCExoKHWHiCiMQyjcIMg&ei=tUtsV63IDIKmaOHEq5gC#imgcr=r4BKsr6W-y6hiM%3A](https://www.google.hr/search?q=kova%C4%8Dko+zavarivanje&espv=2&biw=1680&bih=925&tbm=isch&imgil=r4BKsr6W-y6hiM%253A%253BwN7hslCTa3sbhM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fsurvival.forumfree.com%25252Ft5832-santoku&source=iu&pf=m&fir=r4BKsr6W-y6hiM%253A%252CwN7hslCTa3sbhM%252C_&usg=__eN0QtnA62tTxbJsVhm26qywCGk%3D&dpr=1&ved=0ahUKEwjtk9exg7_NAhUCExoKHWHiCiMQyjcIMg&ei=tUtsV63IDIKmaOHEq5gC#imgcr=r4BKsr6W-y6hiM%3A), preuzeto 12.5.2016.
- [5] Ivan Samardžić: Termini i definicije kod zavarivanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012.
- [6] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf>, preuzeto 6.5.2016.
- [7] [https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwic\\_qDt6L7NAhXJChoKHX\\_DWIQFghMMAc&url=https%3A%2F%2Fww.ffri.hr%2F~mdundjer%2FStrojarska%2520tehnologija%2520I%2F06%2520Spajanje%2520dijelova.doc&usg=AFQjCNE7Y7Ob89wnmS29iOyPTE63oztV2w](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwic_qDt6L7NAhXJChoKHX_DWIQFghMMAc&url=https%3A%2F%2Fww.ffri.hr%2F~mdundjer%2FStrojarska%2520tehnologija%2520I%2F06%2520Spajanje%2520dijelova.doc&usg=AFQjCNE7Y7Ob89wnmS29iOyPTE63oztV2w), preuzeto 6.5.2016.
- [8] <https://www.scribd.com/doc/293047900/Elektrootporno-zavarivanje>, preuzeto 12.5.2016.
- [9] <http://hrcak.srce.hr/file/159011>, preuzeto 6.5.2016.
- [10] Bojan Kraut: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [11] Danijela D. Živojinović: Primena mehanike loma na procenu integriteta loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura aluminijuma, Beograd, 2013.
- [12] [http://bib.irb.hr/datoteka/700779.32\\_busic\\_295-308.pdf](http://bib.irb.hr/datoteka/700779.32_busic_295-308.pdf), preuzeto 6.5.2016.
- [13] [http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/13813386651\\_up\\_case\\_study.pdf](http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/13813386651_up_case_study.pdf), preuzeto 12.5.2016.
- [14] Bharat Raj Singh: A Hand Book on Friction Stir Welding, Indija, 2012.
- [15] [https://www.researchgate.net/publication/283579682\\_FSW\\_WELDING\\_ALUMINIUM\\_ALLOYS\\_5086](https://www.researchgate.net/publication/283579682_FSW_WELDING_ALUMINIUM_ALLOYS_5086), preuzeto 11.5.2016.

- [16] <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2006/0354-79650602059S.pdf>, preuzeto 6.5.2016.
- [17] <http://hrcak.srce.hr/file/209305>, preuzeto 11.5.2016.
- [18] <https://ru.scribd.com/doc/109271936/Friction-Stir-Welding-Fsw-Final-Report>, preuzeto 11.5.2016.
- [19] Marko Ristić: Izabrana poglavlja iz zavarenih konstrukcija, Niš, 2011.
- [20] [http://komim.rs/17\\_Zavarivanje\\_trenjem\\_sa\\_mesanjem.pdf](http://komim.rs/17_Zavarivanje_trenjem_sa_mesanjem.pdf), preuzeto 6.5.2016.
- [21] <http://www.alumeco.com/Special-profiles/Machining/Friction-Stir-Welding.aspx>, preuzeto 11.5. 2016.

## Popis slika

Slika 1 Klasifikacija postupka zavarivanja [1] .....	2
Slika 2 Klasifikacija zavarivanja prema potrebnoj energiji [2] .....	3
Slika 3 Kovačko zavarivanje [4] .....	5
Slika 4 Shema točkastog elektrootpornog zavarivanja [6] .....	6
Slika 5 Shema bradavičastog zavarivanja [6] .....	7
Slika 6 Šavno elektrootporno zavarivanje [6] .....	7
Slika 7 Sučeljeno elektrootporno zavarivanje [8] .....	8
Slika 8 Elektrootporno zavarivanje iskrenjem [6] .....	9
Slika 9 Elektroindukcijsko zavarivanje [7] .....	10
Slika 10 Eksplozijsko zavarivanje [9] .....	11
Slika 11 Hladno zavarivanje pritiskom [6] .....	12
Slika 12 Shema zavarivanja FSW [12] .....	13
Slika 13 Početak zavarivanja (a), prilikom zavarivanja (b) i završetak zavarivanja (c) [15] ...	15
Slika 14 Prikaz sila koje djeluju kod postupka FSW [13] .....	17
Slika 15 D - promjer čela alata, d - promjer trna alata, $\alpha$ - kut nagiba trna alata [13] .....	18
Slika 16 Sistem za kontrolu dubine prodiranja čela alata u materijal koji se sastoji od dva pomoćna valjka [13] .....	18
Slika 17 Shematski prikaz FSW alata [12] .....	19
Slika 18 Rotirajući alat za zavarivanje FSW [11] .....	20
Slika 19 Dobiveni zavareni spoj FSW postupkom primjenom različitih alata [15] .....	20
Slika 20 Alati konstruirani u TWI [17] .....	21
Slika 21 Oblici uzdužnog čela alata kod FSW [12] .....	22
Slika 22 Najčešći oblici žljebova na čelu alata [12] .....	23
Slika 23 Oblici cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [12] .....	24
Slika 24 Oblici konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [12] .....	24
Slika 25 Struktura zavarenog spoja kod postupka FSW [11] .....	25
Slika 26 Mikrostruktura osnovnog materijala [18] .....	26
Slika 27 Mikrostruktura zone utjecaja topline [18] .....	26
Slika 28 Mikrostrukutra zone termo-mehaničkog utjecaja topline [18] .....	27
Slika 29 Mikrostruktura "grumen" zone [18] .....	27
Slika 30 Tvrdća kod legure aluminija 5052 [11] .....	28
Slika 31 Izgled rubova zavara nastalih djelovanjem alata [21] .....	29
Slika 32 Gornja površina zavara FSW postupkom [13] .....	30
Slika 33 Donja površina zavara FSW postupkom [13] .....	30
Slika 34 Distorzije limova zavarenih elektrolučno i postupkom FSW [16] .....	32
Slika 35 Zavarivanje trupa zrakoplova [13] .....	35
Slika 36 Zavarivanje spremnika goriva rakete [13] .....	35
Slika 37 Zavarivanje podova suvremenih željezničkih vlakova [11] .....	35
Slika 38 Zavarivanje palube broda [13] .....	35
Slika 39 Zavarivanje nuklearnih reaktora [11] .....	35
Slika 40 Zavarivanje u automobilske industriji [11] .....	35



## Popis tablica

Tablica 1 Broj okretaja i translacijska brzina zavarivanja [16] .....	16
Tablica 2 Vrste spojeva kod FSW zavarivanja [11] .....	31
Tablica 3 Utrošena snaga i toplina kod FSW, TIG i MIG postupka [16] .....	33
Tablica 4 Primjena postupka FSW [20] .....	35

# Sveučilište Sjever



## IZJAVA O AUTORSTVU I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, ANTONIO GORIČKI (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom POMIČNO ZAVARIVANJE TRENJEM (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

ANTONIO GORIČKI

*Antonio Gorički*

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, ANTONIO GORIČKI (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom POMIČNO ZAVARIVANJE TRENJEM (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

ANTONIO GORIČKI

*Antonio Gorički*

(vlastoručni potpis)