

Utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom

Margetić, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:188270>

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

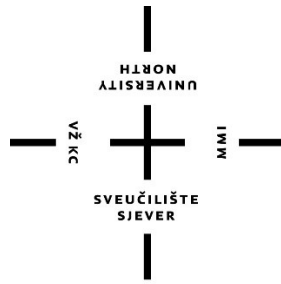
Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-29**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





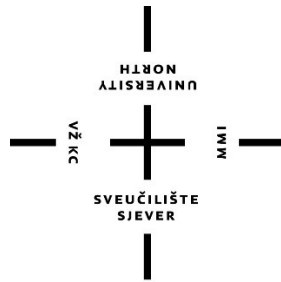
**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 061/STR/2022

**Utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja pri
točkastom zavarivanju trenjem**

Vedran Margetić, 0231025002

Varaždin, ožujak 2023. godine



**Sveučilište
Sjever**

Diplomski Sveučilišni studij Strojarsstvo

Diplomski rad br. 061/STR/2022

**Utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja pri
točkastom zavarivanju trenjem**

Student

Vedran Margetić, 0231025002

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić

Varaždin, ožujak 2023. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------|
| ODJEL | Odjel za strojarstvo | | |
| STUDIJ | diplomski sveučilišni studij Strojarstvo | | |
| PRISTUPNIK | Vedran Margetić | JMBAG | 0231025002 |
| DATUM | 06.06.2022. | KOLEGIJ | Suvremene proizvodne tehnologije |
| NASLOV RADA | Utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom | | |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Influence of the tool on weld mechanical properties in friction stir spot welding | | |
| MENTOR | dr.sc. Matija Bušić | ZVANJE | docent |
| ČLANOVI POVJERENSTVA | 1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva | | |
| | 2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva | | |
| | 3. doc. dr. sc. Jasna Leder Horina, članica povjerenstva | | |
| | 4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva | | |
| | 5. | | |

Zadatak diplomskog rada

| | |
|-------|--------------|
| BR.01 | 061/STR/2022 |
| OPIS | |

U diplomskom radu potrebno je na temelju literaturnih podataka proučiti postupke zavarivanja trenjem. Proučiti zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (Friction Stir Welding). Posebno detaljno proučiti točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (Friction Stir Spot Welding). Navesti utjecajne parametre u postupku, vrste alata koje se koriste, oblike spojeva koji se mogu postići te moguću primjenu ovog postupka.

U eksperimentalno dijelu rada izvesti točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom limova aluminijeve legure uz varijaciju parametara zavarivanja i oblika alata. Pratiti ponašanje materijala u postupku zavarivanja. Izvršiti analizu mehaničkih svojstava zavarenog spoja statičkim vlačnim ispitivanjem. Utvrditi ovisnost izmjerene prekidne sile zavarenih spojeva o parametrima zavarivanja. Donijeti vlastiti zaključak o utjecaju parametara primjenjenih u eksperimentu na mehanička svojstva zavarenih spojeva. U radu je potrebno navesti svu korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

06.06.2022.



M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na temi diplomskog rada, na uloženoj trudu, radu i vremenu pri izvođenju eksperimentalnog dijela rada te na svim savjetima i uputama koje je podijelio sa mnom prilikom mojeg pisanja diplomskog rada.

Zahvaljujem svim profesorima, asistentima i osoblju Sveučilišta Sjever koji su na bilo koji način sudjelovali u mojem obrazovanju te moj boravak na studiju učinili ugodnijim.

Zahvaljujem i tvrtci Ferro-Preis iz Čakovca koja je imala razumijevanje za moje studentske obaveze.

Sažetak

Tema ovog diplomskog bila je proučiti utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom. U prvom dijelu rada opisan je postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom, s time da je stavljen fokus na točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. Ukratko je opisana povijest postupka, opisane su faze postupka, utjecajni čimbenici, prednosti i nedostaci. Navedeni su materijali koji se mogu zavarivati točkastim zavarivanjem trenjem rotirajućim alatom te su navedeni primjeri iz prakse gdje se koristi navedena vrsta zavarivanja.

U drugom dijelu diplomskog rada provedeno je točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom na limovima od aluminijske legure. Prilikom zavarivanja korištena su 2 tipa alata za zavarivanje te su mijenjane brzine rotacije alata i vrijeme trajanja procesa zavarivanja. Limovi koji su zavareni su podvrgnuti smičnom ispitivanju te je analiziran rezultat ispitivanja. Na kraju rada donesen je zaključak o utjecaju alata na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Ključne riječi: zavarivanje trenjem rotirajućim alatom, točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom, aluminij, smično ispitivanje.

Summary

The topic of this thesis was to study the influence of tool on the mechanical properties of the welded joint during the friction stir welding. The first part of this master's thesis presents the friction welding procedure with a rotating tool, with the main focus being on spot welding with a rotating friction tool. There can be found a short procedure history brief, all stages of the procedure, influencing factors, advantages and disadvantages. The materials that can be welded by friction stir spot welding with a rotating tool are listed, and also examples from practice were mentioned.

In the second part of the thesis, spot welding with a friction rotating tool was performed on aluminum sheets. During welding, 2 types of welding tools were used, and the rotation speeds of the tool and the duration of the welding process were changing. The welded sheets were subjected to a static tensile test and the result was analyzed. Finally, the graduate thesis provides a conclusion about the influence of tool on the mechanical properties of the welded joint.

Keywords: friction stir welding, friction stir spot welding, aluminum, shear testing.

Popis korištenih kratica

| | |
|-------------|-------------------------------|
| FSW | Friction Stir Welding |
| FSSW | Friction Stir Spot Welding |
| ZUT | Zona utjecaja topline |
| PCBN | Polikristalni kubni bornitrid |
| MIG | Metal Inert Gas |
| TIG | Tungsten Inert Gas |

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| ω | okr/min | brzina rotacije |
| t | s | vrijeme |
| v | mm/min | brzina |
| α | ° | nagib alata u odnosu na osnovni materijal |
| T | °C | temperatura osnovnog materijala kod zavarivanja |
| T_m | °C | temperatura taljenja osnovnog materijala |
| F_N | N | sila pritiska alata na materijal |
| F_z | N | pritisna sila zavarivanja |
| F_x | N | uzdužna sila zavarivanja |
| F_y | N | bočna sila zavarivanja |
| μ_k | – | kinetički koeficijent trenja |
| τ | MPa | smično naprezanje |

SADRŽAJ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Uvod..... | 1 |
| 1. Aluminij..... | 2 |
| 2. Zavarivanje..... | 4 |
| 3. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom..... | 6 |
| 3.1. Faze u procesu zavarivanja trenjem rotirajućim alatom..... | 7 |
| 4. Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom..... | 8 |
| 4.1. Utjecajni čimbenici procesa zavarivanja trenjem rotirajućim alatom..... | 9 |
| 4.1.1. Brzina rotacije alata..... | 10 |
| 4.1.2. Brzina zavarivanja..... | 10 |
| 4.1.3. Vrijeme zadržavanja alata..... | 11 |
| 4.1.4. Nagib alata u odnosu na osnovni materijal..... | 11 |
| 4.1.5. Sila pritiska alata na materijal..... | 13 |
| 4.2. Zavarljivost materijala FSW i FSSW postupcima zavarivanja..... | 14 |
| 4.3. Vrste spojeva za FSW postupak zavarivanja..... | 15 |
| 4.4. Prednosti i nedostaci postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom..... | 16 |
| 4.5. Primjena FSW postupka zavarivanja..... | 18 |
| 4.6. Alat za zavarivanje..... | 21 |
| 4.7. Čelo alata..... | 22 |
| 4.8. Trn alata..... | 24 |
| 4.9. Utjecaj dimenzija i oblika alata na dovođenje topline..... | 26 |
| 4.10. Utjecaj dimenzija i oblika alata na miješanje materijala..... | 27 |
| 4.11. Materijali za izradu alata..... | 28 |
| 5. Eksperimentalni dio rada..... | 30 |
| 5.1. Limovi u postupku zavarivanja..... | 31 |
| 5.2. Alat za zavarivanje..... | 33 |
| 5.3. Karakteristike glodalice Alfa 5..... | 35 |
| 5.4. Postupak zavarivanja..... | 36 |
| 5.5. Ispitivanje zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja..... | 39 |
| 5.5.1. Smicanje..... | 41 |
| 5.6. Rezultati..... | 43 |
| 6. Analiza rezultata..... | 47 |
| 7. Zaključak..... | 49 |
| 8. Literatura..... | 51 |

Popis slika

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Klasifikacija postupka zavarivanja [2] | 4 |
| Slika 2. Shema zavarivanja FSW postupkom [4] | 6 |
| Slika 3. Faze procesa zavarivanja FSW postupkom [5] | 7 |
| Slika 4. Faze procesa zavarivanja FSSW postupkom [6] | 8 |
| Slika 5. Promjer čela alata, promjer trna alata, kut nagiba alata [8] | 12 |
| Slika 6. Prikaz sila koje su prisutne prilikom FSW postupka zavarivanja [9] | 13 |
| Slika 7. Oblikovanje spojeva za FSW postupak zavarivanja: | 15 |
| Slika 8. Distorzije limova zavarenih elektrolučnim postupkom u usporedbi sa FSW postupkom zavarivanja [11] | 17 |
| Slika 9. Trup i krilo zrakoplova zavareni FSW postupkom [9] | 19 |
| Slika 10. Spremnik goriva svemirske rakete zavaren FSW postupkom [9] | 19 |
| Slika 11. Paluba broda zavarena FSW postupkom [9] | 20 |
| Slika 12. Primjena FSW postupka u automobilskoj industriji [8] | 20 |
| Slika 13. Alat za zavarivanje FSW postupkom [10] | 21 |
| Slika 14. Oblici čela alata [13] | 22 |
| Slika 15. Najčešći oblici žljebova na čelu alata [14] | 23 |
| Slika 16. Oblik cilindričnih trnova alata, sa i bez navoja na bočnom dijelu [13] | 24 |
| Slika 17. Oblik konusnih trnova alata, sa i bez navoja na bočnom dijelu [13] | 25 |
| Slika 18. Skica vrha alata [15] | 26 |
| Slika 19. Skica poprečnog presjeka zavara dobivenog FSW postupkom zavarivanja: | 28 |
| Slika 20. Preklop limova prilikom zavarivanja | 32 |
| Slika 21. Dimenzije korištenih alata | 33 |
| Slika 22. Slika alata korištenih u eksperimentalnom dijelu rada | 34 |
| Slika 23. Slika glodalice Alfa 5 | 35 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 24. Pločice postavljene u škrip, prije procesa zavarivanja | 36 |
| Slika 25. Postupak zavarivanja pločica | 37 |
| Slika 26. Zavarene pločice..... | 38 |
| Slika 27. Uređaj Inspekt blue 20 | 39 |
| Slika 28. Zavarena pločica prije početka ispitivanja | 40 |
| Slika 29. Element opterećen dvjema silama [20] | 41 |
| Slika 30. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 4 | 43 |
| Slika 31. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 5 | 45 |
| Slika 32. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 6 | 47 |

Popis tablica

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Broj okretaja i brzina zavarivanja pojedinih materijala | 11 |
| Tabela 2. Karakteristike glodalice Alfa 5 | 36 |
| Tabela 3. Parametri zavarivanja pločica | 37 |
| Tabela 4. Rezultati smičnog ispitivanja uzoraka zavarenih alatom broj 2 | 43 |
| Tabela 5. Rezultati smičnog ispitivanja uzoraka zavarenih alatom broj 1 | 45 |
| Tabela 6. Rezultati smičnog ispitivanja | 47 |

Uvod

U ovom diplomskom radu obrađena je tema pod nazivom „Utjecaj alata na mehanička svojstva zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom“. Diplomski rad podijeljen je na 2 dijela, teoretski dio i eksperimentalni dio.

U teoretskom dijelu diplomskog rada objašnjen je postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom (eng. Friction Stir Welding – FSW), postupak točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom (engl. Friction Stir Spot Welding – FSSW), opisani su utjecajni parametri u FSSW postupku, navedene su prednosti i nedostaci FSSW postupka, navedene su i opisane vrste alata, materijali za izradu alata, te utjecaj alata na zavareni spoj.

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada provedeno je i opisano točkasto zavarivanje rotirajućim alatom aluminijskih limova te ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Prilikom točkastog zavarivanja rotirajućim alatom korištena su 2 alata za zavarivanje, korištene su različite brzine rotacije alata te različito vrijeme trajanja zavarivanja pločica. Prilikom ispitivanja mehaničkih svojstva zavarenog spoja ispitivane su pločice opterećene na smik te su analizirane vrijednosti sile potrebne za razdvajanje pločica. Eksperimentalni dio odrađen je u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Zavarivanje je provedeno na limovima aluminijeve legure EN AW-6060 debljine 2 mm.

1. Aluminij

Aluminij je 13. element skupine periodnog sustava elemenata. Ime aluminij potječe od latinske riječi alumen. Vrlo je rasprostranjen u raznim rudama i mineralima, kao što su boksit, korund, kriolit, gline i glinenci. Proces odvajanja aluminija od prethodno navedenih spojeva moguć je jedino elektrolizom. U procesu elektrolize potrebno je oko 16 kWh električne energije za dobivanje jednog kilograma čistog aluminija, što sam proces čini jako skupim postupkom.

Aluminij kao tehnički materijal ima sljedeće karakteristike:

- gustoća 2700 kg/m³
- talište 660 °C
- modul elastičnosti 69000 MPa
- granica razvlačenja od 20 do 120 MPa
- vlačna čvrstoća od 40 do 180 MPa
- istežljivost od 4 do 50 %
- nije magnetičan
- oksidira u dodiru sa zrakom
- ne mijenja boju sa promjenom temperature
- zagrijavanjem ili hlađenjem ne mijenja kristalnu strukturu.

Tri osnovna svojstva korištenja aluminija kao tehničkog materijala su sljedeća:

- povoljan omjer čvrstoće i gustoće
- povoljan omjer električne vodljivosti i gustoće
- velika korozijska postojanost.

Nelegirani aluminij uglavnom se koristi zbog dobre korozijske postojanosti i niske gustoće. Njegova antikorozivnost temelji se na postojanju gustog nepropusnog sloja oksida koji se stvara na površini metala na zraku i u vodenim otopinama. Što je aluminij jače oksidiran, nastali oksidni sloj je otporniji. Najvažniji postupak poboljšavanja prirodnog sloja oksida je postupak anodizacije. Osim postupkom anodizacije, kvaliteta prirodnog sloja oksida može se poboljšati kemijskim fosfatiranjem i kromatiranjem.

Osim dobre korozijske postojanosti, aluminij ima i visoku toplinsku i električnu vodljivost. Zbog niskog modula elastičnosti koristi se za nosače koji moraju biti gipki. Toplinska rastezljivost aluminijske je dvostruko veća od toplinske rastezljivosti čelika pa se često koristi za izradu posuda i cjevovoda u tehnici hlađenja.

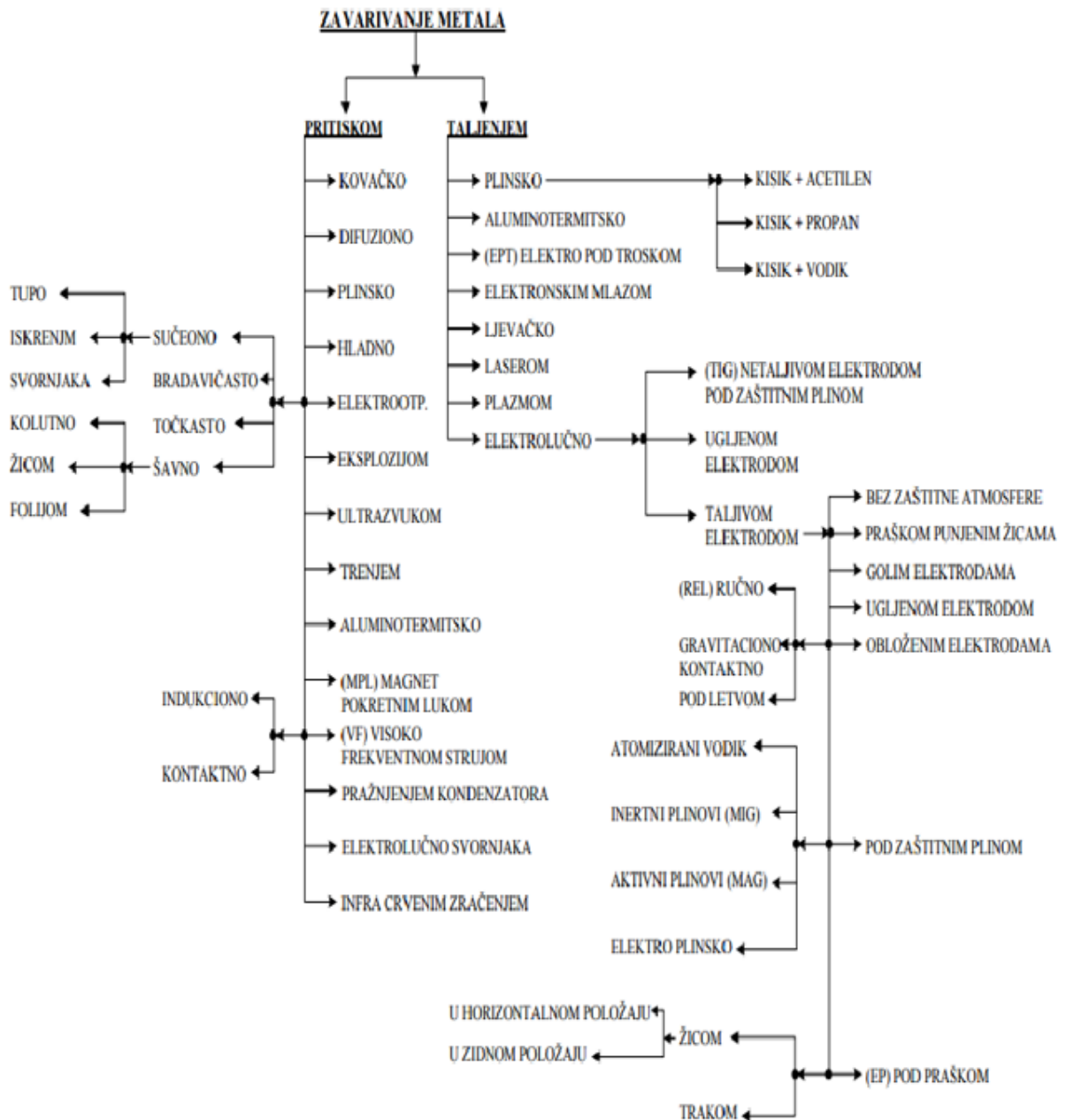
Čisti aluminij koristi se kod izrade aparata, posuda i rezervoara u prehrambenoj i kemijskoj industriji, kod izrade kuhinjskog posuđa, u graditeljstvu, kod izrade proizvoda za pakiranje, izrade električnih vodiča.

Cilj legiranja aluminijske je poboljšanje mehaničkih svojstava aluminijske kao što su vlačna čvrstoća, tvrdoća, krutost, rezljivost. [1]

2. Zavarivanje

Postupak zavarivanja je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala sa ciljem dobivanja čvrstog i homogenog spoja. Postupak zavarivanja možemo podijeliti u 2 osnovne skupine:

- zavarivanje taljenjem
- zavarivanje pritiskom.



Slika 1. Klasifikacija postupka zavarivanja [2]

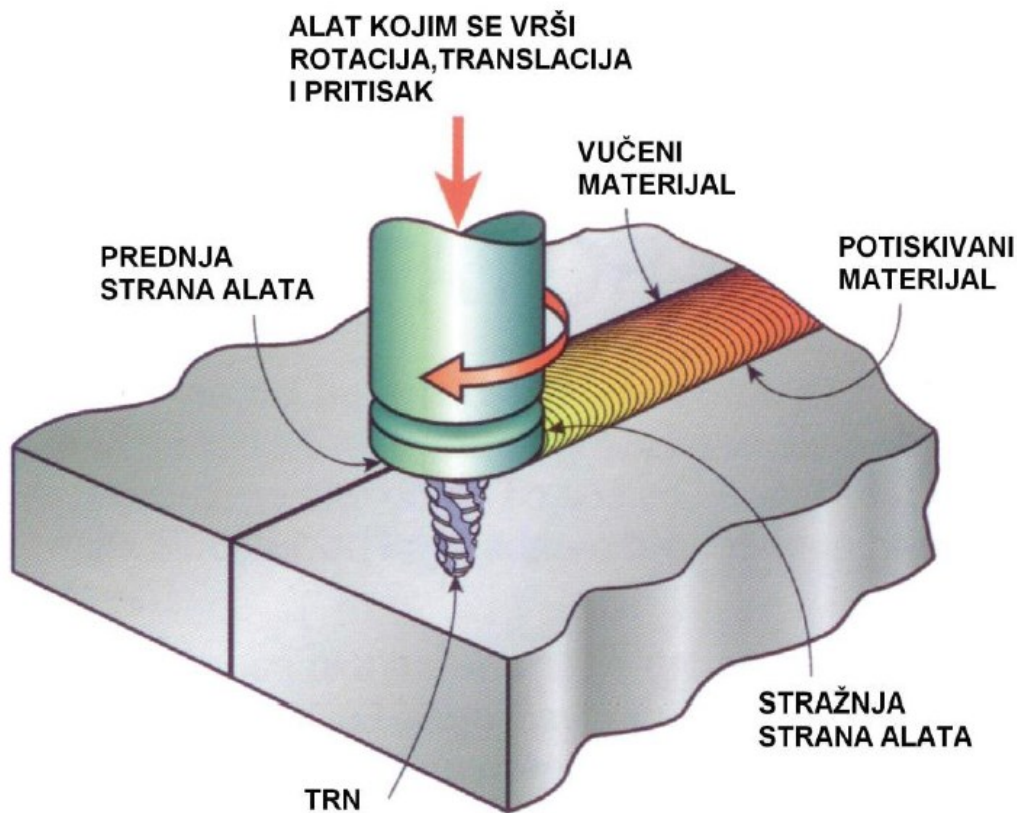
Zavarivanje trenjem spada u skupinu zavarivanja pod pritiskom. Prilikom zavarivanja trenjem dijelovi između dodirnih površina se zagrijavaju toplinom trenja koja nastaje uslijed vrtnje jednog ili oba dijela koji se međusobno zavaruju. Zona utjecaja topline je vrlo uska. Zavarivati trenjem mogu se metali i njihove legure, ali i tvrdi polimeri. Također je moguće međusobno zavariti i raznorodne materijale. Ovaj postupak zavarivanja primjenjuje se:

- u automobilskoj industriji
- kod zavarivanja ventila
- kod zavarivanja čepova
- kod zavarivanja tlačnih posuda
- kod zavarivanja pogonskih vratila
- kod zavarivanja alata. [3]

3. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (eng. Friction Steel Welding) je proces zavarivanja osnovnog materijala u omekšanom stanju, što omogućuje spajanje materijala pomoću topline dobivene trenjem i mehaničkim miješanjem materijala. Shema postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom prikazana je na slici broj 2.

Postupak je nastao 1991. godine na institutu „The Welding institute“ u Velikoj Britaniji kao rezultat traženja novih postupaka zavarivanja aluminijevih legura. Cilj postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom bio je izbjegavanje problema koji su se javljali kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja kao što su lokalno zagrijavanje materijala preko točke taljena, što za posljedicu ima smanjenje mehaničkih svojstava materijala. Prva primjena ovog postupka zavarivanja u proizvodnji bila je zavarivanje aluminijevih legura u pogonima SAPA u Švedskoj i u brodogradilištu Hydro Marine Aluminium u Norveškoj. Kasnije se postupak počeo primjenjivati u automobilskoj industriji u Norveškoj, Švedskoj i Australiji. [4]

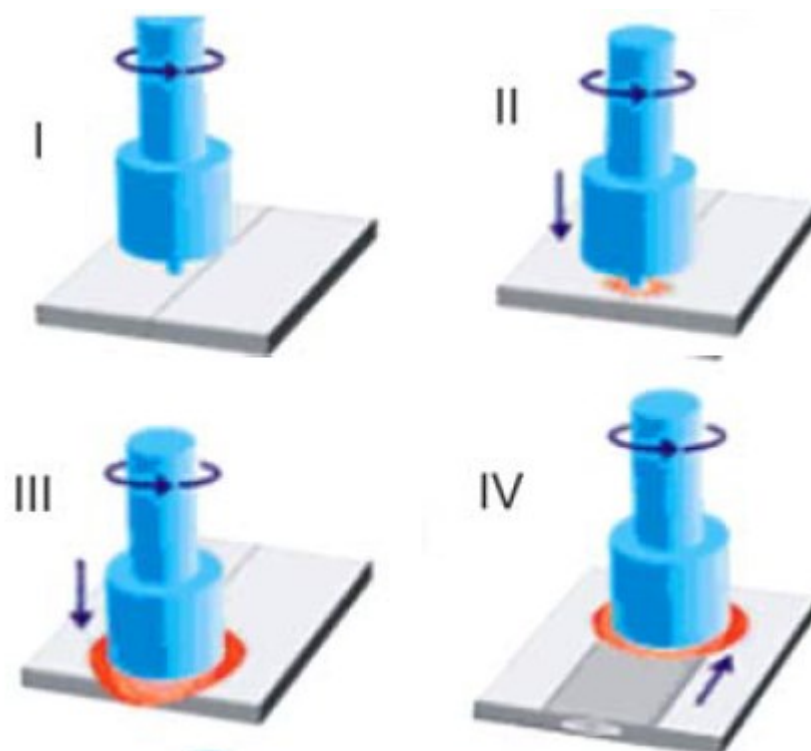


Slika 2. Shema zavarivanja FSW postupkom [4]

3.1. Faze u procesu zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Proces zavarivanja trenjem rotirajućim alatom možemo podijeliti u četiri osnovne faze koje su prikazane na slici broj 3.

Prva faza procesa je faza u kojoj alat kreće sa svojim gibanjem oko osi (rotacijom) te se spušta do materijala koji se zavaruju. Dodirom trna alata i materijala koji se zavaruju počinje druga faza. Tijekom druge faze trn alata prodire kroz limove koji se zavaruju, sve do trenutka kada čelo alata dotakne materijale koji se zavaruju. Prilikom dodira čela sa osnovnim materijalom počinje faza broj tri. Faza broj tri traje vrlo kratko, do trenutka dok alat ne počne translacijsko gibanje između limova. Četvrta faza odnosi se na dio u kojem se alat određenom brzinom kreće u pravcu zavarivanja i traje sve do kraja translacijskog gibanja alata. [5]



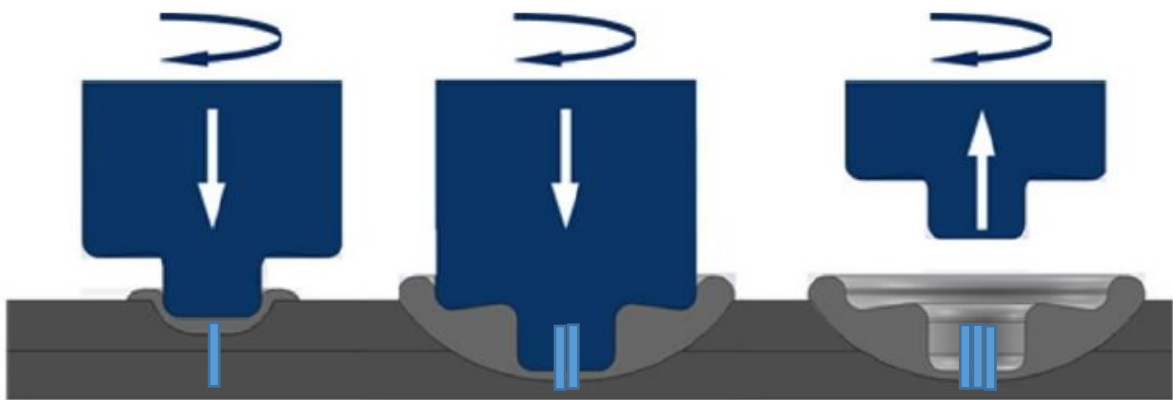
Slika 3. Faze procesa zavarivanja FSW postupkom [5]

4. Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Postupak točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom (engl. Friction Stir Spot Welding) je postupak zavarivanja materijala u čvrstom stanju koji se razvio iz FSW postupka. Za razliku od FSW postupka koji ima četiri faze, kod FSSW postupka nema faze koja se odnosi na translacijsko gibanje alata između limova. Rezultat postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom bez linearnog gibanja alata je lokaliziran točkasti zavareni spoj. FSSW postupak zavarivanja sastoji se od tri faze:

- uranjanje
- miješanje
- izvlačenje. [6]

Faze postupka prikazane su na slici broj 4.



Slika 4. Faze procesa zavarivanja FSSW postupkom [6]

Osnovna ideja prilikom razvoja FSSW postupka zavarivanja bila je zamjena tehnologija spajanja uz dodavanje mase, kao što je postupak zakivanja, te mogućnost spajanja materijala različitih vrsta koji su teško spojivi ostalim postupcima zavarivanja.[6]

4.1. Utjecajni čimbenici procesa zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Utjecajni čimbenici kod procesa zavarivanja trenjem rotirajućim alatom su sljedeći:

- parametri zavarivanja
- geometrija i oblik alata
- oblik spoja.

Parametri zavarivanja imaju utjecaj na unos topline prilikom zavarivanja, tok materijala te raspodjelu topline, čime se utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara.

Parametri zavarivanja koji utječu na izgled, mehanička svojstva, mikrostrukturu zavarenog spoja su:

- brzina rotacije alata ω (okr/min)
- vrijeme zadržavanja alata t (s)
- brzina zavarivanja v (mm/min)
- nagib alata u odnosu na osnovni materijal α
- sila pritiska alata na materijal F_N (N).

Parametri zavarivanja ovise i o obliku alata te o vrsti materijala koji se zavaruje, odnosno o njegovim mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva osnovnog materijala kao što su tvrdoća, udarni rad loma i vlačna čvrstoća određuju plastičnu deformaciju te u konačnici mehanička svojstva nastalog spoja. Mehanička svojstva osnovnog materijala određuju i tok omekšanog materijala oko trna alata te nastanak zavarenog spoja. Postupkom zavarivanja trenjem rotirajućim alatom lakše se zavaruju materijali koji imaju manju tvrdoću i manju vlačnu čvrstoću. [7]

4.1.1. Brzina rotacije alata

Brzina rotacije alata ω (okr/min) navodi se kao najutjecajniji faktor prilikom zavarivanja, jer ima direktan utjecaj i na brzinu zavarivanja v (mm/min). Što je brzina rotacije alata veća, povećava se unos topline te se smanjuje brzina ohlađivanja u području zavarivanja. Povećanjem brzine rotacije alata ujednačeniji je raspored tvrdoće na spoju te se povećava i veličina zrna. Prevelika brzina rotacije alata dovodi do velikog utjecaja topline na zavareni spoj što rezultira nepovoljnom mikrostrukturom zavarenog spoja. Uvijek postoji optimalni odnos brzine rotacije alata i brzine posmičnog gibanja alata za vrstu i debljinu metala koji se zavaruje. Kod zavarivanja aluminijevih legura vrijedi sljedeća jednadžba [7]:

$$\frac{T}{T_m} = K \left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4} \right)^\alpha$$

gdje je T (°C) temperatura osnovnog materijala pri zavarivanju, T_m (°C) temperatura taljenja osnovnog materijala, α eksponent raspona od 0.04 do 0.06, K konstantna vrijednost od 0.65 do 0.75 [7].

4.1.2. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja ima značajan utjecaj na ekonomičnost cjelokupnog procesa zavarivanja. Ovisi o vrsti legure koja se zavaruje, brzini rotacije alata, dimenziji alata, obliku alata, dubini prodiranja alata u osnovni materijal te obliku spoja. Velikom brzinom zavarivanja dolazi do smanjenja utjecaja topline po dužini zavara što može dovesti do nedovoljnog povezivanja limova i/ili nastanku pukotina. Nižom brzinom zavarivanja dobiva se zavareni spoj veće vlačne čvrstoće. Premala brzina zavarivanja može dovesti do stvaranja crvolike pore što rezultira negativnim utjecajem na mehanička svojstva zavara. [7]

Kod FSSW postupka nema translacijskog gibanja alata, tako da je kod tog postupka ovaj parametar isključen te vrijedi samo za FSW postupak.

U tabeli broj 1 prikazani su podaci o broju okretaja te translacijskoj brzini zavarivanja FSW postupkom kod različitih materijala koji su zavarivani.

Tabela 1. Broj okretaja i brzina zavarivanja pojedinih materijala [7]

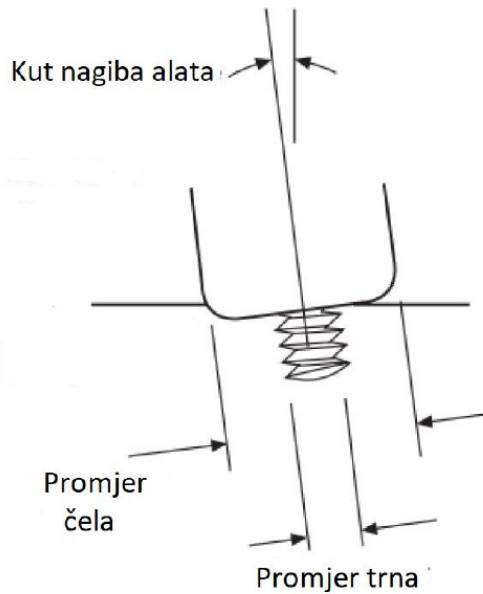
| Legura | Broj okretaja alata (okr/min) | Brzina zavarivanja (mm/s) |
|------------|-------------------------------|---------------------------|
| Al 6061 | 225 | 4,66 |
| Al 5083 | 180 | 1,91 |
| Al 7075 | 250 | 1,27 |
| Al 6082 | 230 | 4,66 |
| Čelik 1010 | 280 | 1,27 |
| Ti-6Al-4 V | 300 | 1,69 |

4.1.3. Vrijeme zadržavanja alata

Vrijeme zadržavanja alata kod FSW postupka zavarivanja odnosi se na vrijeme na samom početku i na završetku postupka zavarivanja. Ono je puno bitnije kod FSSW postupka zavarivanja, budući da kod tog postupka nema translacijskog kretanja alata. Kod FSSW postupka vrijeme zadržavanja alata je ukupno vrijeme postupka zavarivanja.

4.1.4. Nagib alata u odnosu na osnovni materijal

Prilikom zavarivanja alat za zavarivanje može biti postavljen okomito u odnosu na materijal koji se zavaruje ili može biti postavljen pod određenim kutom. Slika broj 5 prikazuje nam alat koji je postavljen pod kutom u odnosu na materijal koji se zavaruje. Kut kojim iskazujemo nagib alata α je kut između osi alata za zavarivanje i normale na površinu materijala (limova) koji se zavaruje.



Slika 5. Promjer čela alata, promjer trna alata, kut nagiba alata [8]

Ako je alat nagnut u smjeru zavarivanja, tada je kut α negativan. U slučaju zavarivanja s negativnim kutom vrši se veći pritisak prednjeg dijela alata na materijal te se na taj način materijal dodatno predgrijava. Predgrijavanje je potrebno kod materijala koji se teže zavaruju, odnosno kod materijala sa višom temperaturom taljenja i materijala koji imaju visoku čvrstoću.

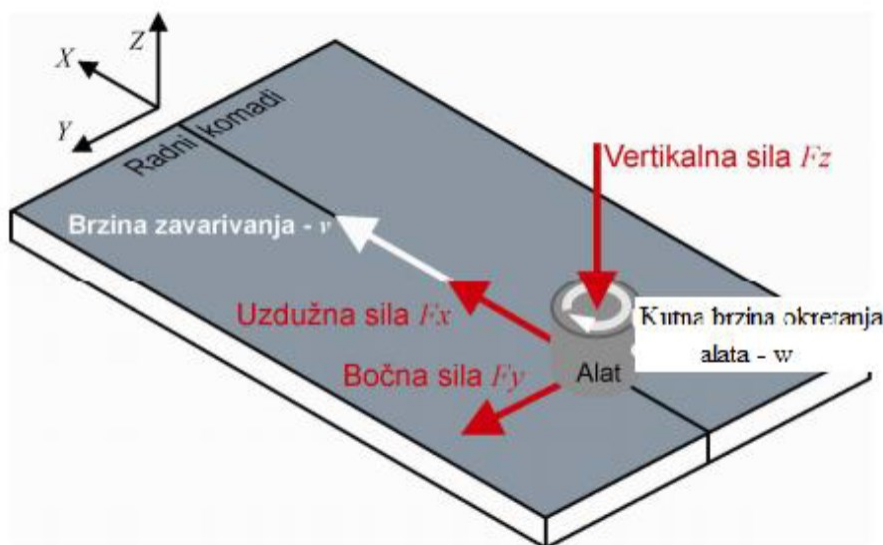
Ukoliko je alat nagnut suprotno od smjera zavarivanja, tada je kut α pozitivan. Ovaj slučaj je češći u praksi, glavni razlog je što se pozitivnim kutom alata povećava pritisak na materijal iza trna alata. Povećanjem pritiska na materijal iza trna alata povećava se i pritisna sila na materijal te se materijal pomiče sa vučene na kovanu stranu. Ukoliko se kut nagiba alata pomakne sa 0° na 3° dobivamo i do 300% veću silu pritiska na materijal. [7]

4.1.5. Sila pritiska alata na materijal

Prilikom zavarivanja FSW postupkom prisutne su sljedeće sile:

- vertikalna (aksijalna) sila,
- uzdužna (longitudinalna) sila,
- bočna sila.

Slika broj 6 prikazuje sile pritiska alata na materijal te njihove smjerove.



Slika 6. Prikaz sile koje su prisutne prilikom FSW postupka zavarivanja [9]

Vertikalna sila F_z je pritiska sila kojom alat djeluje na materijal. Prilikom prodiranja trna alata kroz materijal ona ima najveću vrijednost. Nakon prodiranja trna kroz materijal ona se smanjuje sve dok čelo alata ne dohvati gornju površinu zavarivanih materijala. Prilikom dodira čela alata sa zavarivanim materijalima vertikalna sila ponovno raste sve do uspostavljanja stabilnog režima zavarivanja. Tada vertikalna sila ponovno počinje padati sve do završetka zavarivanja. Što je vlačna čvrstoća materijala koji se zavaruju veća, potrebna je veća vertikalna sila zavarivanja. Optimalna vertikalna sila zavarivanja može se definirati kao minimalna sila zavarivanja kod koje nastaju zavari bez pogrešaka.

Uzdužna sila F_x je sila koja djeluje paralelno sa smjerom kretanja alata. Pozitivan smjer sile je smjer kretanja alata, prisutna je samo kod FSW postupka zavarivanja.

Bočna sila F_y djeluje okomito na smjer kretanja alata. Pozitivan smjer sile definira se prema istosmjernoj strani zavara, prisutna je samo kod FSW postupka zavarivanja. [9]

4.2. Zavarljivost materijala FSW i FSSW postupcima zavarivanja

FSW i FSSW postupci zavarivanja u početku su bili namijenjeni isključivo za zavarivanje aluminijevih legura. Daljnjim ispitivanjima te razvojem alata za zavarivanje dobivena je mogućnost zavarivanja ostalih metala, ali i materijala koji ne spadaju u skupinu metala. Osim aluminijskih i aluminijskih legura zavarivati se mogu i sljedeći materijali:

- bakar i legure bakra
- olovo
- titan i legure titana
- legure magnezija
- legure nikla
- cink
- polimeri
- niskouglični čelici
- austenitni, martenzitni i duplex čelici. [9]

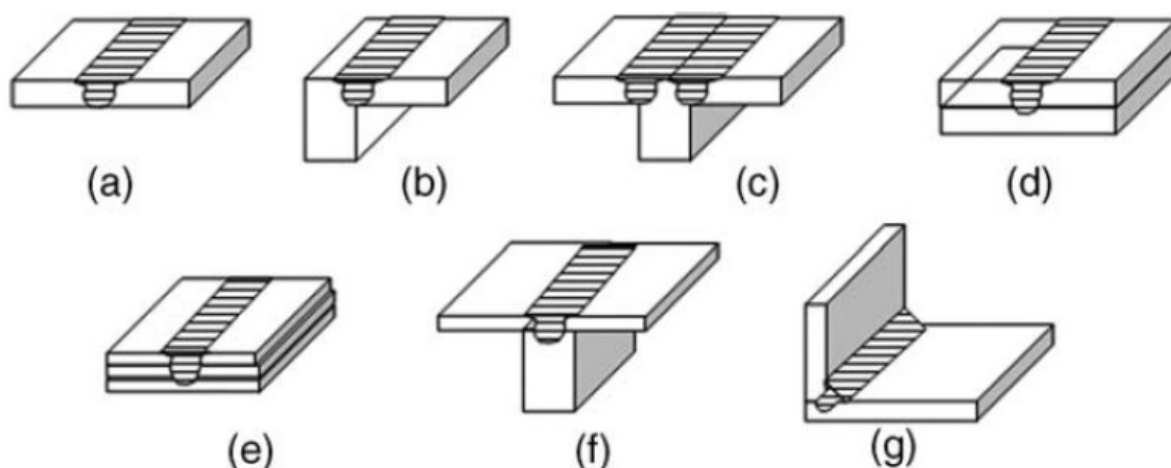
Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika, ultra čvrstih čelika i čelika povišene čvrstoće potrebno je koristiti alate za zavarivanje koji imaju mogućnost podnošenja povećanog toplinskog opterećenja. Materijali koji se koriste za izradu takvih vrsta alata su:

- polikristalni borov nitrid
- legura na osnovi nikla i kobalta
- legura na osnovi volframa
- legura na osnovi molibdena.

Alati od gore navedenih materijala i legura su znatno skuplji od alata izrađenih od alatnih čelika ili čelika za poboljšanje koji se koriste za zavarivanje aluminijevih legura, stoga se i u današnje vrijeme FSW postupak zavarivanja uglavnom primjenjuje kod zavarivanja aluminijskih i aluminijskih legura. [9]

4.3. Vrste spojeva za FSW postupak zavarivanja

Postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom osmišljen je za sučeljeno zavarivanje aluminijevih legure. Osim sučeljenih spojeva, koji su i u današnje vrijeme najčešći oblik spojeva zavarenih FSW postupkom, na slici broj 7 prikazane su i ostale vrste spojeva koji se mogu postići FSW postupkom zavarivanja limova. Prilikom zavarivanja u sučeljenom ili preklopnom spoju važno je pravilno stegnuti limove te onemogućiti njihovo gibanje prilikom zavarivanja. Također je ispod limova potrebno postaviti podložnu ploču koja omogućuje hidrostatski pritisak pri miješanju materijala i istovremeno sprječava izmicanje omekšanog materijala. Prilikom zavarivanja limova različite debljine u sučeljenom spoju, ispod tanjeg lima treba biti postavljena podložna ploča tako da se izjednači gornja visina oba lima te na taj način obje ploče imaju jednak pritisak alata prilikom zavarivanja. [10]



Slika 7. Oblikovanje spojeva za FSW postupak zavarivanja:

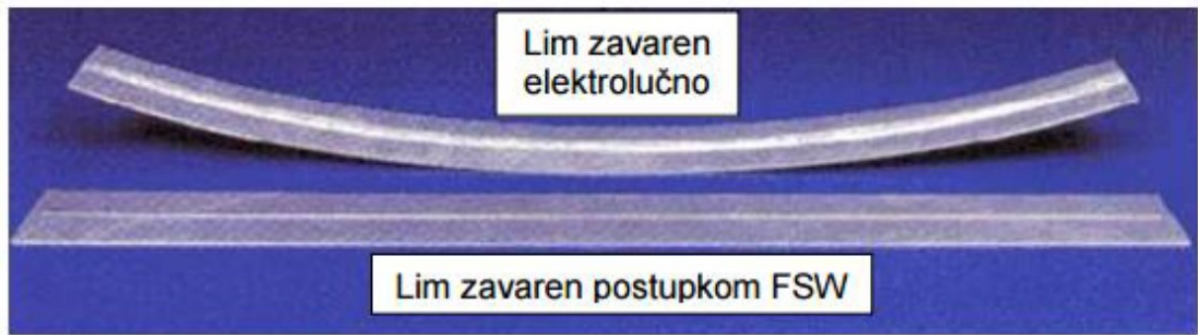
- a) sučeljeni spoj,
- b) rubni sučeljeni spoj,
- c) T-sučeljeni spoj,
- d) preklopni spoj,
- e) višestruki preklopni spoj,
- f) T-spoj,
- g) kutni spoj. [10]

4.4. Prednosti i nedostaci postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom nudi mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja. Osnovna prednost ovog postupka je činjenica da se spajanje materijala odvija u čvrstom stanju te su na taj način eliminirane sve moguće negativne posljedice taljenja metala kao što su nastanak poroznosti, nastanak pukotina, povećanje tvrdoće u zavarenom spoju itd. Ostale prednosti zavarivanja trenjem rotirajućim alatom su:

- nije potreban dodatni materijal
- mogućnost potpune automatizacije postupka
- dobivena sitnozrnata homogena struktura zavarenog spoja
- dobra mehanička svojstva zavarenog spoja
- dobra stabilnost postupka
- dobra ponovljivost postupka
- nema zaštitnih plinova
- nema stvaranja štetnih plinova
- nema naknadne obrade površina
- estetski lijep zavar
- mala deformacija nakon zavarivanja
- moguće zavarivanje u svim položajima
- manja potrošnja el. energije u odnosu na ostale postupke zavarivanja
- neprisutnost distorzije spoja. [10]

Na slici broj 8 prikazan je lim zavaren FSW postupkom zavarivanja kod kojeg nema distorzije te lim zavaren elektrolučnim postupkom zavarivanja kod kojeg je došlo do distorzije.



Slika 8. Distorzije limova zavarenih elektrolyčnim postupkom u usporedbi sa FSW postupkom zavarivanja [11]

Kao i kod svakog postupka zavarivanja i kod postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom postoje određeni nedostaci. Uslijed nedovoljne temperature zavarivanja, premale brzine okretanja alata ili prevelike brzine uzdužnog kretanja alata mogu se pojaviti plastične deformacije materijala. Osim mogućnosti pojave plastične deformacije materijala, kod zavarivanja trenjem rotirajućim alatom prisutni su i sljedeći nedostaci:

- na kraju zavara ostaje otvor zbog izlaza alata
- potrebna velika vertikalna sila na materijal
- potrebno dobro stegnuti limove koji se zavaruju kako ne bi došlo do gibanja prilikom samog procesa zavarivanja
- prilikom stezanja limova potrebno je kontrolirati razmak između limova
- nije moguće zavarivanje kod kojeg se traži dodatni materijal
- manja fleksibilnost procesa u odnosu na elektrolyčni postupak zavarivanja. [10]

4.5. Primjena FSW postupka zavarivanja

Prvu veću primjenu FSW postupak zavarivanja doživio je u brodogradnji. U tvornici „SAPA“ u Švedskoj pokrenuto je zavarivanje jednostavnih aluminijskih platformi uređaja za zamrzavanje ribe. S vremenom je u istoj tvornici razvijen čitav niz automatiziranih strojeva za FSW postupak zavarivanja.

FSW postupak zavarivanja i u današnje vrijeme ima široku primjenu u brodogradnji. Koristi se u izgradnji paluba, blokova motora, pregrada, podova, jarbola, konstrukciji broda, čamaca za jedrenje, platforma za slijetanje helikoptera.

U posljednjih nekoliko godina FSW postupak ima sve širu primjenu u željezničkoj industriji. Primjenjuje se u proizvodnji vagona, cisterni, teretnih vagona, tramvaja. Također se koristi pri izradi vlakova nove generacije kod zavarivanja noseće konstrukcije vlaka, bočnih stranica vlakova, krovova, podova te ostalih dijelova vlaka koji su izrađeni od aluminijevih legura.

U svemirskoj industriji je FSW postupak zavarivanja također našao svoju primjenu, pa se spojevi spremnika za gorivo na svemirskoj letjelici zavaruju isključivo FSW postupkom.

U zrakoplovnoj industriji FSW postupak polako zamjenjuje dosadašnje spojeve zakovicama, pa tako u zrakoplovima proizvedenima unazad nekoliko godina možemo naći i do 40.000 spojeva izvedenih FSW postupkom zavarivanja.

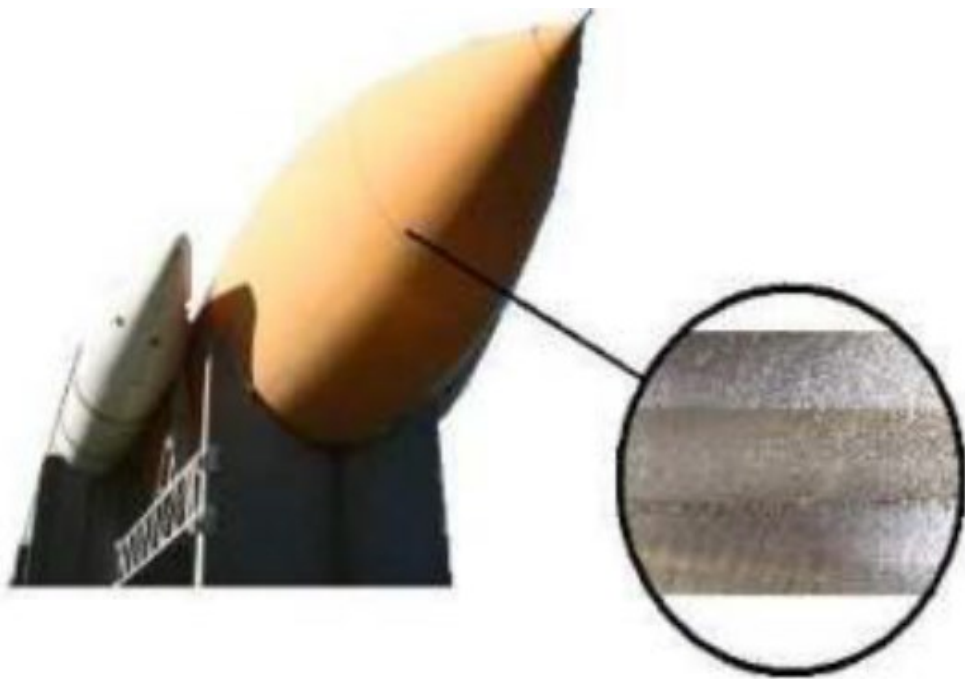
Automobilska industrija primjenjuje FSW postupak zavarivanja kod izrade motora, izrade šasija, aluminijskih naplataka, spremnika za gorivo, izradi prikolica, autobusa, vozila za prijevoz na aerodromima, okvira motocikala.

FSW postupak se primjenjuje u proizvodnji kućišta elektro motora, rashladnih uređaja, rashladnih ploča, bijele tehnike, kuhinjske opreme, plinskih boca, itd. [8,10]

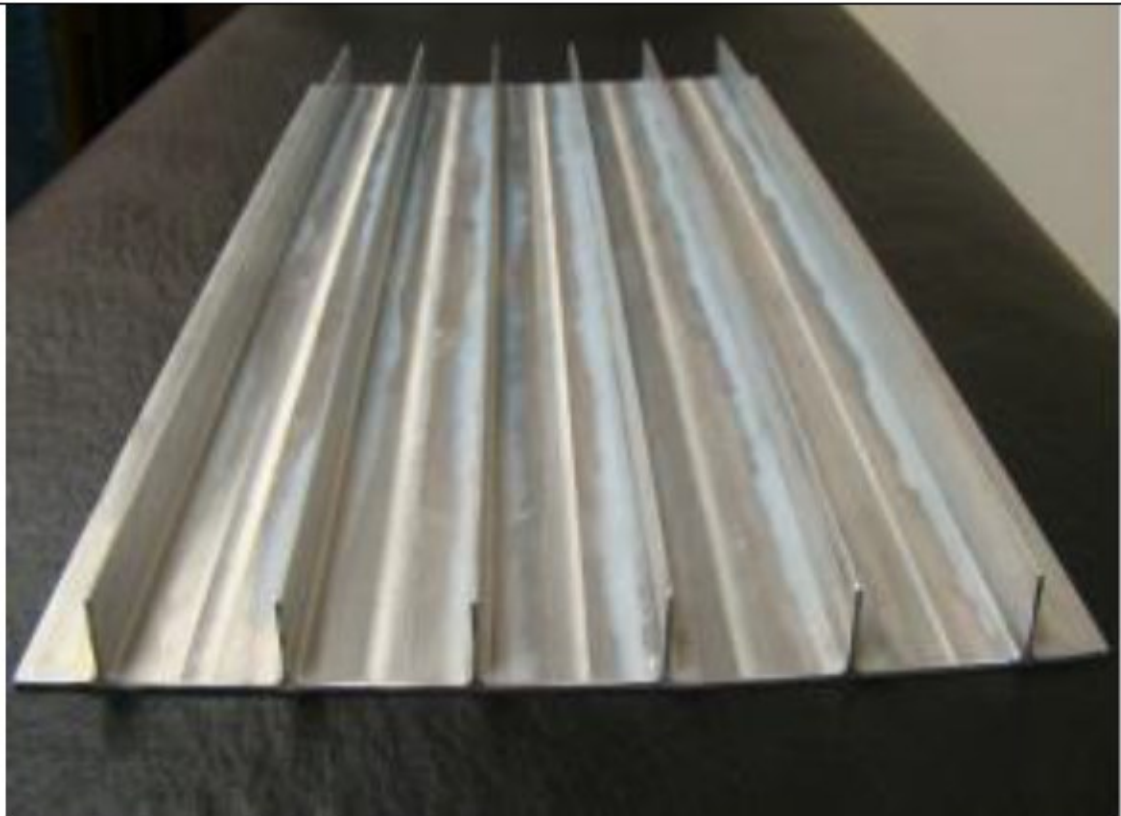
Na slikama pod rednim brojevima 9, 10, 11 i 12 nalaze se primjeri zavarivanja FSW postupkom u prethodno navedenim granama industrije.



Slika 9. Trup i krilo zrakoplova zavareni FSW postupkom [9]



Slika 10. Spremnik goriva svemirske rakete zavaren FSW postupkom [9]



Slika 11. Paluba broda zavarena FSW postupkom [9]

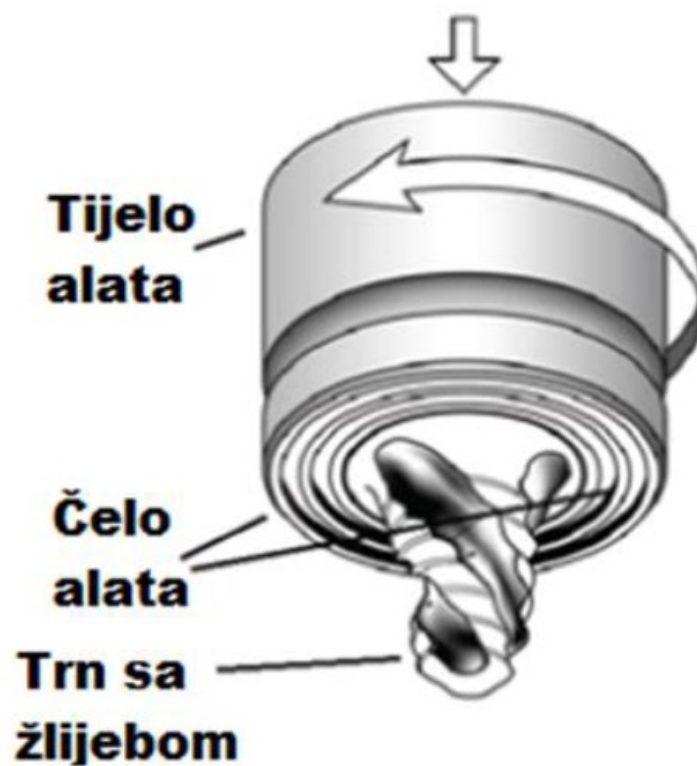


Slika 12. Primjena FSW postupka u automobilskoj industriji [8]

4.6. Alat za zavarivanje

Alat za zavarivanje najutjecajniji je čimbenik kod cjelokupnog postupka zavarivanja. Geometrija alata ima ključnu ulogu u tečenju materijala te određuje brzinu kod koje je FSW postupak zavarivanja optimalan. Alat za FSW postupak zavarivanja sastoji se od gornjeg dijela kojeg nazivamo tijelo alata te donjeg dijela kojeg nazivamo trn alata. Alat sa označenim dijelovima alata se nalazi na slici broj 13. Alat za zavarivanje ima 2 osnovne funkcije:

- lokalizirano zagrijavanje
- tečenje materijala. [12]



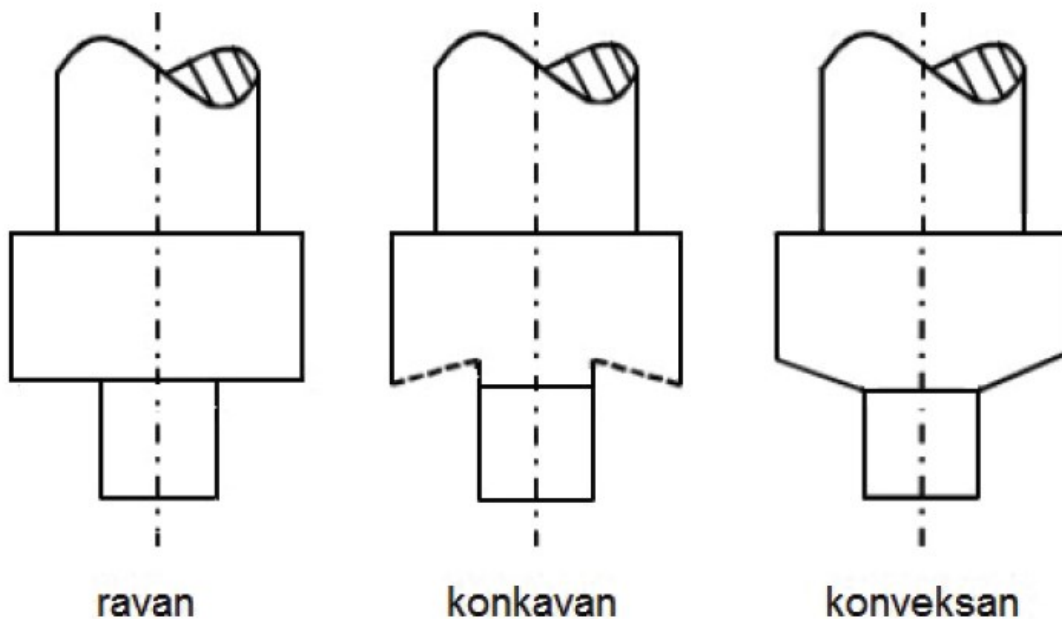
Slika 13. Alat za zavarivanje FSW postupkom [10]

Tijelo alata može biti cilindrično ili konusno. Oblik tijela alata nema značajan utjecaj na zavarivanje zbog zanemarivog ulaza tijela u materijal prilikom zavarivanja.

Zagrijavanje koje se događa u početnoj fazi rezultat je trenja radnog dijela i vrha alata. Dodatno zagrijavanje rezultat je deformacije materijala. Alat nastavlja sa prodiranjem u radni dio (materijal koji se zavaruje) sve do trenutka dok čelo alata ne dotakne radni dio. Trenje koje se javlja između radnog dijela i čela alata doprinosi stvaranju topline. [12]

4.7. Čelo alata

Čelo alata, osim što ima funkciju poravnanja zagrijanog materijala, ima funkciju „miješanja“ i „pomicanja“ omekšanog materijala. Čelo uzrokuje nastanak trenja i razvijanja topline u dodiru sa radnim dijelom. Sa gledišta stvaranja topline, najbitnija dimenzija alata je promjer čela alata. Čelo alata može biti ravno, konkavno ili konveksno. Razlika između ravnog, konkavnog i konveksnog čela alata prikazana je na slici broj 14. [13]



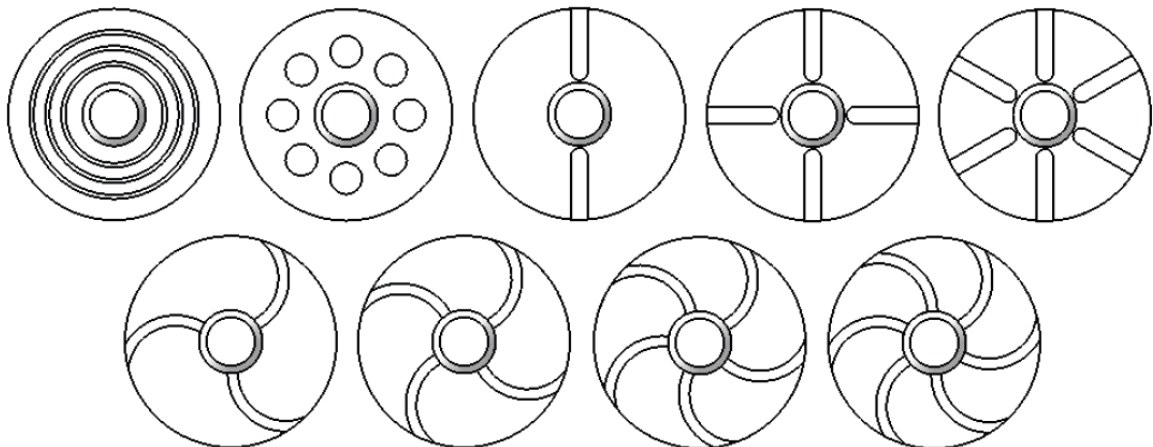
Slika 14. Oblici čela alata [13]

Alati sa konkavnim uzdužnim presjekom se najčešće koriste u praksi. Kut čela alata iznosi od 6° do 10° te ima funkciju sprječavanja izlaza omekšanog materijala. Prilikom utiskivanja alata u materijal na početku zavarivanja dio materijala ulazi u konkavnu šupljinu. Materijal koji je ušao u konkavnu šupljinu služi kao zaliha te stvara pritisak na preostali dio materijala. Pomicanjem alata prilikom zavarivanja materijal iz zalihe kontinuirano izlazi i ostaje u zavarenom spoju iza alata. Istovremeno novi materijal ispred alata ulazi u konkavnu šupljinu te dalje služi kao zaliha sve do završetka procesa zavarivanja. Prilikom zavarivanja konkavnim alatom vertikalna os zavarivanja mora biti postavljena od 1° do 3° suprotno od smjera zavarivanja da se omogući ulaz materijala ispred alata te poveća pritisna sila na izlazu alata.

Alati sa konveksnim uzdužnim presjekom nisu značajno u upotrebi zbog povećanog istiskivanja materijala. Također dolazi i do značajnog gubitka materijala na savinutim rubovima čela. Mogu se primjenjivati kod zavarivanja materijala koji imaju različite debljine te su postavljeni u sučeljeni spoj.

Alati sa ravnim uzdužnim presjekom nisu učinkoviti te nisu značajno u upotrebi. Osnovni nedostatak alata sa ravnim čelom alata je nemogućnost zadržavanja omekšanog materijala u području zavarivanja. Iz tog razloga alati sa ravnim čelom izrađuju se sa savinutim rubovima. Prednost ove vrste alata je jednostavnost izrade.

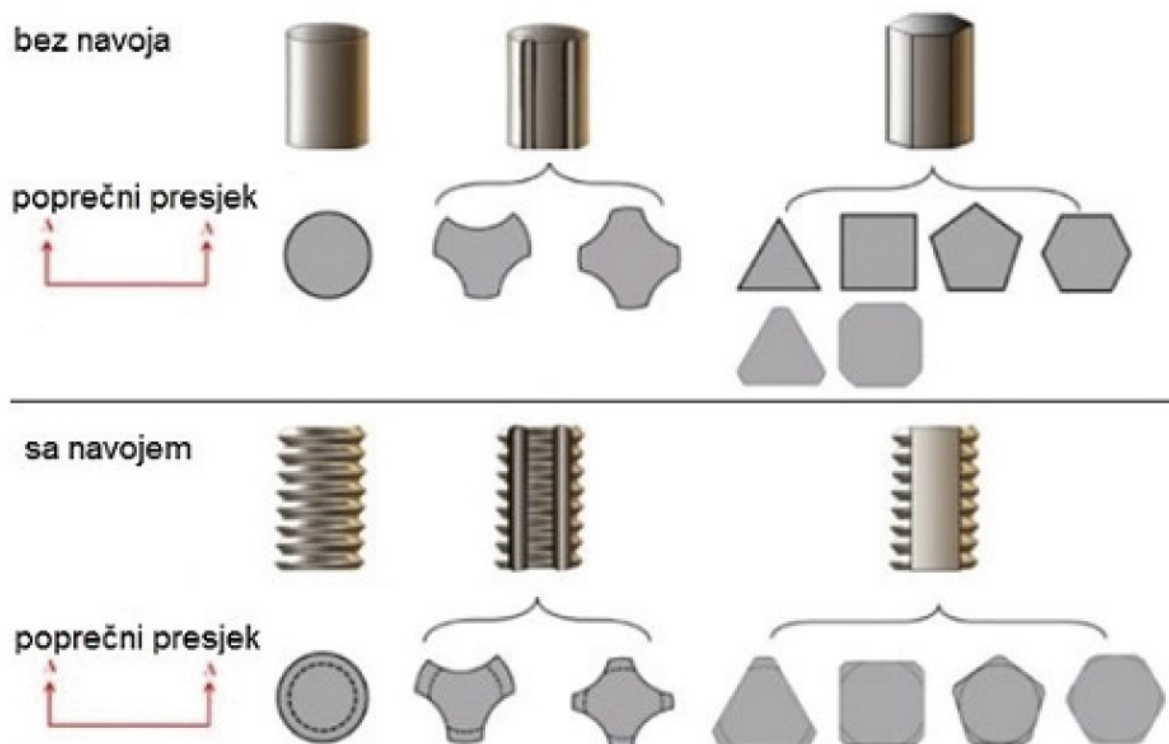
Površina čela alata može biti glatka ili može biti izrađena sa različitim oblicima žljebova odnosno gravura. Najčešći oblici žljebova na čelu alata prikazani su na slici broj 15. Alat koji na čelu ima žljebove daje lošiji izgled zavora. Najčešće korišteni alat je alat koji ima na površini čela žlijeb u obliku zavojnice. Zavojnica ima početak na rubu tijela alata, a završetak u centru ili uz rub trna alata. [13]



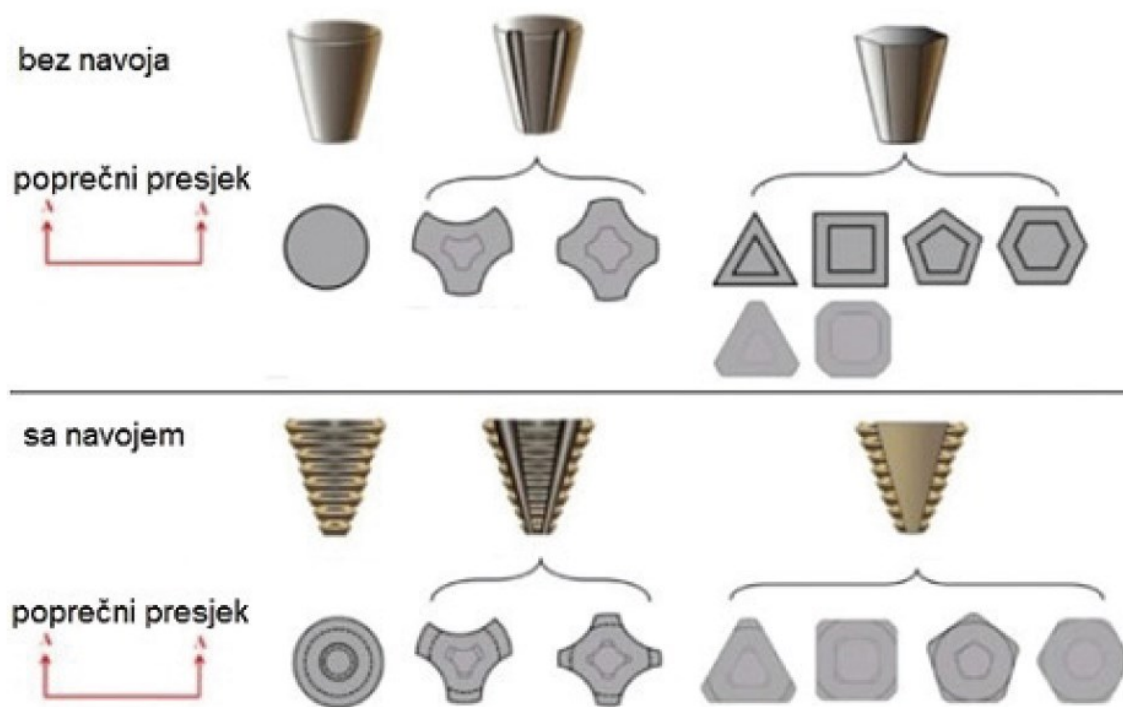
Slika 15. Najčešći oblici žljebova na čelu alata [14]

4.8. Trn alata

Alati za zavarivanje trenjem razlikuju se prema obliku trna alata. Trn alata može biti jednostavnog cilindričnog oblika sa ravnim dnom kao što je prikazano na slici broj 16, pa sve do složenih konusnih oblika trna koji imaju izrađene zavojnice ili navoje na bočnim površinama. Konusni oblici trna prikazani su na slici broj 17. Trn ima funkciju omogućiti tečenje materijala sa prednje na stražnju stranu uz istovremeno miješanje materijala. Trn također ima funkciju dovođenja topline trenjem. Trn alata može biti konusnog ili cilindričnog oblika, može također biti i sa ravnim stranicama na boku. Poprečni presjek trna može biti kružnica, trokut, kvadrat, peterokut, šesterokut, osmerokut itd. Jednostavni alati koji imaju trn cilindričnog oblika uglavnom se koriste za zavarivanje limova debljine do 12 mm, dok se alati sa konusnim oblikom trna koriste za zavarivanje limova veće debljine. [13]



Slika 16. Oblik cilindričnih trnova alata, sa i bez navoja na bočnom dijelu [13]



Slika 17. Oblik konusnih trnova alata, sa i bez navoja na bočnom dijelu [13]

Na trnu alata može biti navoj bilo kakvog oblika: metrički, trapezni, colni, obli, pilasti itd. Na bočnim stranama alata može biti izrađeno više žlijebova, bez obzira da li se radi o cilindričnom ili o konusnom trnu alata. Alati sa više žlijebova na bočnim stranama primjenjuju se kod zavarivanja mekših materijala kao što su aluminij i aluminijeve legure te bakar i legure bakra. Alati sa jednostavnim cilindričnim trnom omogućavaju duže trajanje alata. Oni se koriste za zavarivanje materijala koji imaju veću čvrstoću i tvrdoću.

Vrh trna alata može biti ravan, konusan ili zaobljen. Alati sa zaobljenim ili konusnim vrhom trna smanjuju potrebnu silu pritiska pri prodiranju trna u osnovni materijal na samom početku zavarivanja te samim time povećavaju vijek trajanja alata. [13]

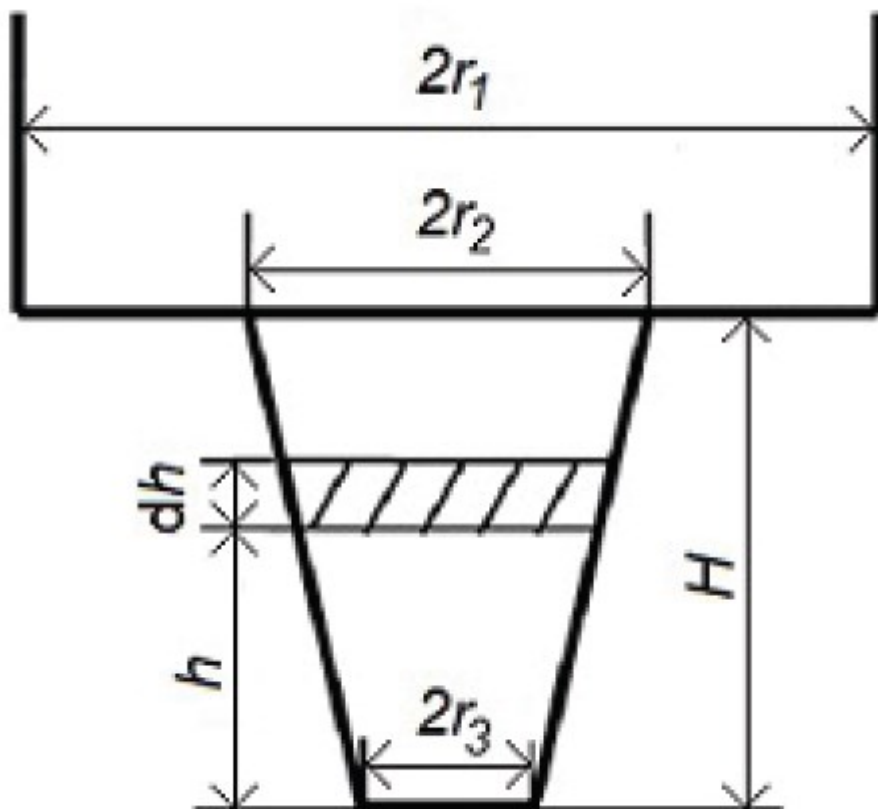
4.9. Utjecaj dimenzija i oblika alata na dovođenje topline

Veličina koja najbolje opisuje uvjete zavarivanja je ukupan unos topline po dužini zavora. Toplina koja nastaje prilikom zavarivanja trenjem rotirajućim alatom određena je:

- dimenzijom alata
- kinetičkim faktorom trenja
- brzinom rotacije alata
- brzinom zavarivanja
- silom pritiska alata na materijal. [15]

Kinetički faktor trenja μ_k određen je vrstom materijala koji se nalaze u dodiru prilikom zavarivanja te sa vrstom materijala iz kojeg je izrađen alat.

Na slici broj 18 prikazana je skica vrha alata sa svim dimenzijama koje imaju utjecaj na dovođenje topline trenjem prilikom zavarivanja.



Slika 18. Skica vrha alata [15]

Oblik alata za zavarivanje ima utjecaj na dovođenje topline preko količine i gustoće osnovnog materijala koji sudjeluje u miješanju prilikom stvaranja spoja. Ukoliko je u području oko trna i ispod čela alata veće miješanje materijala, kao posljedica većeg trenja imat ćemo i veće dovođenje topline. Prilikom zavarivanja omekšani materijal ulazi u utore na čelu alata te povećava trenje i miješanje materijala. Kod veće brzine rotacije alata i veće brzine zagrijavanja unos topline ovisi i o dodirnoj površini između alata i materijala koji se zavaruju. Čim je dodirna površina veća biti će veće trenje, a samim time i unos topline. Kod zavarivanja aluminijska veća dodirna površina može povećati zagrijavanje zbog sporog hlađenja alata, koji se kod zavarivanja aluminijska izrađuje od čelika, u odnosu na materijal koji se zavaruje. [15,16,17]

Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala. Superplastična deformacija materijala omogućuje miješanje i povezivanje materijala. Količina materijala koja se miješa prilikom zavarivanja ovisi o obliku trna alata. Trn alata koji ima navoj ili utor stvara veće miješanje materijala i uzrokuje dodatno stvaranje topline trenjem u omekšanom dijelu materijala.

4.10. Utjecaj dimenzija i oblika alata na miješanje materijala

O dimenzijama i obliku alata ovisi stupanj miješanja materijala, difuzija, debljina deformiranih lamela i oblik toka materijala. Promjer čela alata bitan je zbog kontakta s omekšanim materijalom. Promjer čela alata ima utjecaj na širinu lica zavara. Veći promjer alata omogućuje bolje prijanjanje alata uz materijal. Veći promjer alata pomiče veći volumen omekšanog materijala u rotaciju oko alata. Veći promjer trna alata omogućuje veći moment pri miješanju omekšanog materijala. Kod konstruiranja promjera trna alata potrebno je uzeti u obzir i željenu širinu zavara koja je direktno ovisna o promjeru trna alata. Slika 19 prikazuje poprečni presjek zavara dobivenog FSW postupkom zavarivanja te miješanje materijala u samom zavaru. [18]



Slika 19. Skica poprečnog presjeka zavora dobivenog FSW postupkom zavarivanja:

- A - osnovni materijal
- B - zona utjecaja toplote
- C - termo – mehanički obrađena zona
- D – metal zavora [19]

Kod konstruiranja alata važno je uzeti u obzir omjer između volumena materijala koji se miješa prilikom rotacije alata i volumena trna alata. Navedeni omjer je zapravo odnos dinamičkog volumena prema statičkom volumenu. Taj odnos je bitan u ostvarivanju optimalnog toka materijala. Za konvencionalne cilindrične trnove taj odnos iznosi 1.1 : 1. Što je veći omjer biti će manje pora u zavarenom metalu. [18]

4.11. Materijali za izradu alata

Materijali od kojih se izrađuju alati za zavarivanje FSW postupkom za zavarivanje materijala sa visokim talištem moraju imati dobra svojstva na temperaturi iznad 900 °C. Osim što moraju imati visoku čvrstoću, visoki udarni rad loma, biti otporni na umor, moraju imati i dobru otpornost na mehaničko i kemijsko trošenje. Najčešće korišteni materijal koji zadovoljava prethodno opisana svojstva je PCBN (engl. polycrystall cubic boron nitride). Osim PCBN materijala, za izradu alata za zavarivanje koriste se i alatni čelici, legure nikla, volfram, legure volframa, itd.

Alati izrađeni od PCBN materijala koriste se za zavarivanje nikla i legura nikla debljine limova do 6 mm, za zavarivanje nehrđajućih čelika debljine do 6 mm, za zavarivanje niskolegiranih čelika debljine do 12 mm te za zavarivanje bakra do debljine 50 mm.

Alati izrađeni od alatnih čelika koriste se za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura debljine limova do 12 mm te za zavarivanje limova izrađenih od magnezija debljine do 6 mm.

Alati izrađeni od nikla koriste se za zavarivanje bakra debljine do 50 mm, dok se alati izrađeni od volframa primjenjuju u zavarivanju titana i niskolegiranih čelika debljine do 6 mm.

Svaki od gore navedenih materijala od kojih su izrađeni alati ima određenu maksimalnu temperaturu kod koje se može primjenjivati. Prekomjerno trošenje ili korištenje alata na previsokoj temperaturi dovodi alat do promjene njegovog oblika što za posljedicu ima narušavanje izgleda i kvalitete zavara. Trošenje alata može biti uzrokovano adhezijom, abrazijom ili kemijskim trošenjem. U slučaju da je alat izrađen od PBCN materijala, adhezijsko trošenje javlja se kod premalog broja okretaja, dok se kod velikog broja okretaja alata javlja abrazijsko trošenje. [18,19]

5. Eksperimentalni dio rada

Eksperimentalni dio rada odrađen je u prostorima Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Eksperimentalni dio rada sastoji se od 2 dijela:

- zavarivanja aluminijskih limova
- ispitivanja ponašanja zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja.

U prvom dijelu eksperimentalnog dijela rada pripremljeni su uzorci (pločice) te je provedeno točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom aluminijskih limova. Za postupak zavarivanja korištena je glodalica Alfa 5 koja je prikazana na slici broj 23 te čije su karakteristike navedene u tabeli broj 2. Ukupno je provedeno 5 slučajeva zavarivanja, korištena su 2 različita alata za zavarivanje, svaki slučaj ponavljan je 3 puta.

U drugom dijelu eksperimentalnog dijela rada ispitano je ponašanje zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja. Ispitivanje je provedeno na uređaju Inspekt blue 20 proizvođača Hegewald & Peschke, uređaj je prikazan na slici broj 27.

Analizirane su vrijednosti sile potrebne za razdvajanje pločica te je na kraju eksperimentalnog dijela rada dana analiza rezultata te zaključak.

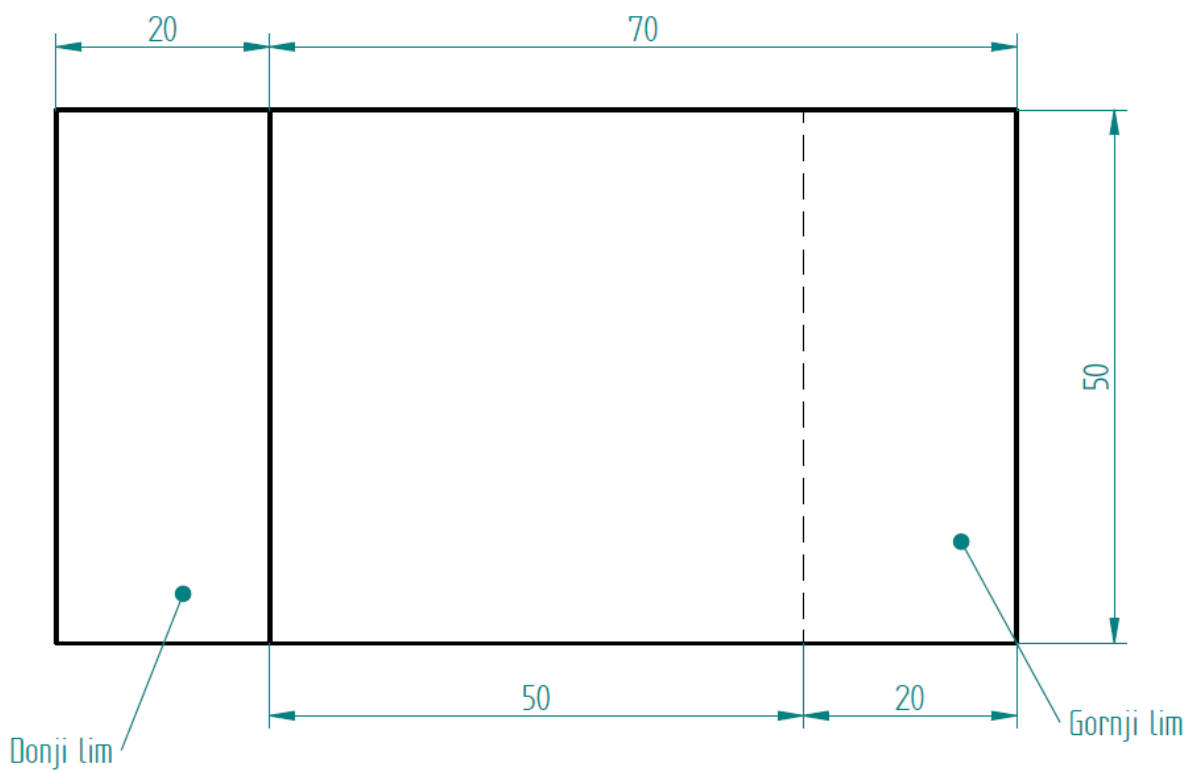
5.1. Limovi u postupku zavarivanja

Materijal limova koji su zavarivani je aluminijska legura EN AW 6060. Legura EN AW 6060 je široko rasprostranjena aluminijska legura za ekstrudiranje. Dijelovi proizvedeni iz legure EN AW 6060 imaju dobru kvalitetu površine i prikladni su za naknadne procese prevlačenja površina. Primjenjuju se kod izrade dijelova za namještaj, dijelova za prozore i vrata, završne dijelove na automobilima, dijelova za rasvjetne stupove, stupove za zastave, u arhitekturi i prehrambenoj industriji.

Legura EN AW 6060 ima sljedeća svojstva:

- granica razvlačenja od 60 do 160 MPa
- vlačna čvrstoća od 120 do 220 MPa
- tvrdoća od 45 do 75 HB
- modul elastičnosti 69000 MPa
- gustoća 2700 kg/m³
- temperatura taljenja od 585 do 650 °C
- toplinska vodljivost od 200 do 220 W/mK.

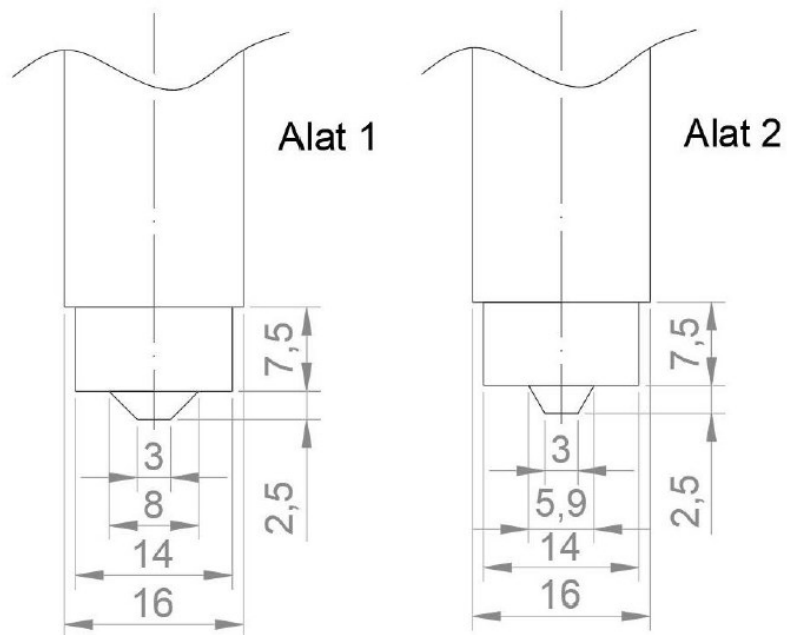
Dimenzije limova koji su zavarivani su 50 x 70 mm, debljina limova je 2 mm. Limovi su prilikom zavarivanja postavljeni u preklopni spoj, preklop je iznosio 50 mm te je prikazan na slici broj 20.



Slika 20. Preklop limova prilikom zavarivanja

5.2. Alat za zavarivanje

Alati za zavarivanje koji su korišteni u eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su od alatnog čelika 100Cr2 trgovačkog naziva OCR alatni čelik. Alati su cilindričnog oblika. Dimenzije oba alata prikazane su na slici broj 21, dok se slika alata nalazi na slici broj 22.



Slika 21. Dimenzije korištenih alata

Specifičnost alata koji su korišteni kod zavarivanja je glatki i konusni trn. Razlika u geometriji između alata 1 i alata 2 je kut konusa trna, dok su im sve ostale dimenzije jednake.



Slika 22. Slika alata korištenih u eksperimentalnom dijelu rada

Alati za zavarivanje korišteni u eksperimentu su napravljeni od niskolegiranog 100Cr2 čelika, koji se još nazivaju OCR čelici. OCR čelici sadrže od 1 do 1,5% ugljika i od 0,5 do 1,5 % kroma.

OCR čelici se koriste za izradu alata i dijelova kotrljajućih ležaja. Za alate se koriste:

- 100Cr6
- 115CrV3
- 140Cr3.

Glavne prednosti ovih čelika su otpornost na trošenje i visoke specifične pritiske (i do 5000 MPa). [1]

5.3. Karakteristike glodalice Alfa 5

Za potrebe zavarivanja korištena je univerzalna glodalica Alfa5 prikazana na slici broj 23.



Slika 23. Slika glodalice Alfa 5

Alfa 5 je troosna glodalica čije osnovne karakteristike su navedene u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike glodalice Alfa 5

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Model glodalice | XZX7550CW |
| Snaga motora glodalice | 2.2 kW |
| Brzina vrtnje vretena | 115 – 1750 okr/min |
| Maksimalni promjer bušenja | 50 mm |
| Maksimalna širina glodanja | 100 mm |
| Maksimalna visina glodanja | 25 mm |
| Udaljenost vretena od stola | 70 – 420 mm |
| Veličina stola | 1000 x 240 mm |

5.4. Postupak zavarivanja

Prije samog postupka zavarivanja limova bilo je potrebno pripremiti pločice za zavarivanje. Pločice su brušene brusnim papirom granulacije P320 kako bi se sa površina pločica skinuo sloj oksida. Pločice su prije zavarivanja postavljene u preklopni spoj, na način da je širina preklopa iznosila 50 mm. Nakon što su stavljene u preklopni spoj, pritegnute su steznom napravom kako se prilikom procesa zavarivanja ne bi dogodilo pomicanje pločica.

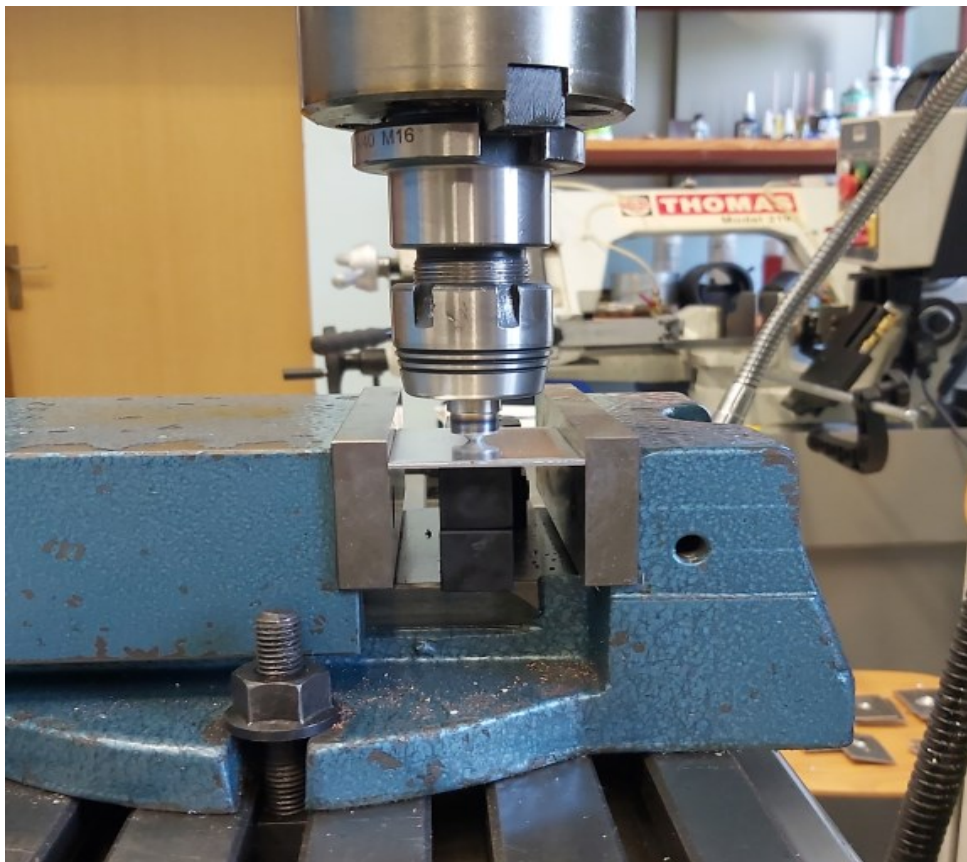


Slika 24. Pločice postavljene u škrip, prije procesa zavarivanja

Prilikom zavarivanja korištena su oba alata, dimenzije alata kotirane su na slici broj 21. Provedeno je ukupno 5 različitih slučajeva zavarivanja sa 5 različitih broja okretaja te sa 2 različita alata. Alati su izrađeni od istog, prethodno opisanog materijala. Za svako stanje eksperimenta provedena su 3 ponavljanja, kako bi bio dovoljan broj pločica za kasnija ispitivanja. U tabeli broj 3 dani su parametri zavarivanja pločica.

Tabela 3. Parametri zavarivanja pločica

| Broj zavarivanja | Brzina rotacije alata [okr/min] | Broj alata | Vrijeme zavarivanja [s] |
|------------------|---------------------------------|------------|-------------------------|
| 1 | 1750 | Alat 2 | 60 |
| 2 | 875 | Alat 2 | 60 |
| 3 | 580 | Alat 1 | 60 |
| 4 | 875 | Alat 1 | 40 |
| 5 | 1750 | Alat 1 | 35 |



Slika 25. Postupak zavarivanja pločica



Slika 26. Zavarene pločice

5.5. Ispitivanje zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja

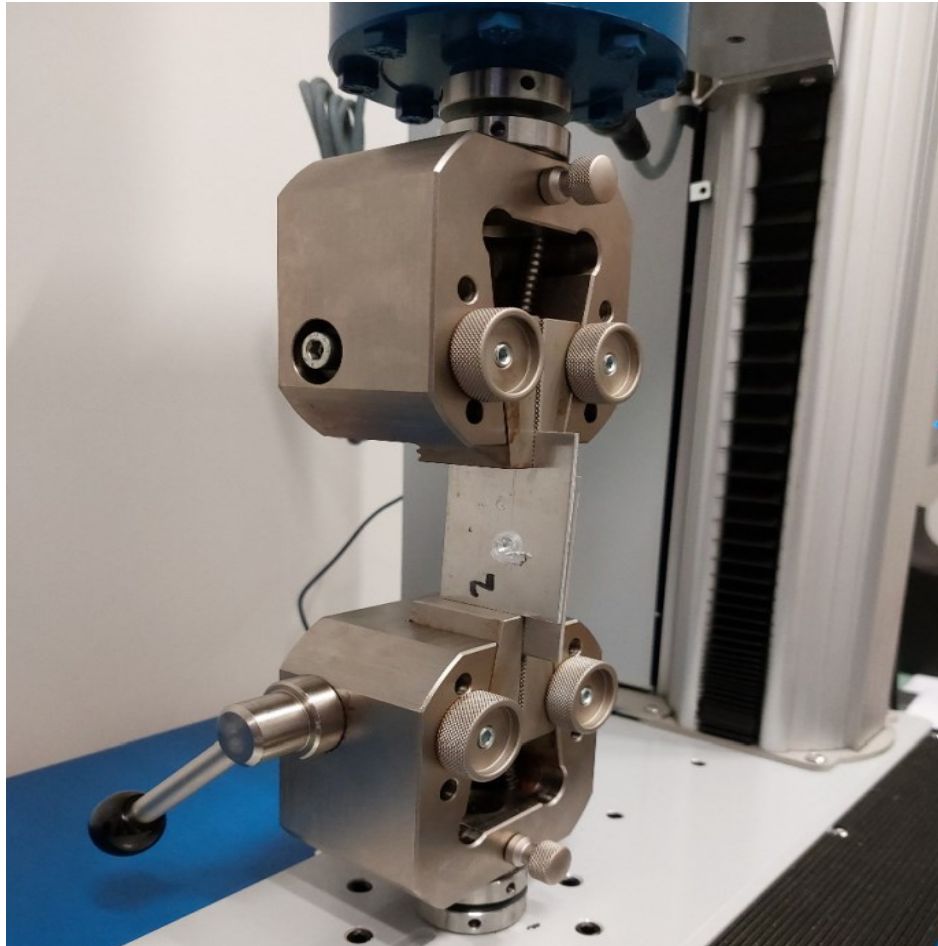
Nakon što je provedeno zavarivanje pločica, odrađeno je ispitivanje zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja. Slika 27 prikazuje uređaj Inspekt blue 20 proizvođača Hegewald & Peschke na kojem je provedeno ispitivanje. Uređaj ima mogućnost primjene sile iznosa do 20 kN te je povezan s računalom zbog očitavanja rezultata.



Slika 27. Uređaj Inspekt blue 20

Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje naziva se kidalica. Kidalica je uređaj za vlačno, tlačno i savojno ispitivanje uzoraka u uvjetima jednoosnog statičkog opterećenja. Osnovni dijelovi kidalice su okvir (postolje), mehanizam za opterećenje, uređaj za mjerenje sile i uređaj za očitavanje. S obzirom na položaj osi ispitnog uzorka tijekom procesa ispitivanja, kidalice mogu biti vertikalne i horizontalne. Kod vertikalnih kidalica ispitni uzorak položen je vertikalno, dok je kod horizontalnih kidalica ispitni uzorak položen horizontalno. Kidalica koja je korištena kod smičnog ispitivanja zavarenih limova (Inspekt blue 20 na slici broj 27) spada u skupinu vertikalnih kidalica.

Prije početka primjene sila na zavarene limove, limovi su pričvršćeni u čeljusti kidalice, prikaz na slici broj 28.

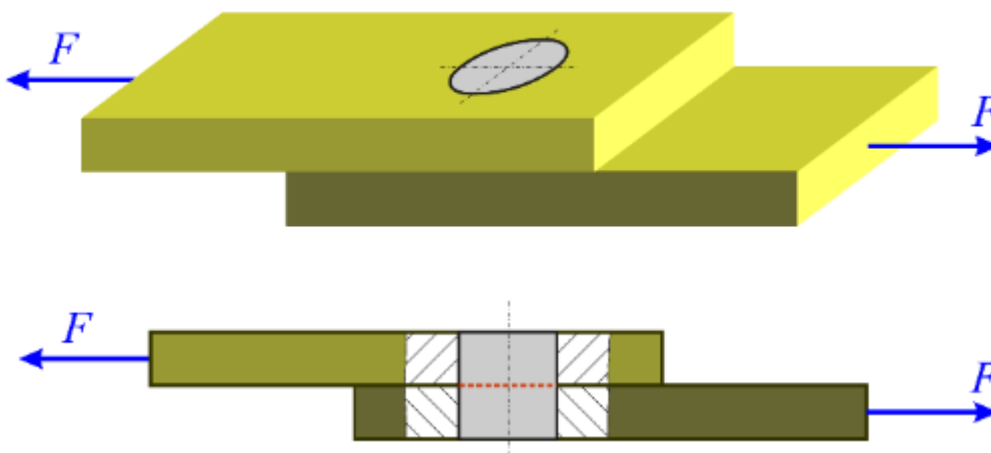


Slika 28. Zavarena pločica prije početka ispitivanja

Nakon što su pričvršćene pločice, rasteznim djelovanjem kidalice smično je opterećen zavareni spoj sve do trenutka dok se pločice nisu počele razdvajati, odnosno do prijeloma zavara i razdvajanja pločica. Prilikom ispitivanja uređaj je bilježio maksimalnu silu koja je bila potrebna za razdvajanje pločica.

5.5.1. Smicanje

Smicanje, smik, posmik ili odrez se odnosi na poprečnu silu koja djeluje u presjeku tijela opterećenog suprotnim silama, a prouzrokuje smično naprezanje. Slika 29 prikazuje primjer tijela opterećenog silama smicanja.



Slika 29. Element opterećen dvjema silama [20]

Čisto smicanje vrlo je teško ostvariti. U praksi se smicanje pojavljuje gotovo uvijek povezano sa savijanjem. U određenom broju slučajeva savijanje je predominantno, dok je smicanje zanemarivo. Također, postoji i određen broj slučajeva gdje je situacija obrnuta. Naprezanja koja prouzrokuje smicanje puno su veća od naprezanja koja prouzrokuje savijanje.

Otpornost tijela na smična naprezanja ispituje se smičnim ispitivanjem. Smično ispitivanje je razorna metoda ispitivanja. Ispitivanje se provodi na kidalici. Točno određivanje raspodjele posmičnog naprezanja vrlo je složeno pa se u praksi proračunava prosječno naprezanje [20]:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

τ – posmično naprezanje (MPa)

F – primjenjena sila (N)

A – poprečni presjek materijala koji je paralelan s primjenjenom silom (mm²)

Maksimalno posmično naprezanje se računa prema formuli:

$$\tau_{MAX} = \frac{F_{MAX}}{A}$$

τ_{MAX} – maksimalno posmično naprezanje (MPa)

F_{MAX} – primjenjena sila (N)

A – poprečni presjek materijala (mm²)

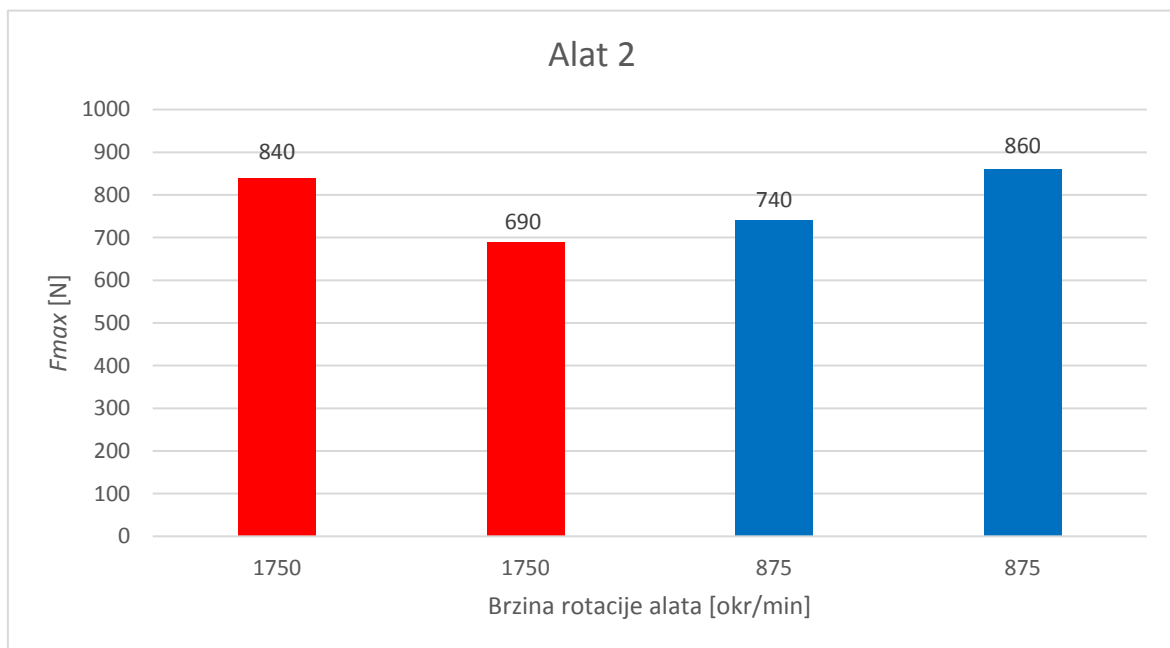
5.6. Rezultati

Prilikom ispitivanja ponašanja zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja mjerena je maksimalna sila kod koje je došlo do razdvajanja zavarenog spoja.

Kod pločica koje su zavarivane alatom broj 2 dobiveni su sljedeći rezultati:

Tabela 4. Rezultati ispitivanja uzoraka zavarenih alatom broj 2

| Broj alata | Brzina rotacije alata [okr/min] | Vrijeme zavarivanja [s] | F_{max} [N] | Broj ispitivanja | Broj zavarivanja |
|------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|------------------|------------------|
| Alat 2 | 1750 | 60 | 840 | 1. ispitivanje | 1 |
| | | | 690 | 2. ispitivanje | 1 |
| Alat 2 | 875 | 60 | 740 | 1. ispitivanje | 2 |
| | | | 860 | 2. ispitivanje | 2 |



Slika 30. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 4

Iz podataka koji su navedeni u tabeli broj 4 vidljivo je da je kod sve četiri pločice vrijeme zavarivanja jednako, odnosno da je kod sve četiri pločice zavarivanje trajalo 60 s. Kod prve i druge pločice broj okretaja alata bio je 1750 okr/min, dok je kod treće i četvrte pločice broj okretaja alata prepolovljen te je iznosio 875 okr/min.

Vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica kod prve pločice iznosila je 840 N, dok je ta vrijednost kod druge pločice iznosila 690 N.

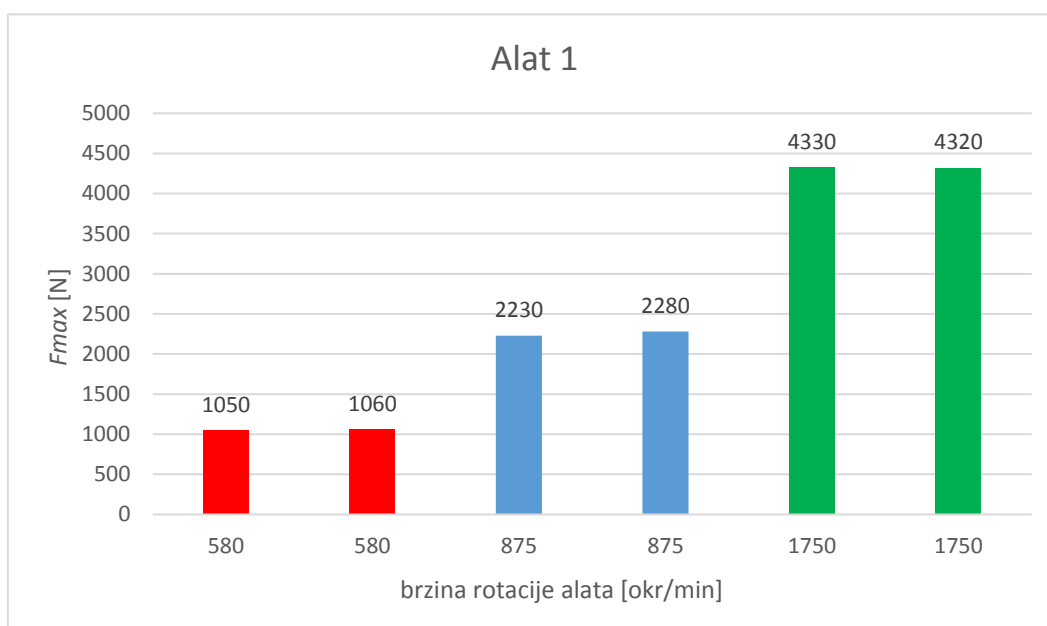
Kod treće pločice vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica iznosila je 740 N, dok je vrijednost sile kod četvrte pločice iznosila 860 N.

Kasnije u analizi rezultata su korištene srednje vrijednosti dobivenih sila. Srednja vrijednost sile prvog i drugog ispitivanja iznosi 765 N, dok srednja vrijednost trećeg i četvrtog ispitivanja iznosi 800 N.

U tabeli broj 5 nalaze se vrijednosti sila potrebnih za razdvajanje pločica koje su zavarivane alatom broj 1.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja uzoraka zavarenih alatom broj 1

| Broj alata | Brzina rotacije alata [okr/min] | Vrijeme zavarivanja [s] | F_{max} [N] | Broj ispitivanja | Broj zavarivanja |
|------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|------------------|------------------|
| Alat 1 | 580 | 60 | 1050 | 1. Ispitivanje | 3 |
| | | | 1060 | 2. Ispitivanje | 3 |
| Alat 1 | 875 | 45 | 2230 | 1. Ispitivanje | 4 |
| | | | 2280 | 2. Ispitivanje | 4 |
| Alat 1 | 1750 | 35 | 4330 | 1. Ispitivanje | 5 |
| | | | 4320 | 2. Ispitivanje | 5 |



Slika 31. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 5

Kod ispitivanja sile potrebne za razdvajanje pločica koje su zavarene brzinom rotacije alata od 580 okr/min, vrijednost sile kod koje je došlo do početka razdvajanja pločica iznosila je 1055 N. Vrijeme trajanja zavarivanja kod ovih pločica iznosilo je 60 s.

Povećanjem brzine rotacije alata na vrijednost od 875 okr/min te smanjivanjem vremena zavarivanja na 45 s, sila kod koje je došlo do razdvajanja pločica iznosila je 2255 N.

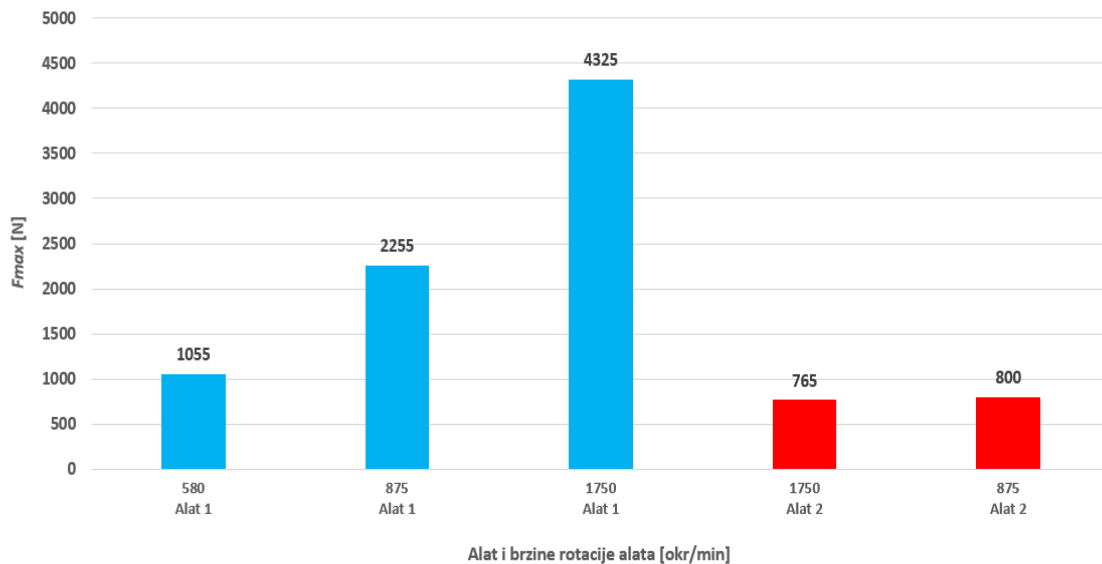
Dodatnim povećanjem brzine rotacije alata na vrijednost od 1750 okr/min te skraćivanjem vremena zavarivanja na vrijeme od 35 s, došlo je do dodatnog povećanja maksimalne dostignute sile. Vrijednost sile kod koje je došlo do razdvajanja pločica se povećala u odnosu na prethodna dva slučaja te je njezina vrijednost iznosila 4325 N.

6. Analiza rezultata

U tabeli broj 6 prikazani su rezultati dobivenih sila kod svih provedenih ispitivanja.

Tabela 6. Rezultati provedenih ispitivanja

| Broj alata | Brzina rotacije alata [okr/min] | Vrijeme zavarivanja [s] | F_{max} [N] |
|------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|
| Alat 1 | 580 | 60 | 1055 |
| Alat 1 | 875 | 45 | 2255 |
| Alat 1 | 1750 | 35 | 4325 |
| Alat 2 | 1750 | 60 | 765 |
| Alat 2 | 875 | 60 | 800 |



Slika 32. Grafički prikaz rezultata ispitivanja iz tabele broj 6

Najveća vrijednost sile pri razdvajanju pločica dobivena je alatom broj 1, brzinom rotacije alata od 1750 okr/min te vremenom trajanja zavarivanja od 35 s. Analizirajući samo rezultate pločica koje su zavarivane alatom broj 1, vidljivo je da povećanjem brzine rotacije alata dolazi do veće otpornosti zavarenog spoja na smično opterećenje, odnosno potrebna je veća sila kako bi se pločice razdvojile.

Analizirajući rezultate ispitivanja dobivene zavarivanjem pločica alatom broj 2, zaključeno je kako brzina rotacije alata, uz konstantno vrijeme zavarivanja, nije imala značajniji utjecaj na vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica.

7. Zaključak

Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem pločica zavarenih alatom broj 1 (alat sa većim konusom trna u odnosu na alat broj 2) zaključeno je da povećanje broja okretaja alata znatno utječe na vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica prilikom opterećenja pločica na smik.

Prilikom ispitivanja ponašanja zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja, za pločice koje su zavarene brzinom rotacije alata od 580 okr/min dobivena je vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica od 1055 N. Povećanjem brzine rotacije alata na vrijednost od 875 okr/min, vrijednost sile kod koje je došlo do razdvajanja pločica porasla je na vrijednost od 2255 N. Najveću vrijednost sile potrebne za razdvajanje pločica imale su pločice koje su zavarene brzinom rotacije alata od 1750 okr/min. Sila potrebna za razdvajanje tih pločica iznosila je 4325 N.

Ispitivanjem ponašanja zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja pločica koje su zavarene alatom broj 2, za vrijednost brzine rotacije alata od 875 okr/min, dobivena je vrijednost sile kod koje je došlo do razdvajanja pločica od 800 N. Povećanjem brzine rotacije alata na 1750 okr/min, dobivena je vrijednost sile od 765 N. Iz dobivenih rezultata ispitivanja zaključeno je kako se povećanje dvostruko većom brzinom rotacije alata, uz konstantno vrijeme zavarivanja od 60 s, dobiju oko 5% niži rezultati pri mjerenju sile potrebne za razdvajanje pločica u uvjetima smičnog naprezanja.

Koristeći alat broj 1 dobiveni su bolji rezultati zavarenog spoja u uvjetima smičnog opterećenja. Bolji rezultati dobiveni su zbog geometrije alata broj 1, koji u odnosu na alat broj 2 ima veći konus trna alata. Veći konus trna alata omogućuje veći poprečni presjek zavarenog spoja.

Napredovanjem suvremene industrije, pronalaskom novih materijala, korištenjem najsuvremenijih tehnologija obrade materijala, javlja se sve veća potreba i za novim postupcima spajanja, odnosno zavarivanja materijala. Unatoč mnogobrojnim postupcima zavarivanja koji su prisutni u industriji, svaki novi postupak zavarivanja koji ima određene prednosti u odnosu na već postojeće postupke, nalazi svoju primjenu u raznim granama industrije. Iako je FSSW postupak već neko vrijeme prisutan u industrijskoj upotrebi, može se smatrati relativno novim postupkom spajanja materijala. S obzirom na širok spektar materijala koji se mogu zavarivati FSSW postupkom te jako dobra mehanička svojstva zavarenog spoja, FSSW postupak imat će sve širu primjenu u industrijskoj proizvodnji. Trenutno još uvijek ne postoje standardni alati na tržištu koji su dizajnirani za određene proizvode. Također ne postoje proizvođači koji serijski proizvode alate namijenjene za proizvođače zavarenih konstrukcija. Većina alata koji se danas nalaze na tržištu nastala je u laboratorijima, na sveučilištima, raznim istraživačkim institutima, stoga se može zaključiti kako će daljnji razvoj ovog postupka biti usmjeren na nove oblike i dimenzije alata za zavarivanje, kao i njegovu serijsku proizvodnju.

8. Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, i J. Indof, Svojstva i primjena materijala, 5. izd. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2002.
- [2] <https://pdfslide.net/download/link/osnove-tehnologije-prof-samardzic1> Ivan Samardžić, Osnove tehnologije, Sveučilite u Slavonskom Brodu, Katedra za tehnologije (pristupljeno 08.10.2022.)
- [3] Bojan Kraut: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [4] W.M. Thomas, C.J. Goodfellow, D.G. Staines, E.R. Watts.: Preliminary trials using dual-rotation friction steel welding, 2006.
- [5] C.Dawes, W.Thompson: Friction stir joining of aluminium alloys, TWI Bulltin 6, 1995.
- [6] „Refriktion Stir Spot Welding - TWI“ <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/refill-friction-stir-spot-welding-150> (pristupljeno 13.10.2022.)
- [7] R.S. Mishra, Z.Y.Ma: Friction steel welding and processing, Materials Science and engineering, 2005.
- [8] „Friction Steel Welding Handbok“, <https://www.fsw-tech.eu/documents/IO3%20-%20TRAINING%20MATERIAL/FSW-Tech%20Handbook%20for%20Specialists%20and%20Engineers%20%E2%80%93%20EN.pdf>, (pristupljeno 25.10.2022.)
- [9] http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/13813386651_up_case_study.pdf , Projekt WBC Virtual Manufakturing Network – Fostering an Integration of the Knowledge Triangle (pristupljeno 18.10.2022.)
- [10] Danijela D. Živojinović: Primena mehanike loma na procenu integriteta loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura alumiuma, Beograd, 2013.
- [11] Dong P., Lu F. Hong J., Cao Z.: Coupled thermomechanical analysis of friction stir spot welding using simlified models. Science and technology of welding and Joining, 2001.
- [12] C.B. Fuller: Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs : Friction stir welding and processing ured R. M. Mishra, M.W. Mahoney, ASM International , 2007.
- [13] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara: Review of tools for friction stir spot welding and processing, Canadian Metallurgical Quartely , 2012.

- [14] S.Kralj, M.Bušić, Z.Kožuh, D.Klobčar: Utjecaj oblika i dimenzija alata pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom, 2014.
- [15] S. Vijayan, R. Raju: Process Parameter Optization and Characterization of Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, International Journal of Applied Engineering Research, 2008.
- [16] C.S.Wu, W.B.Zhang, L.Shi, M.A.Chen: Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminium alloys plates, Transtactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012.
- [17] C. Hamilton, S.Dymek, A.Sommers: A thermal model of friction stir welding in aluminium alloys, International journal of machine tools & manufacture, 2008.
- [18] A.Arora, A.De, T.Debroy: Toward optimum friction stir welding shoulder diameter, Scripta Materialia, 2011.
- [19] R.Nandan, T.Debroy, H.K.D.H. Bhadeshia: Recent advances in friction stir-welding, Process, weldment structure and properties, Progres in Materials Science, 2008.
- [20] B. Plazibat, A Matoković, V.Vetma: Nauka o čvrstoći, Split 2019.

Sveučilište Sjever



SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

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, VEDRAN MARGETIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ ALATA NA MEHANIČKA SVOJSTVA ZAVRŠNA PRAŽNOSTI (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Margetić

(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. 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.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.