

Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom

Kocijan, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:106199>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 060/STR/2022

**Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom
zavarivanju trenjem rotirajućim alatom**

Filip Kocijan, 0336021354

Varaždin, rujan 2022. godine



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 060/STR/2022

**Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom
zavarivanju trenjem rotirajućim alatom**

Student

Filip Kocijan, 0336021354

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujun 2022. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Filip Kocijan

JMBAG 0336021354

DATUM 06.06.2022.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Influence of the tool on weld profile 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

BROJ 060/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 poprečnog presjeka zavarenog spoja na svjetlosnom mikroskopu. Izmjeriti dimenzije zavarenih spojeva te utvrditi ovisnost dimenzija o parametrima zavarivanja. Donijeti vlastiti zaključak o utjecaju parametara primjenjenih u eksperimentu na oblik zavarenog spoja. U radu je potrebno navesti svu korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

06.06. 2022.



PODPIS MENTORA

M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na uloženom vremenu i trudu, na pomoći pri izvođenju eksperimenta, te na svim savjetima kojima me usmjeravao u pisanju ovog završnog rada. Također, zahvaljujem se svim profesorima i osoblju na Sveučilištu Sjever koji su me naučili svim znanjima i vještinama koje sam iskoristio za pisanje, te učinili moj boravak na Sveučilištu Sjever tijekom godina studiranja ugodnim.

Veliku zahvalu dugujem i svojoj obitelji koja me podupirala i motivirala tijekom studiranja. Također zahvaljujem svojim prijateljima, kolegama s fakulteta, kolegama s posla, te djevojci Tei koji su mi bili podrška, a isto tako i motivacija tijekom mojeg studiranja.

Sažetak

U ovom radu su proučavani postupci zavarivanja trenjem. Proučavano je zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (Friction Stir Welding), a posebno detaljno je proučavano točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (Friction Stir Spot Welding). Govori se o svim parametrima, vrstama alata i njihovom učinku, te oblicima spojeva koji se mogu postići ovim postupkom.

U eksperimentalnom dijelu rada je izvedeno točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom limova aluminijske legure uz različite parametre zavarivanja različitim oblicima alata. Praćeno je ponašanje materijala u postupku zavarivanja, te je izvršena analiza poprečnog presjeka zavarenog spoja na stereomikroskopu. Izmjerene su dimenzije zavarenih spojeva, te je temeljem analize utvrđena ovisnost dimenzija o parametrima zavarivanja. Na kraju je donesen zaključak o utjecaju parametara primijenjenih u eksperimentu na oblik zavarenog spoja.

Ključne riječi: točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Summary

In this work Friction welding procedures are studied. Friction Stir Welding is studied and especially Friction Stir Spot Welding is studied in detail. All parameters, types of tools and their effect, and forms of joints that can be achieved with this procedure are discussed.

In the experimental part of the work, friction stir spot welding of aluminum alloy sheets is performed with different welding parameters and different tool shapes. The behavior of the material during the welding process is monitored, and the cross-section of the welded joint is analyzed using a light microscope. The dimensions of the welded joints are measured and the dependence of the dimensions on the welding parameters are determined based on the analysis. At the end, a conclusion is made about the influence of the parameters applied in the experiment on the shape of the welded joint.

Key words: friction stir spot welding

Popis korištenih kratica

TIG	Tungsten Inert Gas Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
MIG	Metal Inert Gas Elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštiti inertnog plina
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline
OM	Osnovni materijal
TMAZ	Thermo-Mechanically Affected Zone Zona termomehaničkog utjecaja zavarivanja
NZ	Nugget Zone Zona miješanja
DM	Dodatni materijal
RFW	Rotary Friction Welding Rotacijsko zavarivanje trenjem
LFW	Linear Friction Welding Linearno zavarivanje trenjem
FSW	Friction Stir Welding Rotacijsko zavarivanje trenjem rotirajućim alatom
FSSW	Friction Stir Spot Welding Točkasto rotacijsko zavarivanje trenjem rotirajućim alatom
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju
NDT	Nondestructive testing Nerazorne metode ispitivanja
ASTM	American Society for Testing and Materials Američko društvo za ispitivanje i materijale

Oznaka	Jedinica	Opis
R _{p0.2}	MPa	Granica razvlačenja
R _m	MPa	Vlačna čvrstoća
HB		Tvrdoća po Brinell-u
Al ₂ O ₃		Aluminijev (III) oksid (glinica)
Na ₃ AlF ₆		Natrijev heksafluoroaluminat (kriolit)
CO		Ugljikov (II) oksid
CO ₂		Ugljikov (IV) oksid
Al		Aluminij
Cu		Bakar
Mg		Magnezij
Si		Silicij
Zn		Cink
Mn		Mangan
Fe		Željezo
Cr		Krom
Ti		Titan
Li		Litij
W		Volfram

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Aluminij	2
2.1.	Aluminijeve legure	3
2.1.1.	Lijevene legure.....	3
2.1.2.	Gnječene legure.....	4
2.2.	Aluminijeva legura EN-AW 6060.....	4
3.	Zavarivanje	6
3.1.	Postupci zavarivanja taljenjem.....	6
3.2.	Postupci zavarivanja pritiskom	7
4.	Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom.....	9
4.1.	Zavarivanje trenjem.....	9
4.1.1.	Povijesni razvoj.....	9
4.1.2.	Vrste postupaka	10
4.2.	Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom	11
4.3.	Vrste zavarivanja trenjem rotirajućim alatom	12
4.3.1.	Linearno (šavno) zavarivanje trenjem rotirajućim alatom	12
4.3.2.	Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom.....	15
4.3.3.	Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom s ispunjavanjem (Refill FSSW).....	18
4.3.4.	Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje s rotacijskim gibanjem alata (Swept FSSW).....	20
4.4.	Parametri pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom	21
4.5.	Miješanje materijala pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom	24
4.6.	Alati za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom	27
4.6.1.	Vrste alata za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom.....	27
4.7.	Primjena zavarivanja trenjem rotirajućim alatom	29
4.8.	Svojstva spoja.....	33
4.8.1.	Razorna ispitivanja	33
4.8.2.	Nerazorna ispitivanja	34
4.9.	Materijali koji se mogu zavarivati postupkom FSSW	35
4.9.1.	Aluminij.....	36
4.9.2.	Bakar.....	37
4.9.3.	Magnezij.....	37
4.9.4.	Čelik	37
4.9.5.	Plastomeri	37
4.9.6.	Titan	38
4.9.7.	Raznorodni materijali	38
4.10.	Prednosti zavarivanja trenjem rotirajućim alatom	39
4.11.	Nedostaci zavarivanja trenjem rotirajućim alatom.....	39
5.	Eksperimentalni dio	41
5.1.	Opis eksperimentalnog dijela	41
5.2.	Naprave, alati i materijali korišteni u eksperimentu.....	41
5.2.1.	Troosna bušilica i glodalica.....	41
5.2.2.	Uređaj za poliranje uzoraka.....	42

5.2.3.	<i>Alat za točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom.....</i>	42
5.2.4.	<i>BTC svjetlosni mikroskop.....</i>	44
5.2.5.	<i>Digitalna kamera Canon EOS 2000D.....</i>	44
5.3.	Opis postupaka	46
5.3.1.	<i>Priprema uzorka za zavarivanje.....</i>	46
5.3.2.	<i>Stezanje uzorka na glodalicu.....</i>	47
5.3.3.	<i>Proces zavarivanja.....</i>	47
5.3.4.	<i>Priprema uzoraka za promatranje mikroskopom.....</i>	52
5.3.5.	<i>Promatranje mikroskopom.....</i>	54
5.4.	Zapažanja	54
5.4.1.	<i>Zapažanja prilikom zavarivanja.....</i>	54
5.5.	Stanja eksperimenta.....	55
5.6.	Analiza i rezultati	56
6.	Analiza rezultata	61
7.	Zaključak.....	63
8.	Literatura.....	65

1. Uvod

Današnje tehnologije i proizvodni procesi su napredniji nego ikad prije. Tvrtke koje proizvode moraju stalno poboljšavati svoje procese i uvoditi nove naprednije tehnologije. CNC strojevi i novi zavarivački postupci su uvelike pomogli da današnja proizvodnja bude brža i kvalitetnija nego prije. Tvrtke moraju proizvoditi kvalitetnije proizvode istovremeno nudeći konkurentno niske cijene i rokove isporuke. Predvodnici korištenja inovativnih tehnologija kao što su autoindustrija i avioindustrija svakodnevno u svoje procese uvode nove tehnologije. Stoga te grane industrije postavljaju trendove u svijetu proizvodnih tehnologija.

Zavarivanje je relativno stari, ali pouzdani postupak spajanja materijala. Konvencionalni postupci zavarivanja poput REL, MIG/MAG i TIG zavarivanja su nezaobilazni postupci u proizvodnji metalnih proizvoda. Ti postupci uz mnoge druge predstavljaju konvencionalne postupke zavarivanja i spadaju pod grupu zavarivanja taljenjem. Noviji postupci spajanja materijala razvijaju se na drugačijim principima zavarivanja od zavarivanja taljenjem. Zavarivanje trenjem predstavlja relativno noviju grupu zavarivačkih postupaka koji su se tek odnedavno počeli koristiti u komercijalnoj upotrebi. Počeci zavarivanja trenjem sežu u početke 20. st. Tada su se tek počeli pojavljivati patenti za zavarivanje trenjem, no njihovo podrobnije proučavanje je započeto tek sredinom 20. st. Jedan od takvih postupaka je zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. To je relativno nov postupak koji se počeo proučavati krajem 20. st. Do danas su razvijeni mnogi postupci zavarivanja trenjem rotirajućim alatom, te se ono intenzivno proučava i svakim danom se pronalaze noviji i poboljšani postupci. Zbog jedinstvenosti ovog postupka i mnogih prednosti koje on pruža, zasigurno će se u budućnosti još više proučavati i koristiti.

2. Aluminij

Aluminij se u prirodi može naći u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja elektrolitičkim postupkom. Zbog toga što aluminij ima veliki afinitet prema kisiku onemogućen je postupak ekstrahiranja aluminija iz oksidne rude zagrijavanjem s jeftinim redukcijskim sredstvom kao kod većine metala. Polazna ruda za dobivanje aluminija je boksit, od kojeg se pročišćavanjem dobije aluminijev oksid (glinica) (Al_2O_3). Metal aluminij dobiva se elektrolizom. Najvažniji procesi primjenjuju Hall-Heroultovu ćeliju, u kojoj se kao elektrolit rabi rastopljeni kriolit (Na_3AlF_6) koji snižava talište na oko $950\text{ }^\circ\text{C}$. Jakost električne struje pri procesu je oko 150.000 A, a napon je oko 5 V. Katode su najčešće izrađene od ugljena, te one pri procesu lagano izgaraju te reagiraju s kisikom i fluorom iz kriolita, stoga nastaju i određene količine plinova CO i CO_2 , te plinoviti spojevi s fluorom koji pridonose efektu staklenika. Dobiveni aluminij se drži na visokim temperaturama nekoliko sati da bi iz njega isparile primjese silicija, titanija, bakra i cinka, no najveća čistoća se dobije električnom rafinacijom (99.999%).

Osnovna svojstva aluminija su navedena u Tablica 2.1.

Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [1]

Gustoća	kg/m^3	2700
Talište	$^\circ\text{C}$	660
Modul elastičnosti	N/mm^2	69000
Toplinska rastezljivost	$10^{-6}/\text{K}$	23,8
Električna vodljivost	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36...37,8
Granica razvlačenja	N/mm^2	20...120
Vlačna čvrstoća	N/mm^2	40...180
Istezljivost	%	50...4

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala:

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće
3. Relativno velika korozivna postojanost

Nelegirani se aluminij uglavnom koristi zbog niske gustoće i dobre korozivne postojanosti. Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju gustog nepropusnog oksidnog sloja koji se stvara na površini metala na zraku i u vodenim otopinama. Što je aluminij jače oksidiran, to je nastali oksidni sloj otporniji. Kvaliteta prirodnog oksidnog sloja može se poboljšati postupcima kemijskog fosfatiranja i kromatiranja, no najvažniji postupak je anodizacija.

Uz dobru korozivsku postojanost aluminij ima i visoku električnu i toplinsku vodljivost. Također ima niski modul elastičnosti, pa se umjesto čelika koristi za nosače koji trebaju biti gipki. Toplinska rastezljivost mu je dvostruko veća od toplinske rastezljivosti čelika, pa se često koristi i kod izrade posuda i cjevovoda u tehnici hlađenja.

Čisti aluminij se primjenjuje kod aparata, posuda i rezervoara u kemijskoj i prehrambenoj industriji, za izradu kuhinjskog posuđa, te metalnih proizvoda široke potrošnje, u graditeljstvu, za pakiranje (folije, tube, limenke), izradu električnih vodiča itd. [1]

2.1. Aluminijeve legure

Cilj legiranja je prvenstveno poboljšati mehanička svojstva, vlačnu čvrstoću i tvrdoću, krutost, rezljivost, a katkad i žilavost ili livljivost. Aluminijeve legure upotrebljavaju se u lijevanom i u gnječenom stanju. Mnogima od njih se mehanička svojstva mogu dodatno poboljšati precipitacijskim očvršnućem, a mnoge se legure koriste bez bilo koje takve obrade. Najvažniji legirni elementi su: bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn); a u manjoj su količini prisutni i dodaci ili primjese: željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti).

Kod aluminijevih legura važno je spomenuti i precipitacijsko očvršnuće. To je zajednička pojava mnogim legurama u kojima dolazi do promjene topljivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali se najviše koristi u odgovarajućim aluminijevim legurama. [1]

2.1.1. Lijewane legure

Lijewane legure se mogu svrstati u tri osnovne grupe: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu čijom se kombinacijom mogu dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava. Te aluminijeve legure su navedene u Tablica 2.2. [1]

Tablica 2.2 Osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura [1]

Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik	
mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg	AlMg3, AlMg5	
				Al-Si-Mg	AlSi10Mg AlSi7Mg1	Mg omogućuje toplinsko očvršnuće
mala	vrlo dobra	slaba	dobra	Al-Si	AlSi12	
				Al-Si-Cu	AlSi5Cu1 AlSi6Cu2	Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju
osrednja	slaba	dobra	vrlo slaba	Al-Cu	Al-Cu4MgTi	Ti i Mg usitnjuju zrno

2.1.2. Gnječene legure

Osnovna podjela gnječanih aluminijevih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvršnuća. Jedna i druga podjela mogu se obuhvatiti odjednom u Tablica 2.3. [1]

Tablica 2.3 Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijevih legura [1]

Vrsta legure	Način očvršnuća	R _m , MPa
1. Al-Mn	deformiranjem u hladnom stanju	200...350
2. Al-Mg		
3. Al-Mg-Mn		
4. Al-Mg-Si		~330
5. Al-Cu-Mg		~450
6. Al-Zn-Mg	precipitacijom	~400
7. Al-Zn-Mg-Cu		~550
8. Al-Li-Cu-Mg		~500

2.2. Aluminijeva legura EN-AW 6060

EN AW 6060 je široko rasprostranjena legura aluminija za ekstrudiranje. Prikladna je za korištenje u uvjetima gdje nije zahtijevana visoka čvrstoća. Dijelovi proizvedeni iz ove legure imaju dobru kvalitetu površine, te su prikladni za naknadne procese prevlačenja površine. Područja primjene su namještaj, završni materijali, prozori i vrata, završni dijelovi na automobilima, konstrukcije fasade, rasvjetni stupovi i stupovi za zastave, arhitektura i prehrambena industrija. U sljedećim tablicama navedeni su sastav i svojstva legure EN-AW 6060. [2]

Tablica 2.4 Kemijski sastav prema EN573-3 (ostatak Al) [2]

Kemijski element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostalo	
									Pojedinačno	Sveukupno
Maseni udio [%]	0,30-0,60	0,10-0,30	max. 0,10	max. 0,10	0,35-0,60	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,10	max. 0,05	max. 0,15

Tablica 2.5 Mehanička svojstva prema EN755-2 [2]

Uvjeti (prema EN515)	Debljina stijenke, a [mm]	Granica razvlačenja, $R_{p0.2}$ [MPa]	Vlačna čvrstoća, R_m [MPa]	Tvrdoća HB
T4	≤ 25	60	120	45
T5	≤ 5	120	160	55
	$5 < e \leq 25$	100	140	50
T6	≤ 5	150	190	65
	$5 < e \leq 25$	140	170	60
T66	≤ 5	160	215	70
	$5 < e \leq 25$	150	195	65

Tablica 2.6 Fizikalna svojstva (prosječno, 20°C) [2]

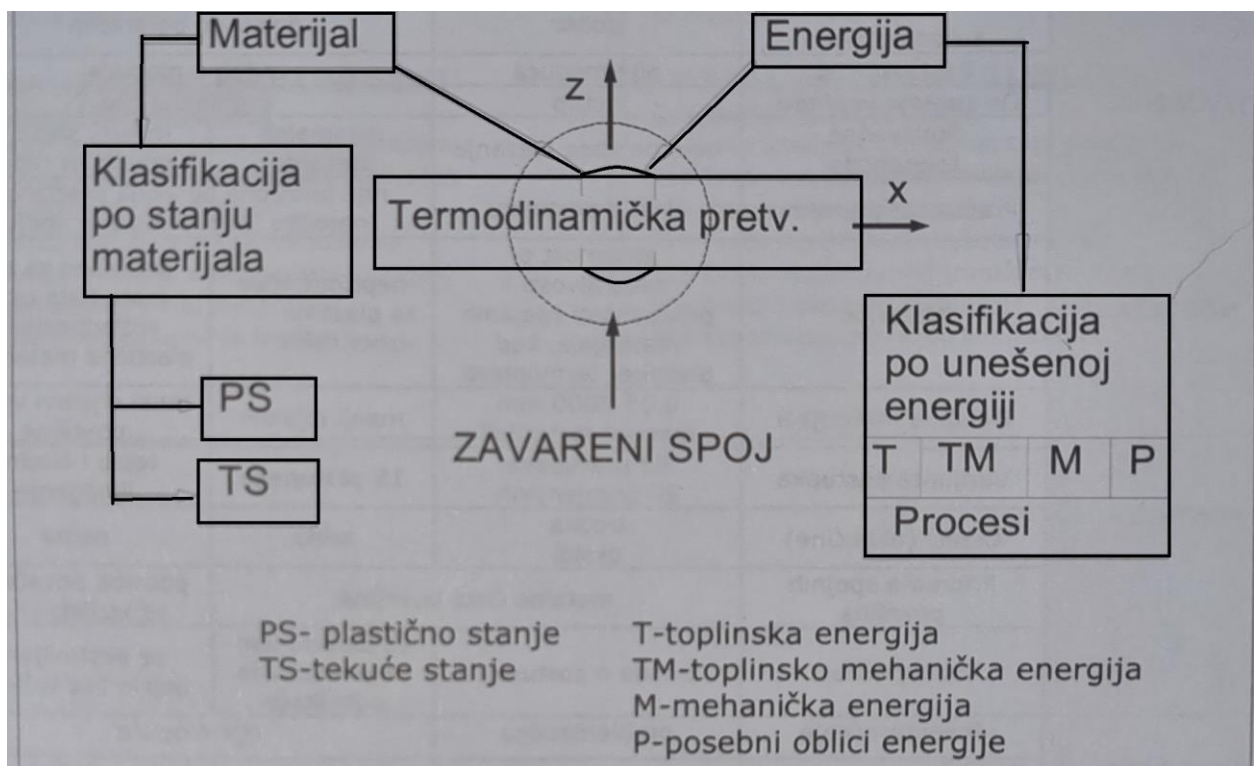
Gustoća, ρ [kg/m ³]	Granice taljenja, t [°C]	Električna vodljivost, G [MS/m]	Toplinska vodljivost, λ [W/m.K]	Koeficijent volumnog toplinskog širenja, α_v [10 ⁻⁶ /K]	Modul elastičnosti, E [GPa]
2700	585-650	28-34	200-220	23,4	~70

Od ostalih svojstava potrebno je još napomenuti kako legura aluminija EN AW 6060 ima vrlo dobru zavarljivost (pogotovo TIG i MIG postupkom), dobru obradivost, odlične mogućnosti prevlačenja površine, te odličnu korozivsku postojanost. [2]

3. Zavarivanje

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova sa ili bez dodatnog materijala. Svrha zavarivanja je dobivanje nerastavljivog spoja jednoličnih svojstava. Tijekom zavarivanja se zona spoja dovodi u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se mogu spajati metalni i nemetalni materijali. Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT). ZT je dio zavarenog spoja koji se tijekom zavarivanja tali, i u kojem dolazi do kristalizacije i skrućivanja. Sastoji se od osnovnog materijala (OM) ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala (DM). ZUT je dio OM-a u kojem je došlo do promjene kristalne strukture utjecajem topline unesene zavarivanjem. Širina ZUT-a ovisi o unosu topline, a najčešće je 2-8 mm. [3]

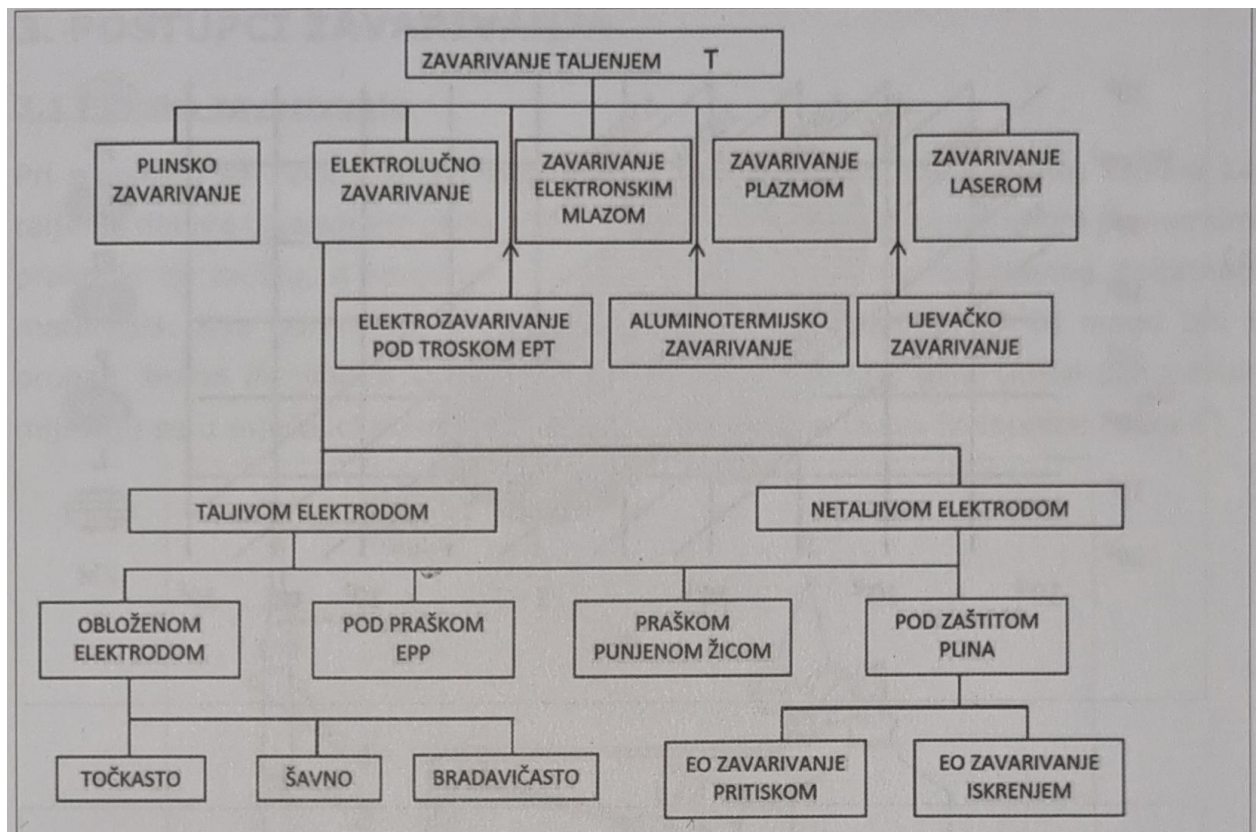
Podjela postupaka zavarivanja može se načiniti prema vrsti energije potrebne za ostvarivanje spoja ili prema vrsti izvora energije (Slika 3.1).



Slika 3.1 Shema termodinamičke pretvorbe energije i materijala pri zavarivanju [4]

3.1. Postupci zavarivanja taljenjem

Zavarivanje taljenjem predstavlja vrstu zavarivanja pri kojoj se unosi toplina pomoću struje, uspostavljanjem električnog luka, plinom, plamenom ili nekim drugim načinom. U ovom slučaju se materijal dovodi u rastaljeno stanje kako bi se dobio homogeni spoj dvaju ili više rastaljenih materijala.



Slika 3.2 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [4]

3.2. Postupci zavarivanja pritiskom

Zavarivanje pritiskom predstavlja vrstu zavarivanja u kojoj spoj nastaje kombinacijom toplinske i mehaničke energije ili samo mehaničke (Slika 3.3). Pri takvom procesu zavarivanja dolazi do zagrijavanja materijala toplinskim unosom ili bez dodatnog toplinskog unosa, ali s dodatnim pritiskom materijala. Zavarivanje trenjem je primjer zavarivanja pritiskom gdje nema dodatnog toplinskog unosa, već se toplina razvija trenjem između dvaju materijala, te se nakon njihovog taljenja oni pritiskom spajaju. Kod zavarivanja pritiskom ne mora doći do taljenja materijala, već se u nekim slučajevima materijal dovodi samo u plastično stanje, te se materijali u tom slučaju spajaju međusobnim miješanjem.



Slika 3.3 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [4]

4. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

4.1. Zavarivanje trenjem

Skup postupaka zavarivanja trenjem uključuje nekoliko metoda, kao što je rotacijsko zavarivanje trenjem (RFW), linearno zavarivanje trenjem (LFW), te najnoviji, zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (FSW). Glavni princip dobivanja spoja je uvijek isti. Za dobivanje spoja potrebno je zagrijati materijale do plastičnog stanja i uz korištenje "prekomjerne sile" materijal se plastično istiskuje, te se stvara zavar koji nastaje trenjem između dvije zavarene komponente (RFW i LFW) ili između komponenti pomoću posebno dizajniranog alata (FSW). Postupci zavarivanja trenjem se klasificiraju kao metode spajanja u čvrstom stanju jer ne dolazi do taljenja materijala. Ove metode zavarivanja su postale vrlo atraktivne zbog mnogih tehničkih i ekonomskih prednosti, kao što su visoka učinkovitost i stabilnost procesa, te bolji uvjeti sigurnosti na radu u odnosu na tradicionalne tehnologije zavarivanja. U posljednje vrijeme kao najvažnija prednost se ističe mogućnost spajanja materijala s različitim svojstvima. Zbog činjenice da se u zoni spoja između dva različita materijala formiraju intermetalni spojevi je proces spajanja različitih materijala često vrlo zahtjevan. Za dobivanje visokokvalitetnog spoja potrebno je poznavati i analizirati fazni dijagram dva zavarena materijala. Mikrostruktura i različita svojstva intermetalnih faza, kao što je osjetljivost na pukotine, duktilnost i otpornost na koroziju također su vrlo važne. Postoje neki dodatni čimbenici, na primjer, koeficijenti toplinskog širenja zavarenih materijala i njihovog taljenja temperaturama čije je poznavanje također neophodno u slučaju spajanja različitih materijala. [5]

4.1.1. Povijesni razvoj

- 1924: Patent za linearno zavarivanje trenjem podnjet u Engleskoj i SSSR-u
 - W. Richter bio je prvi koji je osmislio metodu za linearno zavarivanje trenjem
- 1929: Patent za linearno zavarivanje trenjem podnesen u Njemačkoj
- 1956: Prvi eksperimentalni dokaz zavarivanja trenjem i početak komercijalne uporabe
 - Prve metode bile su vezane za rotacijsko zavarivanje trenjem
 - A. J. Chdikov je shvatio važnost procesa za komercijalnu upotrebu
- 1960: Friction Welding je stigao u SAD
 - Velike kompanije kao što su Rockwell International, American manufacturing foundry i Caterpillar tractor company razvile su svoje strojeve za ove procese
- 1991: Patent i eksperimentalni dokaz zavarivanja trenjem pomoću rotirajućeg alata

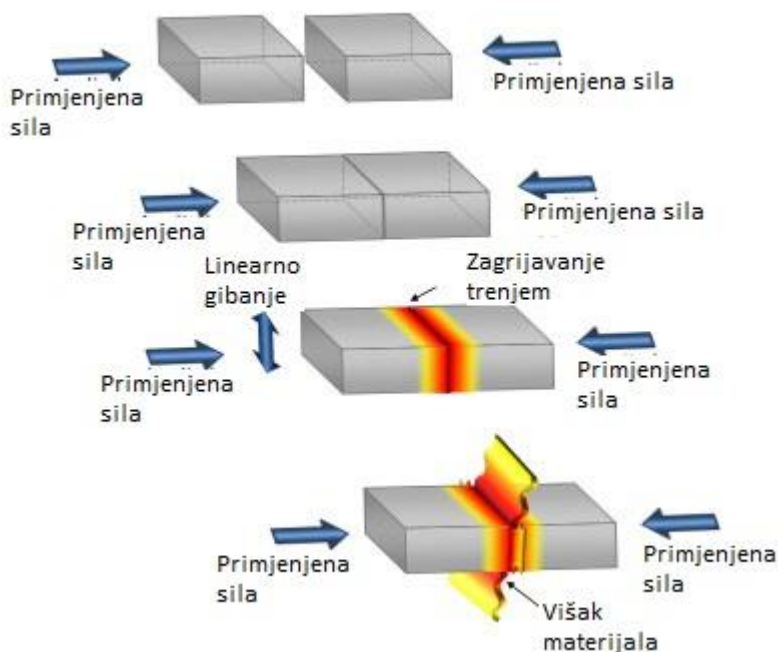
- Od strane Društva zavarivanja (*Welding society*, TWI) [6]

4.1.2. Vrste postupaka

1. Linearno zavarivanje trenjem (*Linear friction welding*, LFW)

Linearno zavarivanje trenjem je proces u čvrstom stanju u kojem se jedan dio pomiče linearnim gibanjem velikom brzinom i pritisne se uz drugi dio koji miruje. Rezultat trenja je zagrijavanje dijelova zbog čega se spajaju.

Linearno zavarivanje trenjem pruža brz, ponovljiv i fleksibilan proces proizvodnje za proizvođače na mnogim industrijskim tržištima koji proizvode dijelove s različitim geometrijskim oblicima. [7]



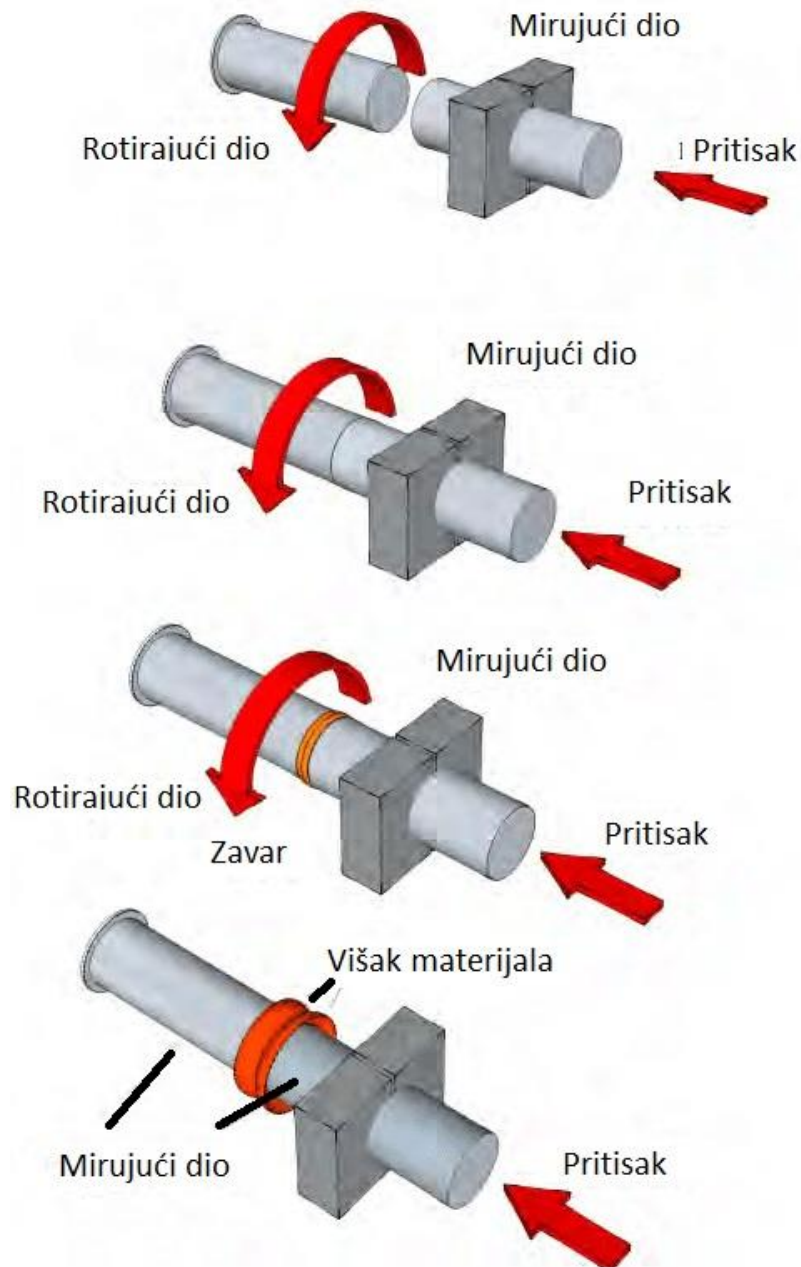
Slika 4.1 Shematski prikaz procesa linearnog zavarivanja trenjem [8]

2. Rotacijsko zavarivanje trenjem (*Rotary friction welding*, RFW)

Rotacijsko zavarivanje trenjem je proces spajanja u čvrstom stanju prilikom kojeg jedan obradak rotira u odnosu na drugi, te se djeluje tlačnom aksijalnom silom.

Trenje između površina proizvodi toplinu, te se materijal dovodi u plastično stanje. Tlačna sila istiskuje materijal s površine dodira, izvorni površinski oksidni sloj i druge nečistoće. Ovaj proces deformacije tvori višak materijala na površini zavara i uzrokuje skraćivanje izratka u smjeru tlačne sile. Jednom kada se postigne potrebno skraćivanje, rotacijsko

kretanje se prekida i sila pritiska se često zadržava ili povećava neko vrijeme kako bi zavar dodatno očvrstnuo. Postoje dva primarna mehanizma za prijenos energije na sučelje zavora: direktni pogon s motora na obradak ili inertni pogon, gdje se rotacija prenosi sa zamašnjaka na obradak. [9]



Slika 4.2 Shematski prikaz rotacijskog zavarivanja trenjem [10]

3. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

4.2. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (FSW), koje je izumio Wayne Thomas u organizaciji TWI Ltd 1991., rješava mnoge probleme povezane s konvencionalnim tehnikama spajanja. FSW

je proces zavarivanja u čvrstom, plastičnom stanju kojim se dobivaju zavari visoke kvalitete u teško zavarljivim materijalima kao što je aluminij. To je relativno novi postupak zavarivanja koji se sve češće koristi za proizvodnju lakih transportnih struktura kao što su čamci, vlakovi i avioni.

Proizvođači su pod sve većim pritiskom da proizvode jače i lakše proizvode uz korištenje manje energije, manje štetnih materijala za okoliš, po nižoj cijeni i brže nego ikad prije. FSW, kao čvrsti, niskoenergetski, ponovljivi mehanički proces sposoban za proizvodnju zavarenih spojeva vrlo visoke čvrstoće u širokom rasponu materijala, nudi potencijalno jeftinije i ekološki prihvatljivo rješenje za ove izazove.

FSW je proces spajanja u čvrstom stanju koji stvara visokokvalitetne spojeve visoke čvrstoće s niskim izobličenjem i sposoban je za izradu čeonih zavara ili u preklopu, u širokom rasponu debljina i duljina materijala.

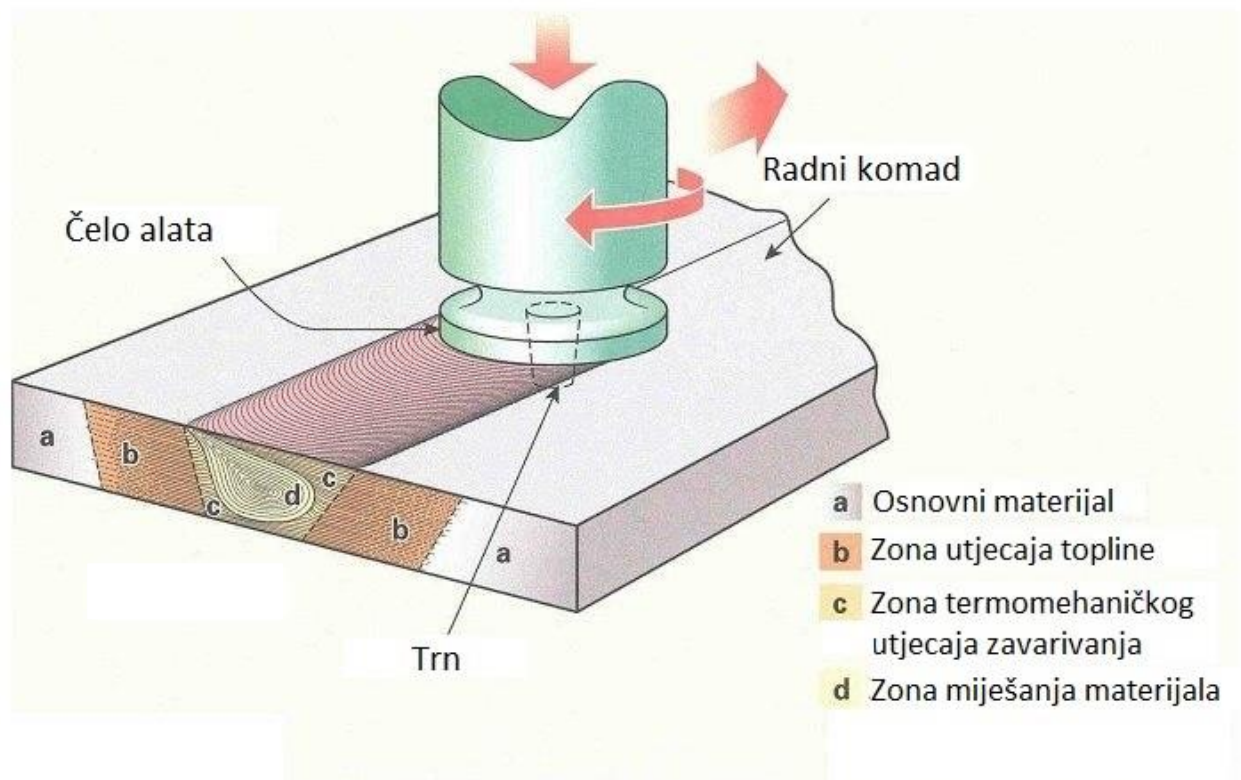
U tom procesu rotirajući FSW alat se utiskuje između dvije stegnute ploče. Toplina trenja dovodi materijal u plastično stanje oko alata. Rotirajući alat se kreće duž linije spoja nakon čega nastaje homogeni čvrsti spoj.

Budući da je FSW proces u čvrstom stanju, eliminiraju se mnogi nedostaci povezani s tehnikama zavarivanja taljenjem, kao što su skupljanje, pukotine i poroznost. [11]

4.3. Vrste zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

4.3.1. Linearno (šavno) zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (FSW) je proces spajanja u čvrstom stanju. FSW radi pomoću alata koji nije potrošni materijal. Alat se rotira i utiskuje u sučelje dvaju obradaka. Alat se zatim pomiče kroz sučelje i toplina trenja uzrokuje zagrijavanje i omekšavanje materijala. Rotirajući alat zatim mehanički miješa omekšani materijal kako bi se dobio čvrsti homogeni spoj. FSW proces ilustriran je na Slika 4.3. [12]

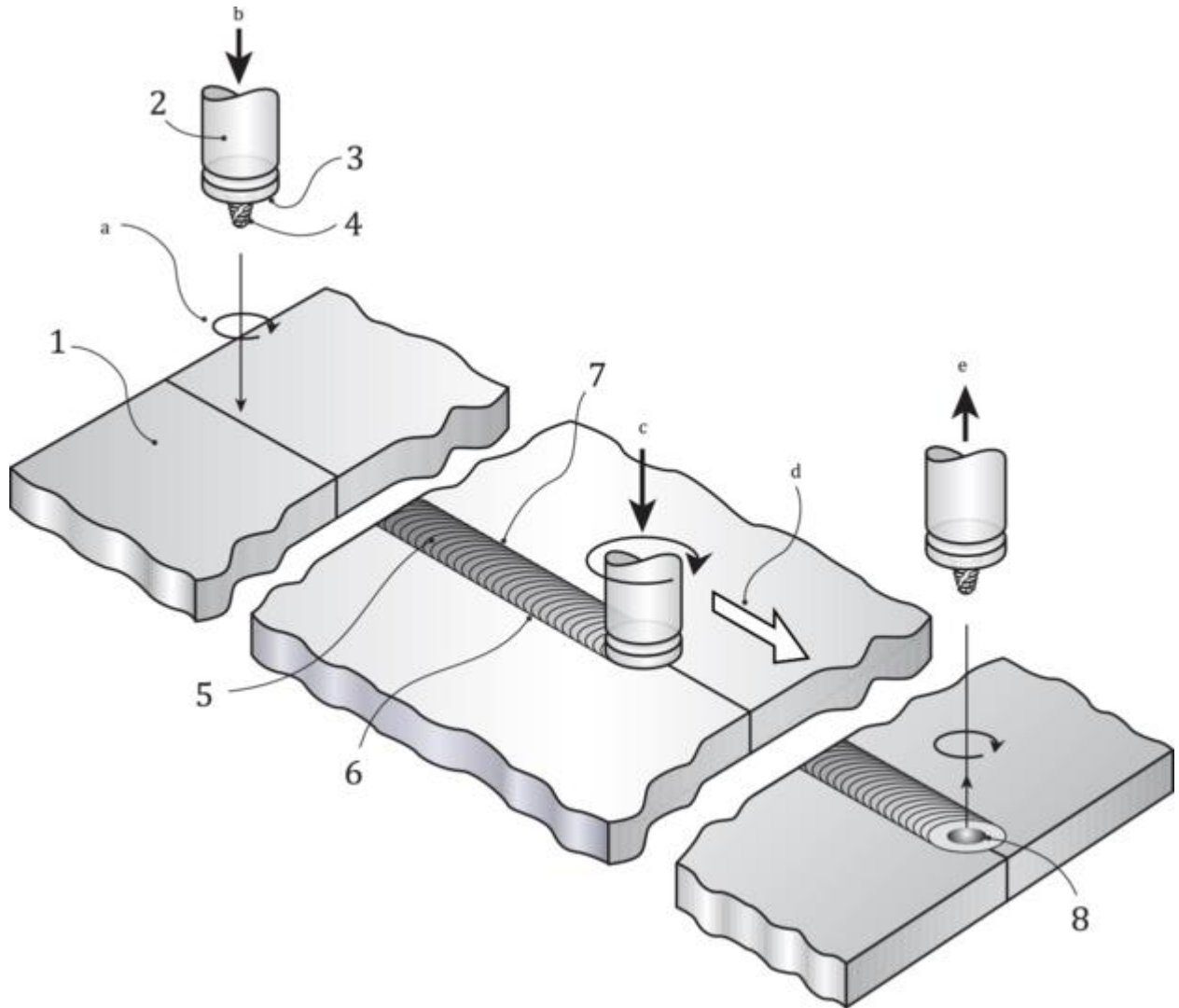


Slika 4.3 FSW proces zavarivanja [12]

Zone pri FSW zavarivanju:

- a. Osnovni materijal – predstavlja stanje materijala prije zavarivanja. U toj zoni nije došlo do nikakvog utjecaja zavarivanja
- b. Zona utjecaja topline (ZUT; HAZ – *Heat Affected Zone*)– u ovoj zoni postoji utjecaj topline od trenja zavarivanja, no nije došlo do nikakvih deformacija
- c. Zona termomehaničkog utjecaja zavarivanja (TMAZ – *Thermo Mechanical Affected Zone*) – u ovoj zoni je došlo do maksimalne deformacije materijala, no još nije došlo do miješanja materijala
- d. Zona miješanja materijala (NZ – *Nugget Zone*) – u ovoj zoni se materijali dvaju radnih komada miješaju [13]

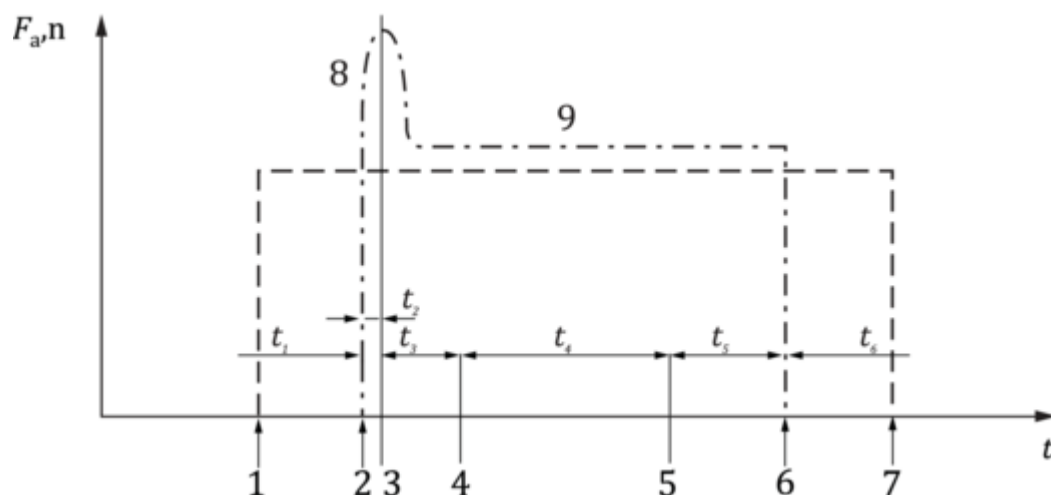
ISO 25239: 2020 je norma koja definira pojmove vezane uz zavarivanje trenjem uz miješanje.



Pojmovi:

1 - obradak	a - smjer rotacije alata
2 - alat	b - spuštanje alata
3 - rame	c - aksijalna sila
4 - trn	d - smjer zavarivanja
5 - lice zavara	e - podizanje alata
6 - strana dovođenja materijala	
7 - strana odvođenja materijala	
8 - završni krater zavara	

Slika 4.4 Tijek FSW zavarivanja prema normi ISO 25239-1:2020 [14]



Pojmovi:

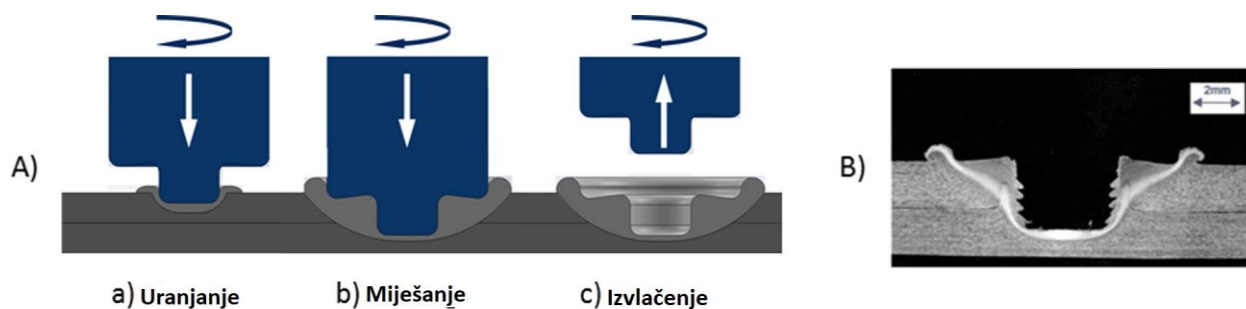
F_a - aksijalna sila (linija crta - točka)	1 - početak rotacije
n - brzina rotacije (crtkana linija)	2 - dodir alata s obratkom
t - vrijeme	3 - dodir čela alata s obratkom
t_1 - vrijeme putovanja alata prema obratku	4 - početak pomicanja alata
t_2 - vrijeme ulaženja alata u materijal	5 - završetak pomicanja alata
t_3 - vrijeme zadržavanja u početnom položaju	6 - izvlačenje alata iz obratka
t_4 - vrijeme putovanja alata	7 - zaustavljanje rotacije
t_5 - vrijeme zadržavanja na kraju	8 - povećanje aksijalne sile
t_6 - vrijeme podizanja alata	9 - konstantna aksijalna sila

Slika 4.5 Općeniti dijagram FSW zavarivanja [14]

4.3.2. Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (FSSW) je proces spajanja materijala u čvrstom stanju. FSSW postupak se razvio iz FSW postupka. Tijekom točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom ne dolazi do linearnog pomicanja alata. To rezultira lokaliziranim točkastim zavarom. Koristi se samo za preklopni spoj na limovima. Iako je FSSW kontinuirani proces, odvija se u tri faze: utiskivanje, miješanje i izvlačenje, kao što je prikazano na Slika 4.6 A).

Ključni industrijski pokretači za ovu tehnologiju su zamjena tehnologija spajanja s dodavanjem mase kao što je primjerice zakivanje, te mogućnost spajanja niza različitih materijala, koje je trenutno teško spojiti pomoću konvencionalnih procesa zavarivanja. Unatoč interesu za tehnologiju u nizu sektora, došlo je do ograničene industrijske implementacije, što je dijelom posljedica zabrinutosti zbog male površine zavara i proizvedene izlazne rupe. [15]



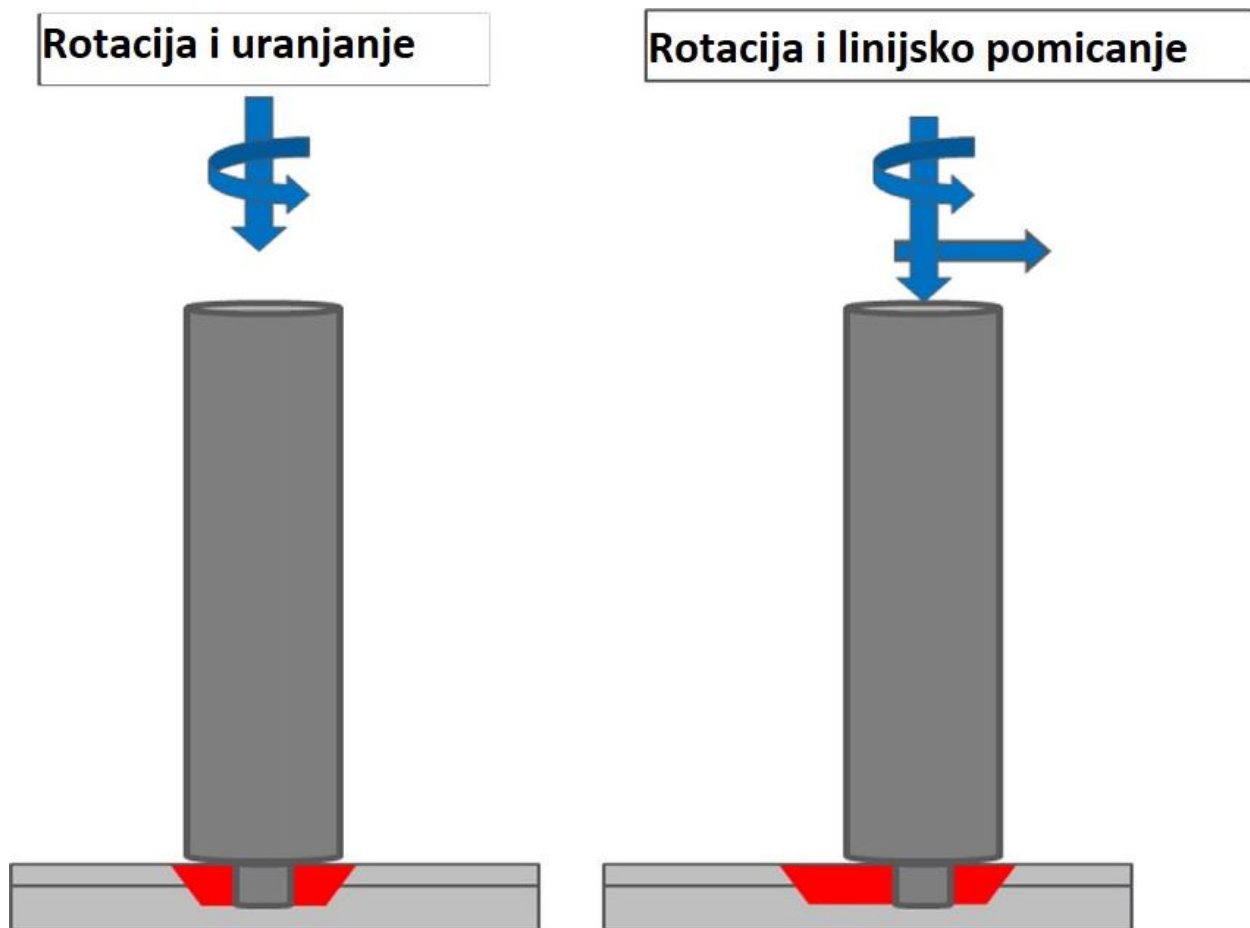
Slika 4.6 A) Shematski prikaz konvencionalnog FSSW postupka zavarivanja; B) Poprečni presjek zvara dobiven FSSW postupkom [15]

ISO 18785:2021 je norma koja se sastoji od pet dijelova. Opisuje detaljne zahtjeve kod točkastog zavarivanja trenjem uz miješanje, te daje detaljne upute i smjernice.

- ISO 18785-1:2021 Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje - Aluminij - 1. dio: Terminološki rječnik
- ISO 18785-2:2021 Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje - Aluminij - 2. dio: Oblikovanje zavarenih spojeva
- ISO 18785-3:2021 Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje - Aluminij - 3. dio: Osposobljenost zavarivačkog osoblja
- ISO 18785-4:2021 Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje - Aluminij - 4. dio: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja
- ISO 18785-5:2021 Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje -- Aluminij -- 5. dio: Zahtjevi za kvalitetu i inspekciju [16]

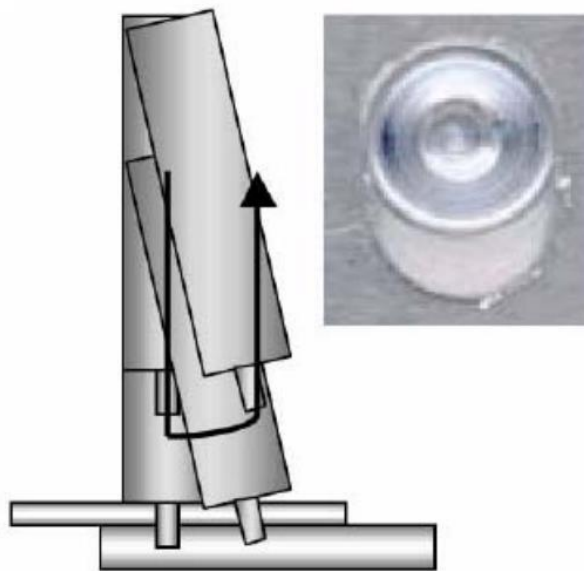
U normi 18750-1:2021 su navedena četiri postupka točkastog zavarivanja trenjem uz miješanje:

- Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje s popunjavanjem (*Refill FSSW*)
- Šavno točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje (*Stitch FSSW*)
 - Kod ove vrste zavarivanja dolazi do manjeg linijskog pomaka alata



Slika 4.7 Shematski prikaz šavnog FSSW zavarivanja [17]

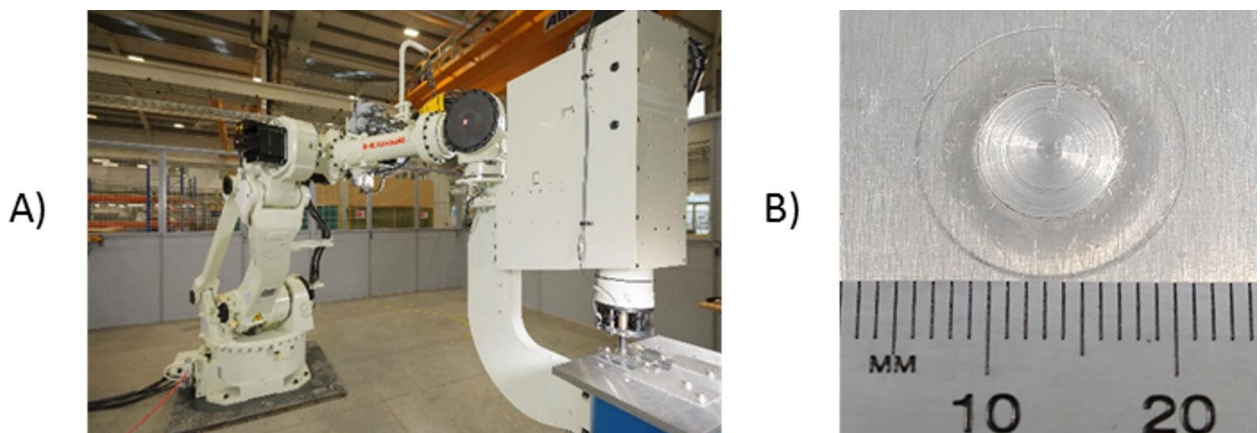
- Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje s rotacijskim gibanjem alata (*Swept FSSW*)
- Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje s nagibom alata (*Swing FSSW*) [16]



Slika 4.8 Shematski prikaz FSSW zavarivanja s nagibom alata [18]

4.3.3. Točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom s ispunjavanjem (Refill FSSW)

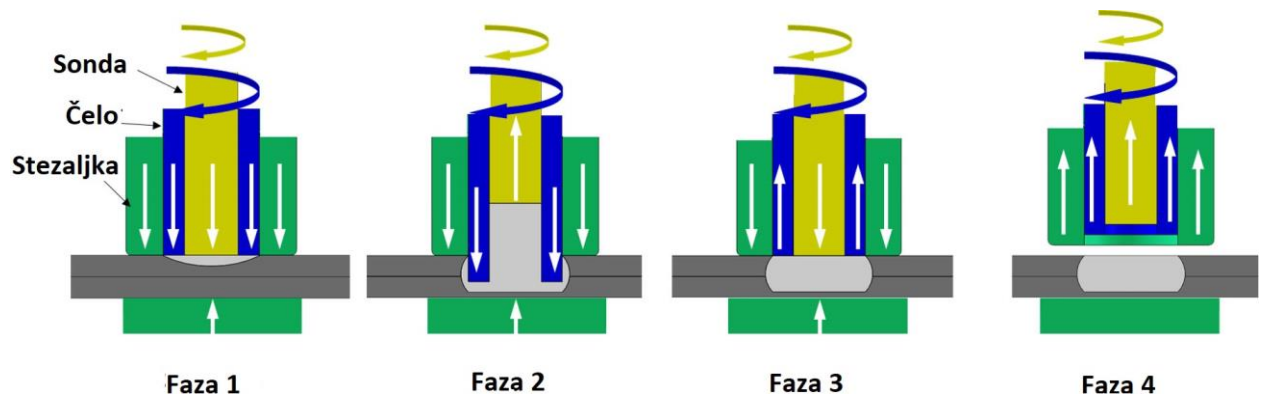
Kako bi se riješio problem izlazne rupe i male površine zavora, 2004. patentirana je nova varijanta procesa - točkasto zavarivanje trenjem s ispunjavanjem (Refill FSSW). Proces koristi ne potrošni alat koji se sastoji od dvije rotirajuće komponente - sonde i tijela alata – koncentrično sastavljen sa statičkim steznim prstenom. Glavno poboljšanje ovog procesa, u usporedbi s drugim procesima zavarivanja trenjem s miješanjem, je to što rotirajući elementi imaju neovisno okomito kretanje. To omogućuje proizvodnju točkastih zavora bez izlazne rupe nakon vađenja alata, kao što je prikazano na Slika 4.9 B). [15]



Slika 4.9 A) Refill FSSW oprema na TWI Cambridge-u; B) Površina Refill FSSW zavora [15]

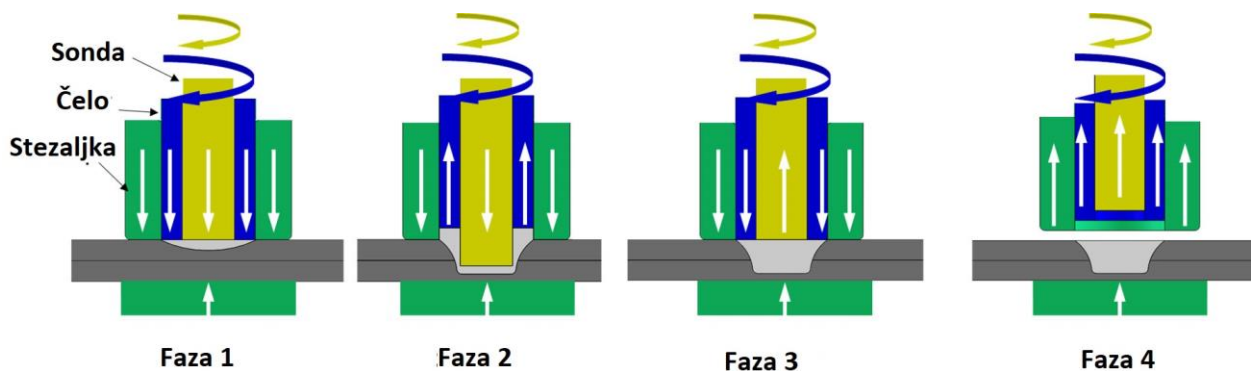
Postoje dvije varijante Refill FSSW postupka:

- a. S utiskujućim čelom
- b. S utiskujućom sondom



Slika 4.10 Refill FSSW proces s utiskujućim čelom [15]

Kod procesa s utiskujućim čelom, vanjski dio (čelo) ulazi tijekom rotacije u materijal, a sonda se izvlači kako bi napravila mjesta za višak materijala kojim se na kraju postupka popunjava izlazna šupljina. Slika 4.10 prikazuje faze tog postupka.

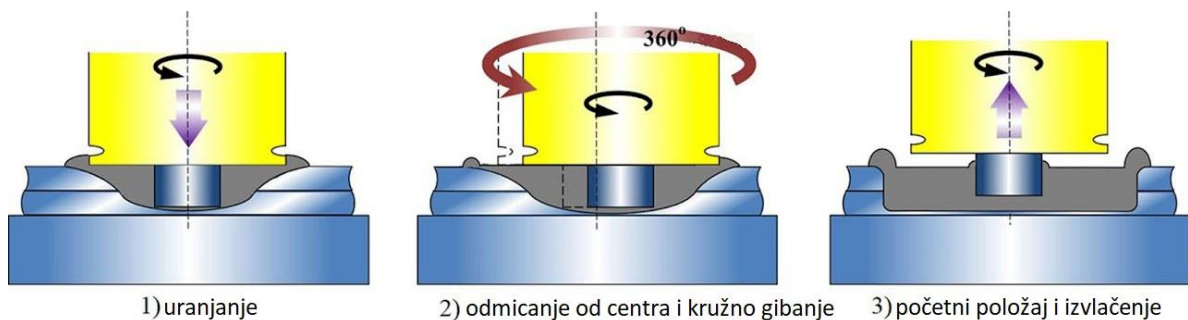


Slika 4.11 Refill FSSW proces s utiskujućom sondom [15]

Kod procesa s utiskujućom sondom, unutarnji dio (sonda) ulazi tijekom rotacije u materijal, a čelo se izvlači kako bi se napravilo mjesta za višak materijala kojim se na kraju postupka popunjava izlazna šupljina. Slika 4.11 prikazuje faze tog postupka.

4.3.4. Točkasto zavarivanje trenjem uz miješanje s rotacijskim gibanjem alata (Swept FSSW)

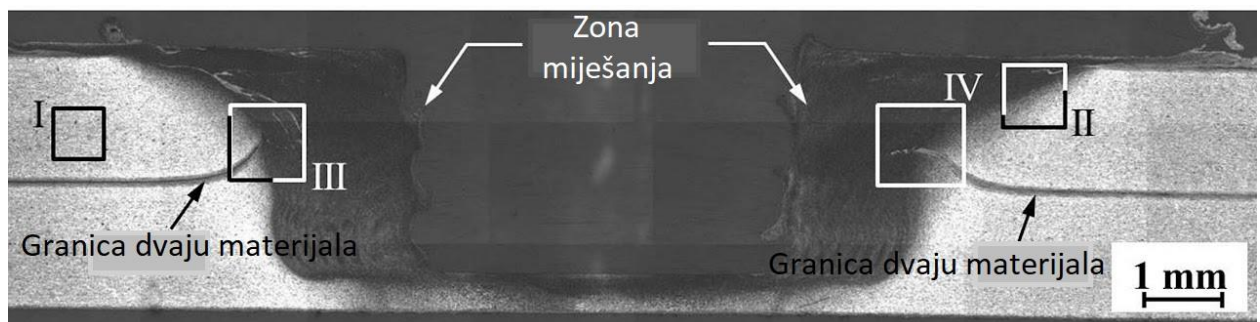
Proces točkastog zavarivanja trenjem uz miješanje s rotacijskim gibanjem alata je prilično složen i može se podijeliti u tri dijela. U prvom dijelu, rotirajući alat ulazi u materijale koji se zavaruju. U drugom dijelu, alat se udaljava od početnog položaja, a zatim se pomiče u smjeru suprotnom od kazaljke na satu duž kružnice kako bi se promiješalo više materijala tijekom procesa. Konačno, alat se pomiče unatrag na početno mjesto. Mehanička izvedba Swept FSSW zavarivanja je bolja od konvencionalnog FSSW zavarivanja uglavnom zbog veće zone miješanja. [19]



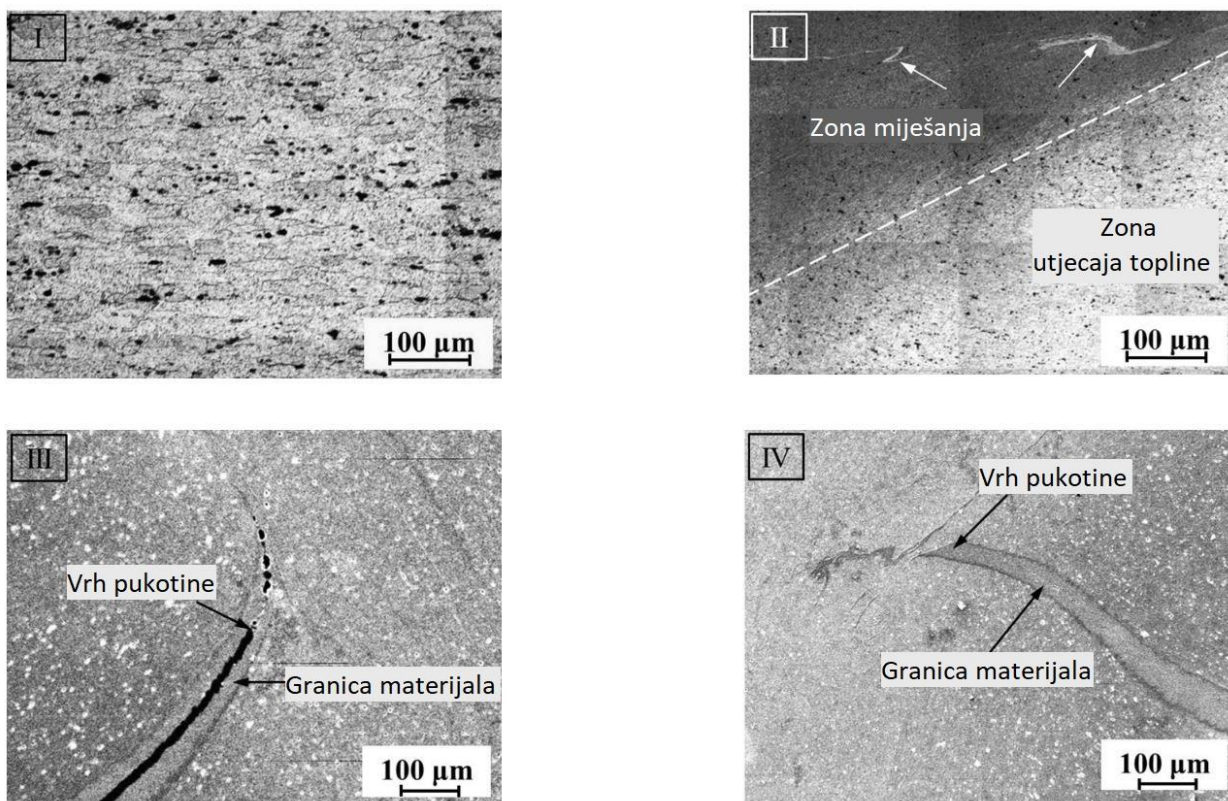
Slika 4.12 Shema Swept FSSW postupka zavarivanja [19]

Slika 4.12 prikazuje faze Swept FSSW postupka.

- 1) U prvoj fazi se alat utiskuje u materijal te se kratko vrijeme zadržava u početnom položaju.
- 2) U drugoj fazi alat se odmiče linearno od početnog položaja, te započinje rotacijsko gibanje alata suprotno smjeru kazaljke na satu, dok se sam alat i dalje rotira suprotno od smjera kazaljke na satu.
- 3) U trećoj fazi se alat vraća u početni položaj, završava se rotacija i izvlači se iz materijala.



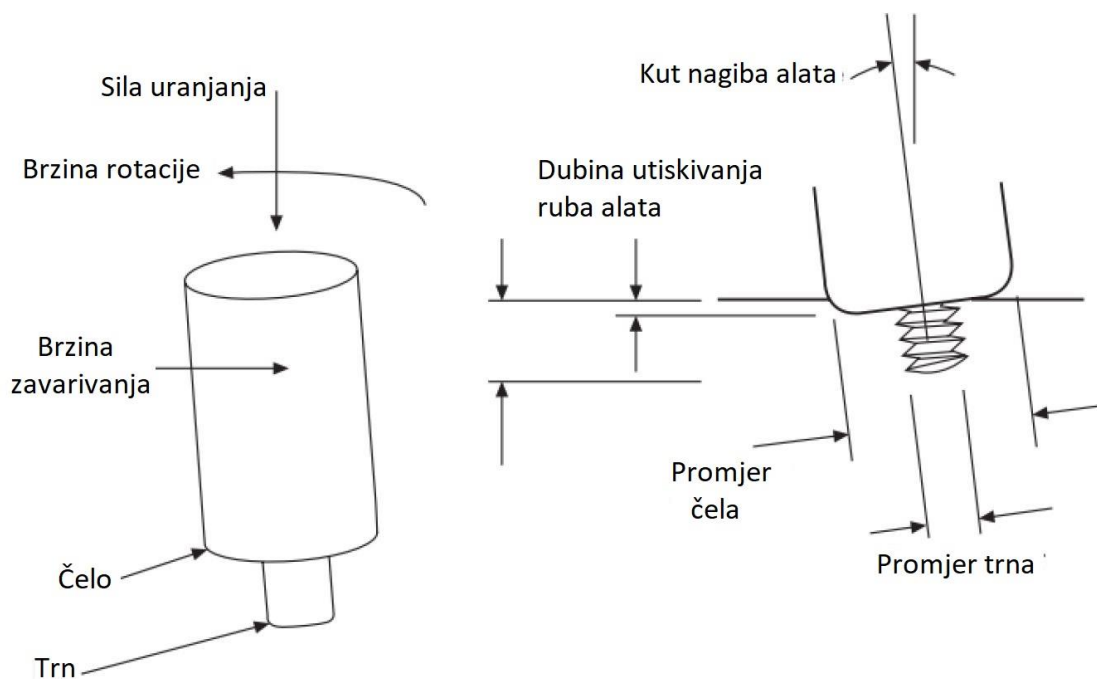
Slika 4.13 Izgled Swept FSSW zavara s označenim zonama [19]



Slika 4.14 Zone i detalji u Swept FSSW zavaru [19]

4.4. Parametri pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom

FSW se obično smatra relativno jednostavnim procesom s tri osnovna parametra: brzine rotacije alata, brzine kretanja alata i aksijalne sile. Osim tih parametara postoje još neki parametri. FSW i FSSW postupak su vrlo slični, stoga imaju jednake parametre, no razlikuju se u tome što kod FSSW kod većine postupaka nema parametara vezanih uz gibanje alata, osim u Swing i Swept postupku. [20]



Slika 4.15 Konvencionalni FSW alat i osnovni parametri [20]

Tablica 4.1 Osnovni parametri FSW zavarivanja

Parametri alata	Parametri stroja	Ostali parametri
Oblik čela alata i trna	Brzina zavarivanja	Materijal podloge
Promjer čela	Brzina rotacije	Dimenzije podloge
Promjer trna	Sila utiskivanja ili dubina	Dimenzije obratka
Duljina trna	Nagib alata	Svojstva materijala obratka
Korak navoja		
Dodaci na alatu		

Opis parametara:

- **Brzina rotacije (okr./min)**

Brzina rotacije je brzina kojom se alat rotira oko svoje osi i jedan je važan parametar u FSW-u. Izravno je povezana s povećanjem temperature obrade i njime se može manipulirati kako bi se povećale brzine zavarivanja.

Povećanje brzine rotacije rezultira većom brzinom obrade, ali za razliku od očekivanog, zona deformacije neće kontinuirano rasti. Zona miješanja zavara smanjit će se u veličini sa sve većom brzinom rotacije alata zbog gubitka jačine protoka i naknadnog klizanja materijala na zoni dodira alata i obratka.

Veće brzine rotacije alata rezultirat će većom brzinom obrade i posljedično većim brzinama hlađenja. To utječe na konačnu mikrostrukturu. Brzina rotacije FSW alata ima znatno veći utjecaj na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavarenih spojeva trenjem nego utjecaj brzine kretanja alata ili aksijalne sile.

- **Sila utiskivanja (kN)**

Sila utiskivanja je sila koja djeluje na radni komad duž osi rotacije alata.

Primijenjena sila prema dolje osigurava kontinuirani kontakt između ramena i površine obratka, kako bi se generirala toplina trenjem ovih dviju površina. Ova sila je neophodna kako bi se osigurala konstantna dubina utiskivanja ruba čela i dobar zavar. Mora se primijeniti odgovarajuća aksijalna sila kako bi se postigao odgovarajući pritisak, neophodan za postizanje dobrog spoja.

- **Vrijeme zadržavanja**

Vrijeme zadržavanja je vremenski period u kojem alat ostaje rotirajući na istom mjestu, obično se dodjeljuje na početku i na kraju zavara kod FSW zavarivanja. Kod FSSW zavarivanja to je ukupno vrijeme trajanja zavarivanja jer se alat ne miče, već ulazi, zadržava se i izlazi na istom mjestu.

Nakon što je alat za zavarivanje utisnut u obradak, alat se obično kreće linijski duž spoja bez zaustavljanja, ali u nekim materijalima može biti potrebno neko vrijeme ostati na mjestu utiskivanja kako bi se alatu za zavarivanje i obratku omogućilo postizanje više temperature, jer toplinsko omekšavanje omogućuje pokretanje poprečnog zavarivanja.

- **Temperatura predgrijavanja**

Unatoč tome što je prethodno zagrijavanje pokazalo dobre rezultate spajanja, dodatni korak zagrijavanja ne utječe samo na jednostavnost procesa, već i produžuje vrijeme procesa, pa se koristi vrlo rijetko.

- **Temperatura naknadnog zagrijavanja**

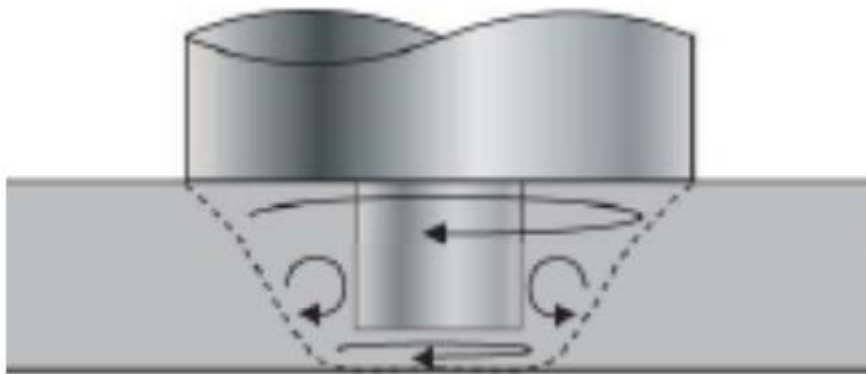
FSW je proces zavarivanja kojim se mogu izbjeći procesi nakon zavarivanja (toplinska ili hladna obrada), što povećava produktivnost i smanjuje troškove proizvodnje. Međutim, toplinski tretmani nakon zavarivanja mogu se primijeniti, kao što je starenje nakon zavarivanja, kako bi se poboljšala statička i antikorozijska svojstva spojeva, osobito u aluminijskim legurama. Ova obrada je prikladnija za materijale koji su u nedovoljno ostarjelom stanju kako bi se zavareni materijali doveli u stanje koje nudi dobra korozijska svojstva s prihvatljivim mehaničkim svojstvima, ujedno sprječavajući prekomjerno starenje određenih zona. Neke aluminijske legure, dizajnirane tako da imaju posebno jaku reakciju na starenje, mogu se zavariti i imati optimalnu čvrstoću ukoliko se alat za zavarivanje prati vodom za gašenje jer voda raspršena po dijelovima ne ometa proces zavarivanja.

- **Brzine zagrijavanja i ohlađivanja**

Brzine zagrijavanja i hlađenja određuju mehanička svojstva zavarenog spoja. Parametri obrade odabrani samo na temelju optimalnih brzina zagrijavanja i hlađenja nisu u stanju dati optimalne parametre i na taj način utjecati na krajnje mikrostrukturne transformacije, povećavajući mogućnost stvaranja nedostataka u zavarenom spoju. Visoka toplinska difuzivnost donosi visoku stopu hlađenja materijala, ali mali ZUT. Suprotno tomu, niža difuzivnost dovodi do sporijeg hlađenja i većeg ZUT-a. [20]

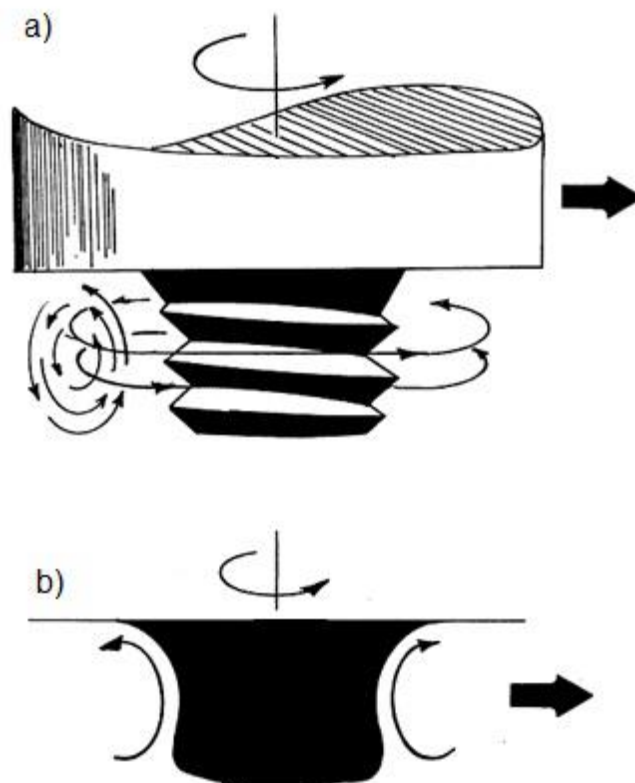
4.5. Miješanje materijala pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom

Princip nastajanja spoja kod FSW zavarivanja je prilično jednostavan. Materijal se prvo zagrijava zbog trenja koje nastaje između alata i obratka, te zbog toga omekša. Nakon što je materijal omekšan, odnosno doveden u plastično stanje vrh alata, trn se utiskuje u materijal. Rotacija alata omogućuje hidromehaničko gibanje nestlačivog omekšanog materijala sa prednje strane alata na stražnju i obrnuto sa stražnje na prednju stranu, odnosno miješanje dvaju materijala. Materijal se prenosi naljepljivanjem na alat, te potiskivanjem oblikom alata.

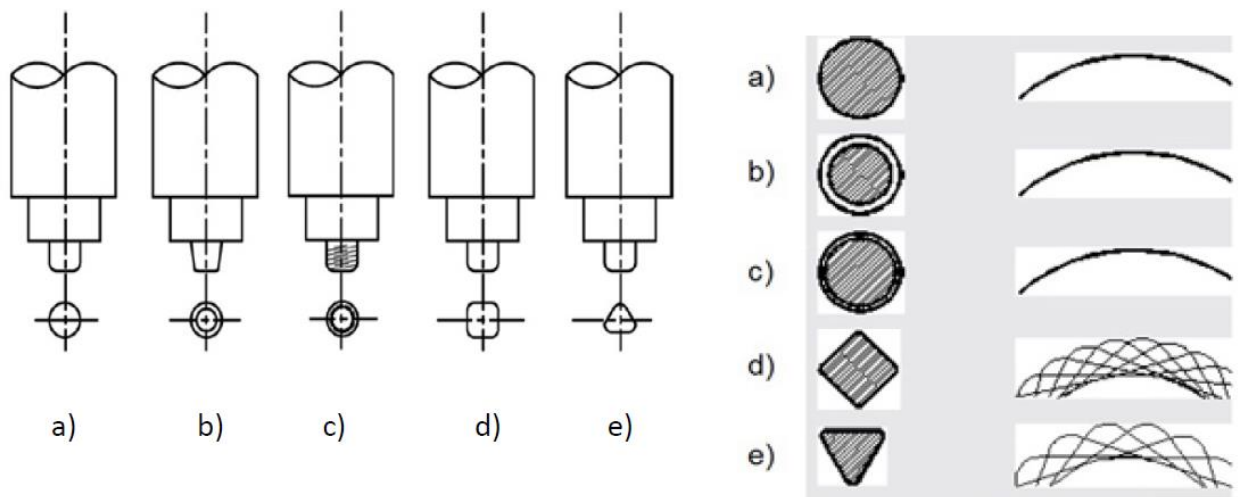


Slika 4.16 Shematski prikaz miješanja materijala alatom [21]

Profil alata utječe na profil zavarenog spoja (Slika 4.17), a presjek trna na miješanje potiskivanjem i naljepljivanjem materijala (Slika 4.18). Miješanje materijala ovisi i o žlijebovima na bočnim stranama trna alata. Pogodnije je dobiti jednolično vertikalno i horizontalno miješanje materijala. [22]

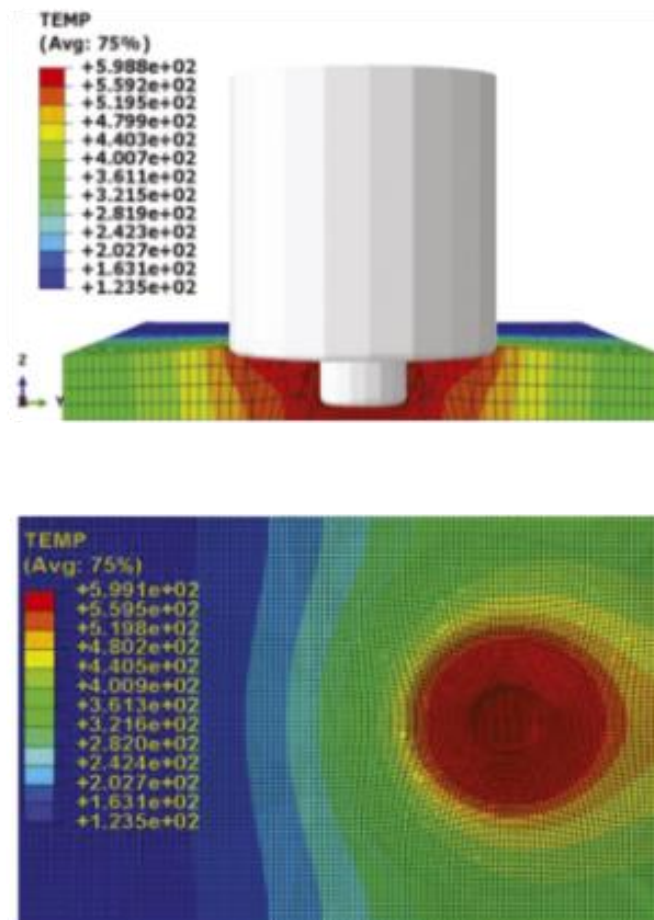


Slika 4.17 Utjecaj oblika trna na miješanje [22]



Slika 4.18 Prikaz različitih presjeka trna alata [22]

Slika 4.19 prikazuje simulaciju točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom gdje su vidljive zone zagrijavanja. Do zagrijavanja dolazi zbog rotacije alata i trenja između alata i materijala koji se miješa.

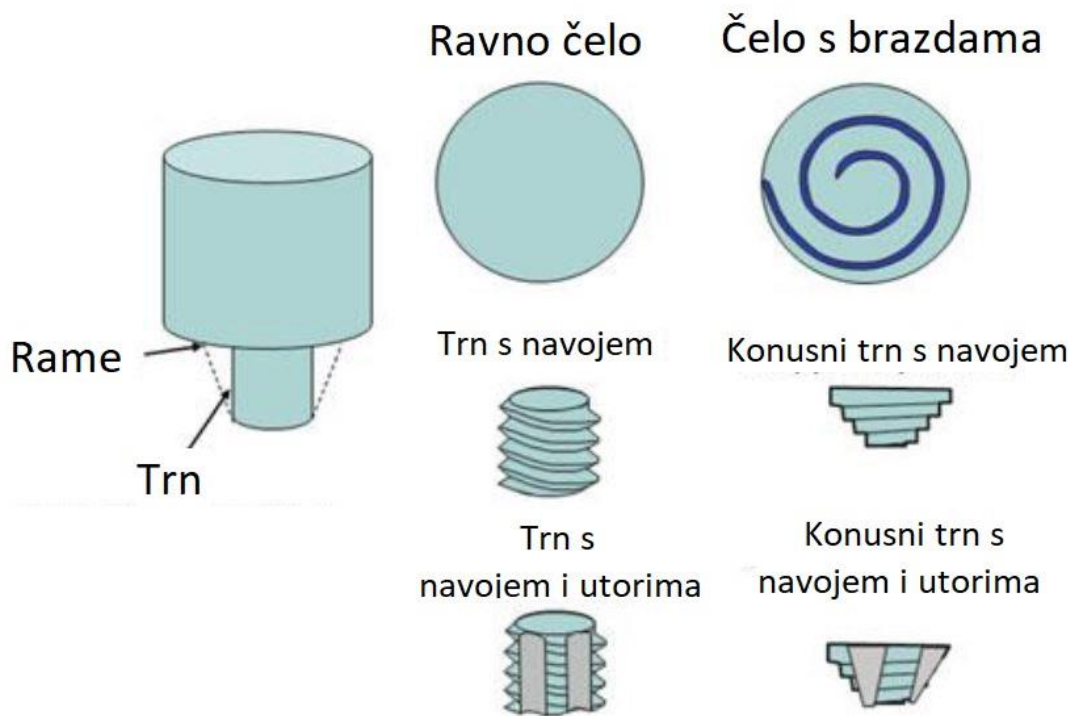


Slika 4.19 Prikaz zona zagrijavanja kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom [23]

4.6. Alati za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Nepotrošni alat, s profiliranim trnom i ramenom, rotira se i utiskuje u spoj između dva obratka. Zatim prelazi duž linije spoja, uzrokujući trenjem zagrijavanje i omekšavanje materijala. Rame također djeluje tako da potiskuje ovaj omekšani materijal, koji se mehanički miješa kako bi se stvorio zavar u čvrstoj fazi. [24]

Tradicionalni FSW postupak temelji se na umetanju rotacijskog alata, koji se sastoji od trna i ramena, u spojene obratke koji se zavaruju i koji se kreće duž zavarenog spoja. Ovaj alat je nepotrošan i ključna je komponenta FSW procesa. Izbor materijala i geometrije alata ovisi o materijalu koji se zavaruje, dimenzijama materijala, konfiguraciji spojeva i drugim potrebnim svojstvima.



Slika 4.20 Shematski prikaz alata i oblika trna alata [20]

4.6.1. Vrste alata za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Jedno od važnih odabira pri izboru alata je njegov materijal, koji ima šest osnovnih karakteristika:

- Čvrstoća na sobnoj i radnoj temperaturi
- Vijek trajanja na radnoj temperaturi

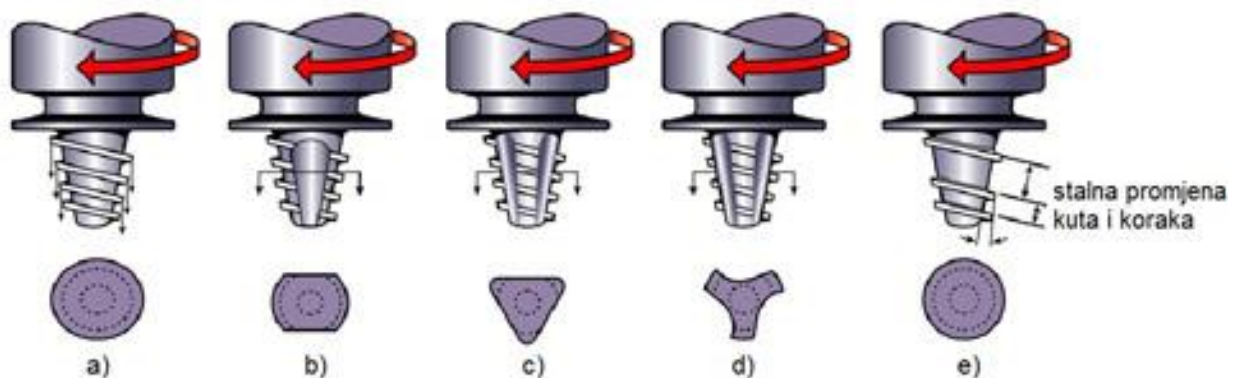
- Lomna čvrstoća
- Tribološka svojstva
- Dugotrajna toplinska stabilnost
- Kemijska reaktivnost

Za najčešću primjenu FSW-a, a to je zavarivanje aluminijskih legura, koriste se materijali od alatnog čelika iako ne postoji prihvaćeni standardni alatni materijal. Prilikom zavarivanja aluminijskih legura debljine od 6 do 12 mm obično se koristi alatni čelik H13. Za veće debljine ili ako je potrebno povećanje produktivnosti, trn alata može biti izrađen od MP129 ili materijala veće čvrstoće na temperaturi zavarivanja, ali rame alata još uvijek može biti izrađeno od H13. Drugi pristup tome može biti razvoj kompliciranijeg dizajna alata, koji ima bolja svojstva.

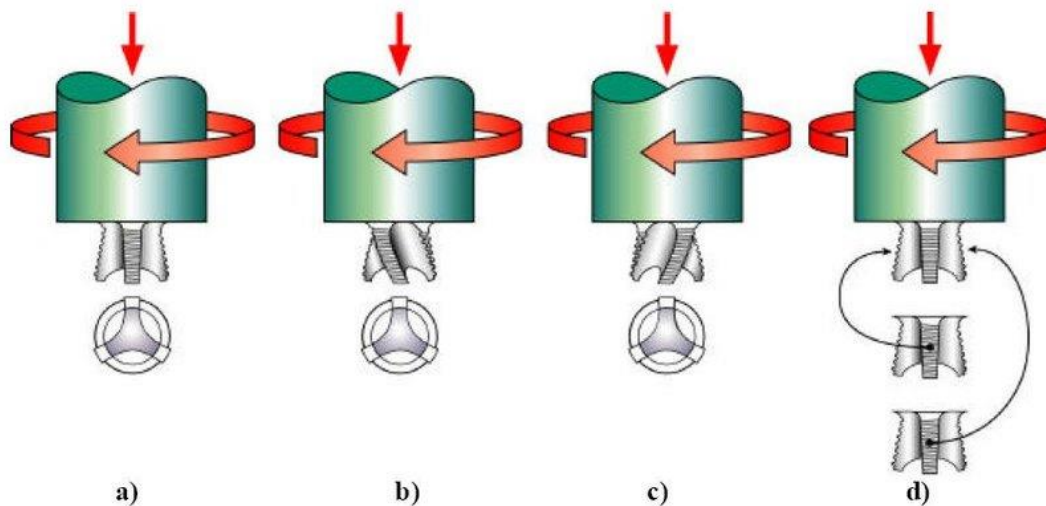
Drugi materijali, kao što su titan, čelik ili bakar, mogu zahtijevati alate izrađene od materijala na bazi volframa, polikristalnog kubičnog borovog nitrida ili drugih materijala visokih performansi koji podnose visoke temperature. [20]

Primjeri alata za FSW zavarivanje

Pokusi su provedeni s Whorl™ +FSW alatom prikazanim na Slika 4.21, koji je uključivao lopatičan profil s ramenom sa trnom u obliku užeta koja je uključivao spiralni greben s bočnim ravnima dizajniranim da provlače plastificirani materijal prema dolje. Nagib alata uključivao je kombinirani nagib od 3° s oštrim kutom prema početku zavora u skladu s uzdužnim smjerom zavarenog šava i nagib od 1° prema povlačenoj strani zavora nagibom obratka.



Slika 4.21 Whorl™, Prikaz različitih izvedbi poprečnih presjeka trna alata: a) konusni b) lopatica c) trokutasti d) propulzni e) promjenjivog kuta [25]



Slika 4.22 Flared-Triflute™, Prikaz različitih izvedbi navoja na trnu alata:

a) neutralni b) lijevi c) desni d) promjenjive zavojnice [26]

4.7. Primjena zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Proces se prvenstveno koristi u industriji za spajanje aluminijskih legura svih razreda, bilo da su lijevani, valjani ili ekstrudirani. Pokazalo se da se FSW zavarivanjem mogu izvesti zavari čeonih spojeva od aluminijske legure debljine između 0,3 mm do 75 mm u jednom prolazu, ovisno o svojstvima legure i mogućnostima FSW stroja.

Ostali materijali koji se mogu zavarivati s FSW uključuju magnezij, titan, bakar, nikel i legure čelika, polimeri i metalni kompoziti. Također se pokazalo da ovaj proces može zavariti različite kombinacije ovih materijala, uključujući aluminij i čelik.

FSW se koristi za razne primjene u industrijama u rasponu od zrakoplovstva do brodogradnje i željeznice do elektronike, uključujući kućišta za baterije za električna vozila. [24]

Primjeri primjene

- **Oprema za autoklav**

APCO Technologies SA iz Švicarske je napravio veliki autoklav stol za polimerizaciju kompozitnih satelitskih komponenti. Stol je proizveden korištenjem više ploča i FSW-a. Konačna površina stola je dimenzija 6,1 m x 4,3 m s debljinom od 20 mm i izrađena je od četiri ploče od legure aluminija i magnezija AA5083. Zavarivanje sa obje strane rezultira minimalnim izobličenjem. Dodatni procesi uključuju toplinsku obradu za ublažavanje naprezanja nakon zavarivanja i strojnu obradu ploča. Zavari se ne mogu razlikovati od ostatka ploče i unutar su tolerancijskog polja.



Slika 4.23 Autoklav tvrtke APCO Technologies SA [27]

- **Stolovi za ispitivanje vibracija**

Stol za ispitivanje vibracija omogućuje montažu uzorka na vibracioni stol i prijenos sile koje proizvodi vibracioni stol. Potrebno je uključiti odgovarajuće metode dizajna i proizvodnje kako bi se osigurao siguran rad uređaja. Aluminijski se najčešće koristi za proizvodnju stolova i pribora za vibracije. Ostali materijali uključuju čelik i aluminij. Učvršćenje treba biti dizajnirano tako da bude što je moguće čvršće kako bi se izbjegle nepotrebne vibracije.

Postoje tri moguća načina za proizvodnju krute konstrukcije:

- proizvodnja počinje s jednim blokom čvrstog materijala i dijelovi materijala se uklanjaju dok se ne postigne željeni oblik. Glavni nedostatak ovog pristupa je stvaranje otpadnog materijala. To je najskuplji način izrade testnog stola.
- lijevanje pruža čvršće pričvršćivanje od zavarenih konstrukcija. Lijevene konstrukcije su fleksibilnije od zavarenih.
- zavarena konstrukcija ima povezane inherentne slabosti, korijenske pukotine ili probušene rupe.

Kao alternativa se može primijeniti zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. Uspoređujući FSW s konvencionalnim metodama zavarivanja, zavarivanje trenjem uz miješanje ima prednost u tome što razbija grube čestice silicija i popunjava sve pore mehaničkom

obradom u aluminijevim legurama. Također, stvara manje izobličenja, manji je unos topline i manje skupljanje.



Slika 4.24 Vibracijski stol tvrtke LDS s magnezijevom pločom zavarenom FSW postupkom [28]

- **Popravak pukotina**

Popravak pukotina korištenjem FSW-a prvi je put uvela tvrtka Boeing. Metoda se sastoji od:

- priprema okolne površine pukotine za sanaciju
- zavarivanje prvog dijela komponente na prvoj strani pukotine
- zavarivanje drugog dijela komponente na drugoj strani pukotine kako bi se formiralo zavareno područje pukotine.

Prednosti u odnosu na postojeće tehnike popravljavanja pukotina uključuju minimalno izobličenje, nisko zaostalo naprezanje i promjenu kemijskih i fizikalnih svojstava. Metoda je otpornija i dugotrajnija od tradicionalnih tehnika popravaka.

- **Podzemna vozila**

Tvrtka Bombardier koristi FSW za spajanje krutih uzdužnih dijelova, koje čine bočne stijenke karoserije. Vozila su korištena za nadogradnju Victoria Line-a, linije londonske podzemne željeznice.



Slika 4.25 Vozilo tvrtke Bombardier iz Victoria Line-a [29]

- **Solarni paneli**

Aluminijski kolektori izrađeni od aluminija mogu se zavarivati pomoću FSW. Ovaj pristup koristi tvrtka Grenzebach. Tanki dijelovi se mogu spojiti uz minimalno izobličenje. FSW smanjuju rizik od curenja, jer su zavari bez grešaka kao što su poroznost i toplinske pukotine. [20]



Slika 4.26 Solarni kolektor zavaren FSW postupkom [20]



Slika 4.27 Robotsko FSSW zavarivanje u tvornici automobila [30]

Slika 4.27 prikazuje upotrebu robotskog FSSW zavarivanja Mazdinoj tvornici. Vidi se kako je za zavarivanje s jedne strane potrebna potpora kako bi se spriječilo udubljivanje materijala.

4.8. Svojstva spoja

Mehanička svojstva aluminijskih legura zavarenih trenjem uz miješanje dokazano su bolja od onih u drugim postupcima zavarivanja, kao što je elektrolučno zavarivanje.

S obzirom na mehanička svojstva FSW-a, ovaj proces obično ima tri glavna mikrostrukturna područja – zona miješanja, termomehanički zahvaćena zona (TMAZ) i zona utjecaja topline (ZUT).

Iako su i zona miješanja i TMAZ zone s termomehaničkim utjecajem od zavarivanja, razmatraju se odvojeno kada su u pitanju mikrostrukturna obilježja. To je zato što zona miješanja prolazi kroz dinamičku rekristalizaciju, dok TMAZ ne. Točan sastav i opseg mikrostrukturnog sastava u tim zonama ovisi o materijalu i uvjetima obrade. Oni se, na primjer, mogu mijenjati ovisno o čimbenicima kao što su parametri zavarivanja i dizajn korištenog FSW alata. [24]

4.8.1. Razorna ispitivanja

Razorna ispitivanja zavarenih spojeva u FSW-u povezana su s kvalifikacijom postupaka zavarivanja (WPQR) i osposobljavanjem zavarivača. Većina komercijalnih primjena FSW-a uključuje aluminij i aluminijske legure. Glavni standardi koji uključuju ispitivanje razaranja FSW zavarenih spojeva su:

- ISO 25239-4:2011 Zavarivanje trenjem uz miješanje – Aluminij – Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja
- WS D17.3/D17.3M:2016 Specifikacija za zavarivanje trenjem aluminijskih legura za primjenu u svemiru
- ABS Vodič za odobrenje zavarivanja trenjem u aluminiju (2011.)
- NASA PRC-0014D (2012.) Specifikacija procesa za zavarivanje trenjem uz miješanje
- NKK (ClassNK) Smjernice za zavarivanje trenjem uz miješanje (2010.)

Sučeonni zavareni spojevi predstavljaju više od 85 % svih zavara proizvedenih FSW postupkom. Preklopni zavareni spojevi prikladni su samo za tanke limove. Zavari cijevi su spojevi sučeoni zavari. Vodič za ABS daje zahtjeve samo za čeonni zavareni spoj. [20]

4.8.2. Nerazorna ispitivanja

Ovisno o primjenjivim međunarodnim/nacionalnim standardima za kvalifikaciju FSW (ISO, AWS, ABS, NASA), primjenjuju se metode za NDT kako su navedene u ovim standardima. AWS D17.3 i ABS Vodič zahtijevaju provođenje NDT ispitivanja u skladu s relevantnim ASTM standardima. S druge strane, NASA specifikacije zahtijevaju provođenje NDT ispitivanja u skladu s relevantnim NASA specifikacijama. Serija ISO 25239 zahtijeva primjenu relevantnih ISO standarda za NDT ispitivanja.

Ispitivanje penetrantima (PT), metoda:

- EN ISO 3452-1:2013 – Ispitivanje penetrantima – Opća načela
- ASTM E1417-16 – Standardna praksa za ispitivanje penetrantima tekućine
- NASA PRC-6506E (2011.) – Specifikacija procesa za inspekciju penetranta tekućine

Radiografsko ispitivanje (RT), metoda:

- EN ISO 17636-1:2013 – Radiografsko ispitivanje – tehnike X- i gama zraka s filmom
- EN ISO 17636-2:2013 – Radiografsko ispitivanje – tehnike X- i gama zraka s DDA
- ASTM E1742-18 – Standardna praksa za radiografsko ispitivanje
- NASA PRC-6503D (2011.) – Specifikacija procesa za radiografsku inspekciju

Ultrazvučno ispitivanje (UT), metoda:

- EN ISO 17640:2017 – Ultrazvučno ispitivanje – tehnike, razine ispitivanja i procjena
- ASTM E164-13 – Standardna praksa za kontaktno ultrazvučno ispitivanje zavarenih elemenata

- NASA PRC-6510A (2011.) – Specifikacija procesa za ultrazvučnu inspekciju zavara

Ultrazvučno ispitivanje višepretvorničkom tehnikom (PA-UT), metoda:

- EN ISO 13588:2012 – Ultrazvučno ispitivanje – Upotreba automatizirane tehnologije faznih nizova
- ASTM E2700-14 – Standardna praksa za kontaktno ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva korištenjem faznih nizova

Ispitivanje vrtložnim strujama (ET), metoda:

- EN ISO 17643:2015 Ispitivanje zavarenih spojeva pomoću vrtložne struje složenom ravninom
- ASTM E2261-17 Standardna praksa za ispitivanje zavarenih spojeva korištenjem tehnike mjerenja polja izmjenične struje
- NASA PRC-6509D (2011.) Specifikacija procesa za inspekciju vrtložnim strujama [20]

4.9. Materijali koji se mogu zavarivati postupkom FSSW

Zavarivanje trenjem može se koristiti za spajanje brojnih različitih materijala, od aluminijskog do materijala poput bakra, magnezija, čelika, plastomera i titana. Također je moguće izvesti zavarivanje različitih materijala. Međutim, zavarivanje materijala visoke točke taljenja je teže jer materijal alata za zavarivanje radi u uvjetima povišene temperature. Izvedba i ekonomska opravdanost za pojedini materijal se moraju razviti kako bi se proces mogao praktično koristiti.

Neka opća pravila, temeljena na prirodi zavarivanja aluminijskog trenjem uz miješanje, mogu se definirati za zavarivanje drugih materijala.

Toplinsko omekšavanje materijala obratka potrebno je za početak procesa zavarivanja, a proces zavarivanja će se odvijati na temperaturi koja je blizu točke taljenja materijala izratka.

Potrebno je da se toplina stvara dovoljnim intenzitetom kako bi se prevladao gubitak topline iz zone zavarivanja kroz vođenje u radni komad.

Potrebno je generirati dovoljno topline, bilo trenjem, plastičnim radom ili pomoćnim grijanjem, pri punom spektru temperatura od početne temperature materijala do temperature zavarivanja.

Zaštitni plin može biti potreban za neke materijale kako bi se spriječile reakcije s atmosferskim plinovima, ali obično nije potrebno kod aluminijskog.

Zavarivanje materijala visoke točke taljenja ograničeno je dostupnošću odgovarajućih materijala za alat za zavarivanje. Novi materijali i geometrije alata za zavarivanje omogućuju spajanje materijala kao što su čelik i titan u laboratorijskom okruženju i u ograničenom broju

proizvodnih primjena. Zavarivanje čelika trenjem uz miješanje nudi niže temperature zavarivanja, što dovodi do vrlo malog izobličenja i jedinstvenih svojstava spoja.

Zavarivanje titana trenjem uz miješanje dokazano je u laboratorijskom okruženju i može se koristiti u izgradnji relativno velikih prototipnih konstrukcija koje je teže zavariti taljenjem. Unatoč tome što se titan smatra materijalom visoke točke taljenja, njegova niska toplinska vodljivost zahtijeva smanjenje unosa topline u alat, bilo minimiziranjem promjera ramena ili eliminacijom rotacije ramena u potpunosti.

Zavarivanje bakra trenjem, čak i debelih obratka, moguće je s relativno velikom brzinom vretena kako bi se dobili čvrsti i visokokvalitetni zavari. [20]

Debljina materijala

Krutost i upravljanje silom glavni su čimbenici FSW stroja, koji ograničavaju debljinu obratka. Debljina materijala treba biti u rasponu od 0,8 mm do 65 mm.

Tablica 4.2 Debljine obradaka iz različitih materijala i materijal alata [20]

Legura	Debljina, mm	Materijal alata
Aluminijeve legure	<12	Alatni čelik, WC-Co
	<26	MP159
Magnezijeve legure	<6	Alatni čelik, WC
Bakar i bakrene legure	<50	Niklove legure, PCBN, wolframove legure
	<11	Alatni čelik
Titanijeve legure	<6	Wolframove legure
Nehrđajući čelik	<6	PCBN, wolframove legure
Nisko legirani čelici	<10	WC, PCBN
Niklove legure	<6	PCBN

4.9.1. Aluminij

Zavarivanje aluminijevih legura trenjem rotirajućim alatom je najčešća primjena FSW procesa.

Glavne varijable FSW, koje kontrolira operater, uključuju dizajn alata i parametre kretanja alata. Čimbenici poput karakteristike stroja, debljina obratka i kontrolni mehanizam također utječu na kvalitetu zavara.

Različiti strojevi za zavarivanje, čak i kada svi čimbenici ostanu isti, rezultirat će varijacijama kvalitete zavara. Parametri stroja će varirati od jednog stroja do drugog, jer je to uzrokovano čimbenicima stroja kao što su krutost, ekscentar alata i preciznost upravljanja. Zahtjevi stroja

značajno će varirati ovisno o leguri, jer legura utječe na zahtjeve za silom stroja. Na primjer, FSW čeoni zavar u 6 mm 1100 aluminijskoj slitini može zahtijevati 2,5 kN ili manje sile pritiska, dok sučeoni zavar u 6 mm 7xxx aluminijskoj leguri može zahtijevati pet puta više sile pritiska.

Materijali alata koji se obično koriste za FSW od aluminijskih legura su alatni čelici koji posjeduju kombinaciju čvrstoće i žilavosti pri visokim temperaturama. [20]

4.9.2. Bakar

Čisti bakar se tali na 1083°C, jedan je od metala s najnižom temperaturom taljenja zavarenog FSW-om. Temperature kao i sile tijekom zavarivanja bakra i njegovih legura nametnut će ograničenja u izboru materijala alata. Konvencionalni čelici za vruću obradu, poput H13 i čisti volfram imaju dobre rezultate s uobičajeno čistim bakrenim materijalima, ali loše s legurama. Alati od sinteriranog karbida imaju slab učinak u odnosu na lomljivost, dok polikristalni kubični alati od bor nitrida imaju dobre rezultate s legurama. [20]

4.9.3. Magnezij

Magnezijske legure mogu zahtijevati malo veću silu potiska nego aluminijske legure ekvivalentne debljine. [20]

4.9.4. Čelik

Čelik zahtijeva najznačajniju razinu sile kao i vrlo visoku razinu krutosti stroja. Trenutni materijali FSW alata osjetljivi su na vibracije i strujanje te stoga diktiraju zahtjeve za vrlo krutim strojem za zavarivanje čelika. [20]

4.9.5. Plastomeri

Postoje tri vrste polimernih materijala – plastomeri, elastomeri i duromeri. Samo plastomeri su zavarljivi polimeri jer imaju sposobnost preoblikovanja nakon zagrijavanja ispod njihove temperature razgradnje. Primjeri takvih polimernih materijala uključuju polivinil klorid (PVC), polistiren (PS), akrilonitril butadien stiren (ABS), polimetil metakrilat (PMMA), polietilen niske i visoke gustoće (PE), polipropilen (PP), politetra fluor etilen (PTFE), najlon-6 (PA 6) i polikarbonat (PC).

Brzina rotacije je glavni procesni parametar u FSW procesu, jer veća brzina rotacije rezultira degradacijom polimera, dok niža brzina rotacije uzrokuje loše miješanje čime se stvaraju šupljine u zoni miješanja. Polimeri visoke temperature taljenja i viskoznosti zahtijevaju veću brzinu rotacije i nisku brzinu zavarivanja.

Profil trna ima glavnu funkciju u određivanju čvrstoće spoja. Korištenje trna s navojem, zbog svoje sposobnosti da adekvatno miješa omekšani materijal, može rezultirati dobrim rezultatima zavarivanja. Velika površina trna s navojem stvara veću toplinu trenja koja je bitan preduvjet za stvaranje zavara. Međutim, konusni trn je najbolji profil za akrilonitril butadien stiren i polietilen visoke gustoće.

Predgrijavanje prije FSW procesa može povećati čvrstoću spoja, ali je to dodatni korak zagrijavanja, koji ne samo da utječe na jednostavnost procesa već i produžuje vrijeme procesa.

Drugi pristup je izvođenje zavarivanja pod vodom kako bi se dobila veća vlačna vrijednost spoja u usporedbi sa zavarivanjem na zraku. Zove se potopljeni FSW.

Uklanjanje defekta korijena u FSW polimera poboljšava čvrstoću zavarivanja. [20]

4.9.6. Titan

Mnogo više radne temperature titanovih legura u odnosu na Al legure ograničavaju izbor materijala alata na vatrostalne metale kao što su volfram (uključujući volfram-renij) i legure molibdena ili robusni kermeti kao što je WC/Co. Kod ovih materijala je zabrinjavajući vijek trajanja alata, jer je zagrijani titan izvrsno otapalo za mnoge komponente ovih alata.

Reaktivnost titanovih legura kao i vatrostalnih metala zahtijevaju korištenje zaštite od inertnog plina. Zaštita plina eliminira atmosfersku kontaminaciju ograničavanjem dušika, kisika i vodika iz atmosfere oko alata i obratka kako bi se izbjegla krhkost. Poželjno rješenje je korištenje komore inertnog plina koja se može napuniti inertnim plinom prije svakog zavarivanja. [20]

4.9.7. Raznorodni materijali

Različiti metalni spojevi imaju veliki potencijal u praktičnim primjenama za zamjenu zakovnih spojeva što dovodi do ušteda troškova i uštede na težini. Izazovi tijekom FSW-a raznorodnih materijala uključuju razlike u mehaničkim, fizikalnim, kemijskim, metalurškim i toplinskim svojstvima. Općenito, različiti metali i legure mogu biti spojeni FSW-om. To se postiže jakom plastičnom deformacijom oba materijala koja se spajaju zajedno. To dovodi do rekristaliziranih, ravnoosnih i obično submikronskih zrnaca, koja nastaju u zoni zavara nakon skrućivanja. Tijekom zavarivanja obojenih materijala kao što je aluminij, krhke intermetalne faze često se stvaraju na

spoju zavara različitih zavarenih spojeva. Sučelja zavara u različitom spoju povezana su s oštrim promjenama u rezultirajućim svojstvima zbog heterogene prirode zavara. FSW različitih materijala s dobrim integritetom spojeva bolje se postižu kada je trn alata pomaknut i kada se materijal s visokom temperaturom taljenja stavi na stranu odvođenja materijala. Pomak treba napraviti u materijalu s nižom temperaturom taljenja.

Moguća kombinacija različitih spojeva uključuje različite legure aluminija, legure aluminija i magnezija, legure aluminija i čelika, aluminija i titana, aluminija i bakra. [20]

4.10. Prednosti zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom nudi niz prednosti u odnosu na konvencionalne postupke elektrolučnog zavarivanja.

- kao proces zavarivanja u čvrstom stanju, FSW je metoda spajanja u velikoj mjeri bez deformacija, bez toplih pukotina, poroznosti ili pukotina skrućivanja
- zbog nižih temperatura dolazi do smanjenja skupljanja i deformiranja u materijalu koji se spaja
- za aluminijske legure nisu potrebni dodatni materijali, električni luk ili zaštitni plin
- FSW je ekološki prihvatljiv jer ne proizvodi dim, prskanje ili UV zračenje
- koristi tehnologiju alatnih strojeva, što proces čini lakim za automatizaciju, vrlo ponovljivim i smanjuje potrebu za kvalificiranim zavarivačima
- može raditi u bilo kojem položaju
- dobra mehanička svojstva, koja su za aluminijske legure obično jednaka ili nadmašuju ona koja se mogu postići konvencionalnim procesima
- energetski učinkovit
- može spojiti mnoge teško zavarljive aluminijske legure, poput onih iz serije 2xxx i 7xxx
- nema potrebe za posebnom pripremom rubova u većini primjena [24]

4.11. Nedostaci zavarivanja trenjem rotirajućim alatom

Dok zavarivanje trenjem rotirajućim alatom pruža mnoge prednosti, postoji nekoliko ograničenja povezanih s postupkom. To uključuje:

- izlaznu rupu ostavljenu nakon izvlačenja alata iz materijala koji se spaja; to se obično može uzeti u obzir u dizajnu konstrukcije ili korištenjem dodatnog materijala na početku i kraju zavora gdje alat ulazi i izlazi
- potrebu za značajnom pritisnom silom i silama pomicanja što znači da je stezanje dijelova koji se spajaju značajnije nego za elektrolučno zavarivanje
- razmake između dijelova koji se zavaruju – potrebno je kontrolirati jer se u procesu ne koristi dodatni materijal [24]

5. Eksperimentalni dio

5.1. Opis eksperimentalnog dijela

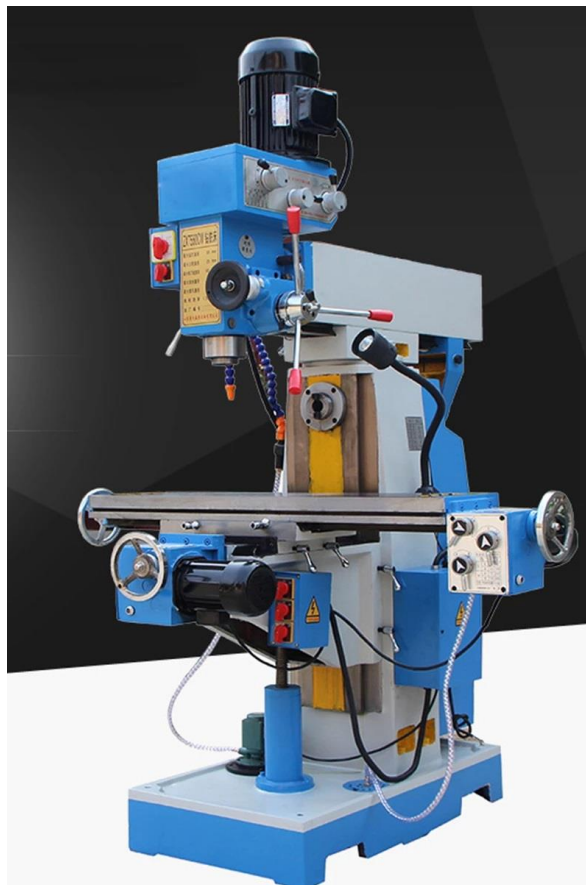
Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Sveučilišta Sjever. Postupkom točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom zavareno je pet uzoraka koji su potom izrezani na mjestu zavara, brušeni i naposljetku promatrani na mikroskopu. Zapažanja će biti navedena u sljedećim poglavljima.

5.2. Naprave, alati i materijali korišteni u eksperimentu

U ovom poglavlju će biti nabrojane naprave, alati, strojevi i materijali koji su korišteni tokom eksperimenta.

5.2.1. Troosna bušilica i glodalica

Za potrebe zavarivanja korištena je troosna glodalica tipa XZX7550CW (Slika 5.1). U Tablica 5.1 su navedene karakteristike glodalice.



Slika 5.1 Glodalica i bušilica tipa XZX7550CW [31]

Tablica 5.1 Osnovne karakteristike stroja

Model	XZX7550CW
Maksimalni promjer bušenja	50 mm
Maksimalna širina glodanja	100 mm
Maksimalna visina glodanja	25 mm
Maksimalna veličina navoja	M16
Udaljenost vretena od stola	70 – 420 mm
Brzina vrtnje vretena	115 – 1750 okr/min
Veličina stola	1000 x 240 mm
Veličina stroja	1290 x 1220 x 2100 mm
Snaga motora	2,2 kW

5.2.2. Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka

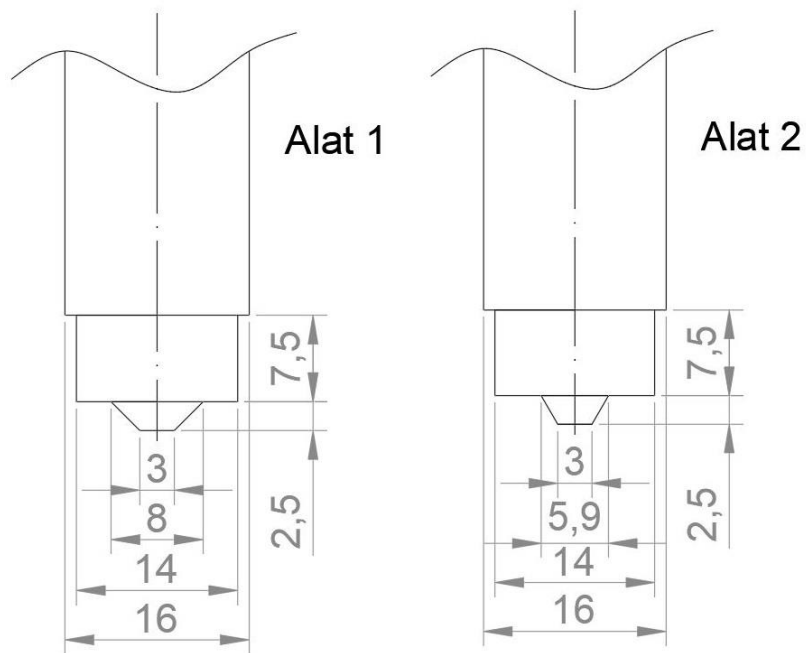
Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka koji se koristi za brušenje grube površine koja je dobivena nakon rezanja uzoraka.



Slika 5.2 Uređaj za poliranje uzoraka

5.2.3. Alat za točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Za točkasto zavarivanje trenjem u ovom eksperimentu korišten je metalni alat valjkastog oblika izrađen iz alatnog čelika OCR.



Slika 5.3 Dimenzije alata korištenih u eksperimentu (Dimenzije u mm)

Slika 5.3 prikazuje stvarne dimenzije alata koji su se koristili u eksperimentu.



Slika 5.4 Izgled i oblik alata korištenog u eksperimentu (1 lijevo, 2 desno)

Za eksperiment su korišteni alati sa Slika 5.4. U poglavlju 4.6 navedeni su neki alati koji se mogu koristiti. Specifičnosti ovih alata su glatki i konusni trn. Razlika između dva alata je kut konusa, a utjecaj toga će biti vidljiv u sljedećim poglavljima.

OCR alatni čelik

Alati su napravljeni od OCR alatnog čelika. OCR je naziv za niskolegirane Cr-čelike. Ovi čelici sadrže 1...1,5 %C i 0,5...1,5 %Cr, a služe za izradu alata i dijelova kotrljajućih ležaja. Tipične vrste čelika za alate su: 100Cr6 (Č4145), 115CrV3 (Č4141) i 140Cr3 (Č4143). Za kuglice, valjčice i prstenove kotrljajućih ležaja primjenjuju se sljedeće vrste: 105Cr4 (Č4142), 100Cr6 (Č4146) i 100CrMn6 (Č4340). Navedeni čelici su otporni na trošenje i visoke specifične pritiske (i do 5000 MPa), što ukazuje na njihovu primjenu. Sve navedene vrste su nadeutektoidnog sastava pa nakon kaljenja postižu mikrostrukturu: martenzit (M) + (Fe,Cr)₃C + A₂. Zaostali se austenit (A₂) niskim popuštanjem transformira u karbid popuštanja samo djelomično, pa je prije popuštanja uobičajeno duboko hlađenje (pri -196 °C) za eliminaciju ove nepoželjne faze u radu tlačno opterećenih alata ili ležaja. Naime, zaostali austenit u slučaju visokih specifičnih pritisaka može doživjeti deformacijsku pretvorbu u martenzit. Upotreba im je najčešće za razne vrste svrdla, pile, rezne alate i alate za navoje, turpije, glodala i sl. [1]

5.2.4. BTC stereomikroskop

BTC stereomikroskop je korišten za promatranje uzoraka. Na njega je pričvršćena digitalna kamera.



Slika 5.5 BTC stereomikroskop [32]

5.2.5. Digitalna kamera Canon EOS 2000D

Digitalna kamera Canon EOS 2000D korištena je za slikanje uzoraka pod povećanjem na mikroskopu.

Ključne značajke:

24,1 megapiksela : Senzor APS-C formata

Scene Intelligent Auto : Jednostavno usmjeravanje i snimanje

Optičko tražilo : Uz automatsko izoštravanje u 9 točaka

EOS videozapisi : Filmski 1080p

LCD zaslon : 3 inča (7,5 cm)

Povezivanje : Wi-Fi/NFC

Dimenzije (ŠxVxD) : 129 x 101,3 x 77,6 mm

Baterije : 1 x punjiva litij-ionska baterija LP-E10

Trajanje baterije : Pribl. 500 (pri 23°C, automatska ekspozicija 50 %, ekspozicija bljeskalice 50 %) [33]

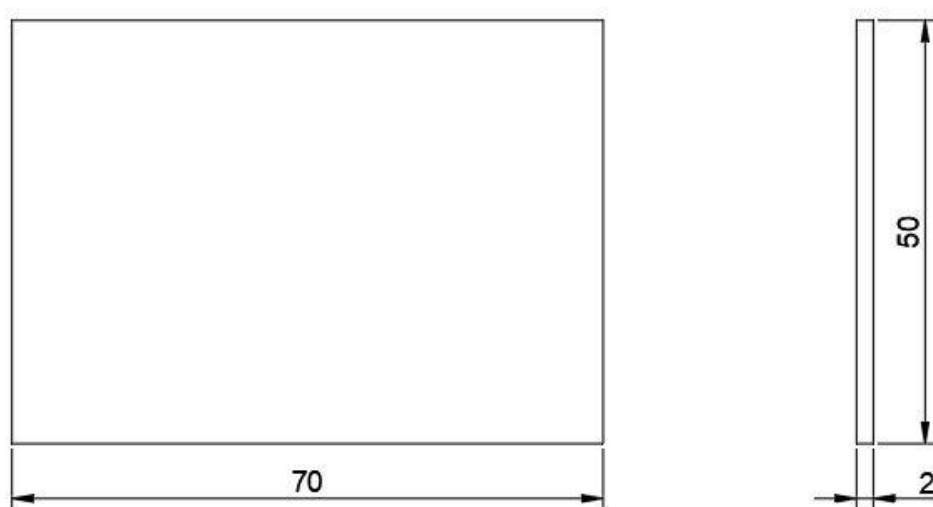


Slika 5.6 EOS 2000D [33]

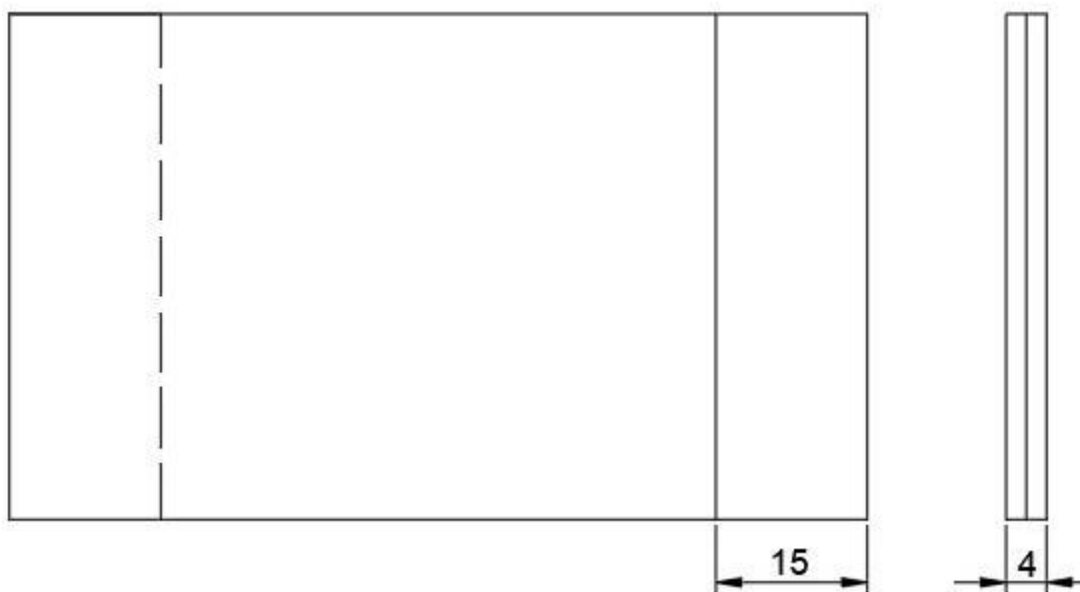
5.3. Opis postupaka

5.3.1. Priprema uzorka za zavarivanje

Uzorak koji se zavarivao sastojao se od dvije pločice izrađene od aluminijske legure EN AW 6060 (Navedeno u poglavlju 2.2). Pločice su bile postavljene u preklopni spoj. Kako bi se osiguralo da pločice budu u identičnom preklopu, svaka od njih je označena na mjestu gdje treba doći preklop. Prije preklapanja pločice su brušene na mjestu dodira brusnim papirom gradacije P320 kako bi se uklonio sloj oksida i osigurao čisti preklop. Dimenzije pločica su 50 x 70 mm, a debljina pločice je 2 mm, što znači da je ukupna debljina spoja dviju pločica 4 mm.



Slika 5.7 Dimenzija pločice korištene u uzorku



Slika 5.8 Izgled preklopnog spoja pločica

5.3.2. Stezanje uzorka na glodalicu

Kako bi se osiguralo da se pločice u preklopnom spoju ne pomaknu tijekom procesa zavarivanja, one su pričvršćene pomoću škripca na glodalicu. Svaki uzorak je stavljen na isto mjesto u škripcu kako bi se osigurala ponovljivost prilikom zavarivanja. S obzirom da je potrebna tvrda podloga na koje se stavljaju uzorci, koristila se čelična podloga koja je osigurala dovoljnu čvrstoću i krutost.



Slika 5.9 Uzorak stegnut u škripcu na glodalici

5.3.3. Proces zavarivanja

Prije početka zavarivanja potrebno je stegnuti alat u vreteno. S obzirom da se koriste dva alata, postupak zavarivanja za svaki uzorak i svako stanje se ponavljao dva puta s različitim alatima. Odlučeno je kako će se postupak zavarivanja provoditi na 5 uzoraka. Na svakom uzorku se mijenja brzina rotacije alata, te se mjeri duljina zavarivanja.

Opis postupka zavarivanja:

1. Spuštanje vrha vretena do uzorka.

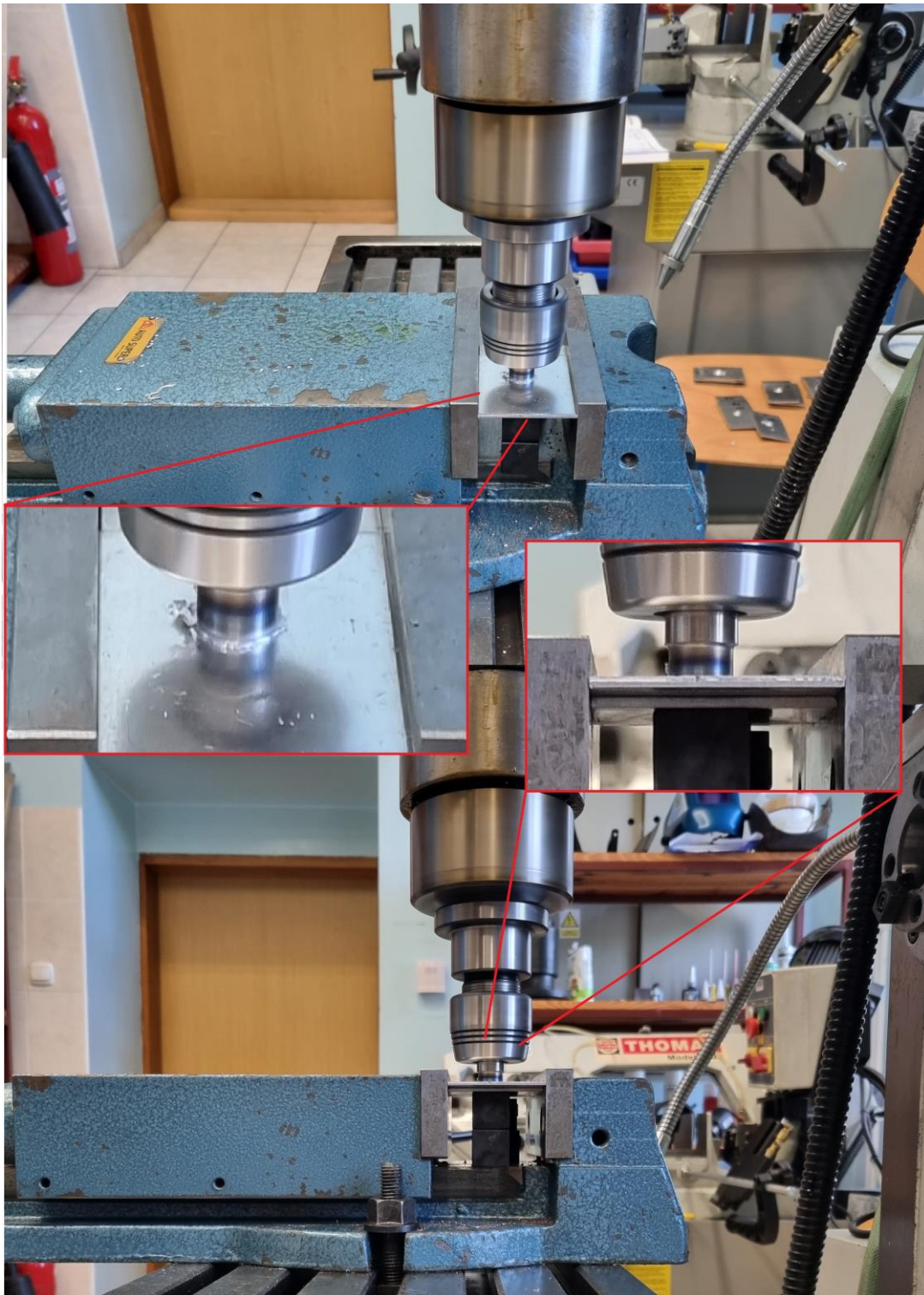
Tijekom ovog koraka alat se spušta do uzorka te se zadržava na vrhu uzorka. Tijekom zadržavanja koje traje nekoliko desetaka sekundi trenje između vrha trna i uzorka proizvodi toplinu u uzorku koja materijal dovodi u plastično stanje. To omogućuje utiskivanje alata u uzorak.



Slika 5.10 Dodir vretena s površinom uzorka

2. Utiskivanje alata u uzorak

Tijekom ovog koraka materijal je dovoljno omekšan da se alat utiskuje u njega. S obzirom da su pločice u preklopu debljine svaka 2 mm, trn alata je visine 2,5 mm, stoga prvo ulazi u gornju pločicu u spoju, a zatim u donju. Proces utiskivanja traje nekoliko desetaka sekundi, a kada je cijeli trn u uzorku još se zadržava jedno vrijeme kako bi promiješao materijal i kako bi se osigurao homogeni spoj.



Slika 5.11 Alat utisnut u uzorak

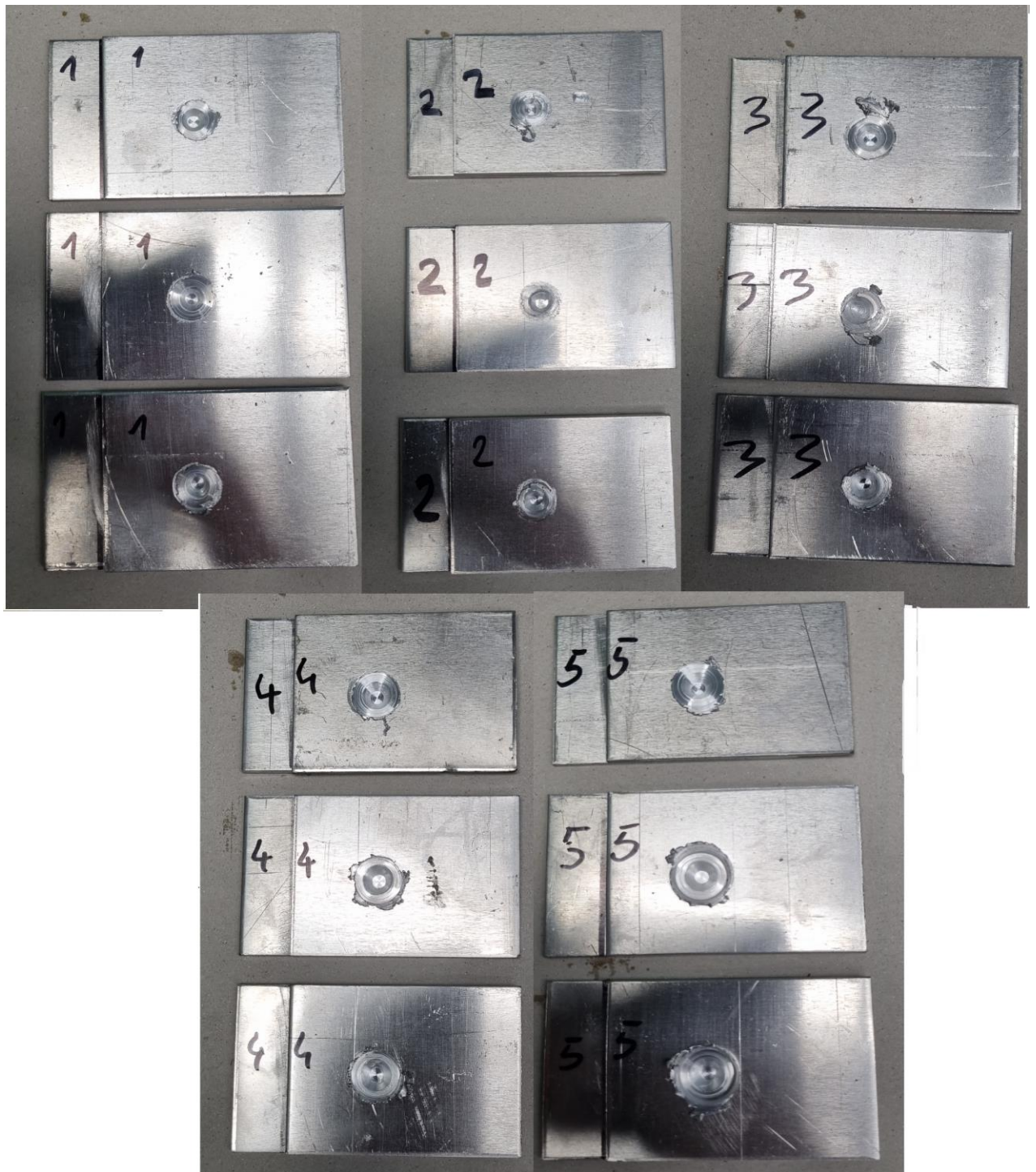
3. Izvlačenje alata iz uzorka

U ovom koraku je zavarivanje završeno, te se alat izvlači iz uzorka.



Slika 5.12 Izvlačenje alata iz uzorka

Na kraju zavarivanja uzorci su označeni brojevima kako bi se kasnije moglo njima lakše manipulirati. Za svako stanje su napravljena tri uzorka.



Slika 5.13 Označeni uzorci nakon zavarivanja

5.3.4. Priprema uzoraka za promatranje mikroskopom

Nakon zavarivanja uzorci su na mjestu zavara prerezani tračnom pilom kako bi se omogućio pogled na poprečni presjek zavara. Na mjestu rezanja ostala je vrlo gruba površina koju nije moguće promatrati mikroskopom. Kako bi se površina dovela do metalnog sjaja, vršeno je brušenje i nagrizanje uzorka.

1. Brušenje poprečnog presjeka uzorka

Brušenje se vršilo na uređaju za brušenje i poliranje (Slika 5.2). Korišteni su brusni papiri gradacije P180, P240, P320, P600 i P800.



Slika 5.14 Izgled površine poprečnog presjeka uzorka prije i nakon brušenja

2. Nagrizanje uzoraka

Nakon brušenja se površina poprečnog presjeka još nagriza 19 % otopinom HCL (solna kiselina). To se radi kako bi se uklonile nečistoće i oksidni sloj koji se stvara na površini aluminijskog i koji ne bi dao jasni pogled na izgled zavarivanja.

5.3.5. Promatranje mikroskopom

Nakon što je zavarivanje provedeno i uzorak pripremljen kao što je opisano u prijašnjim poglavljima, potrebno je uzorak promatrati na mikroskopu. Svaki od pet uzoraka se stavlja na mikroskop na način da se uzorak postavlja u okomiti položaj kako bi se promatrao poprečni presjek.

5.4. Zapažanja

5.4.1. Zapažanja prilikom zavarivanja

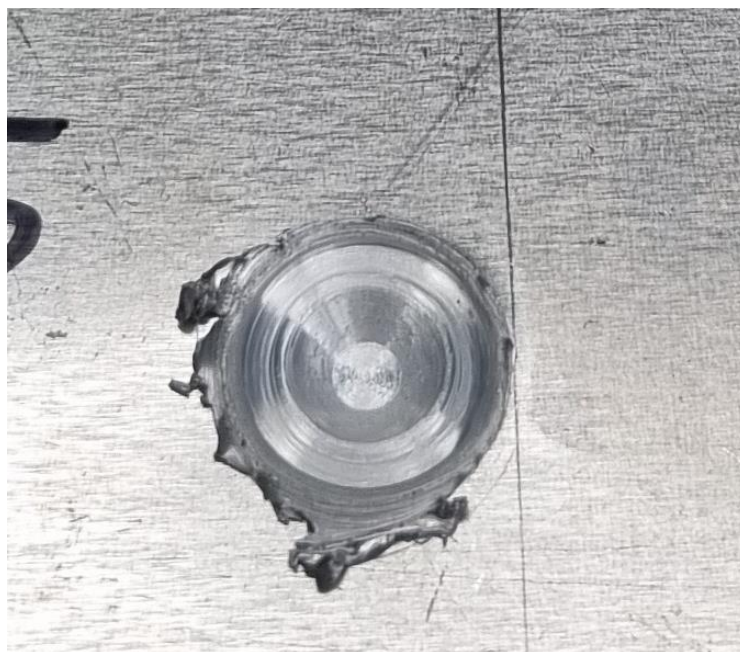
Prilikom zavarivanja postižu se visoke temperature zbog topline koja se oslobađa prilikom trenja. Toplina je potrebna kako bi se omekšao materijal koji se zavaruje. S obzirom da su obradak i alat u kontaktu, velika količina topline se oslobađa i u sam alat. Iz tog razloga alat treba imati mnogo veću temperaturu taljenja od obratka kako se alat ne bi deformirao prilikom zagrijavanja u radu. Zbog oslobođene topline u alat na površini alata se nakon obrade vidi obojanost (Slika 5.15). Do toga je došlo zbog oksidacije na površini alata.



Slika 5.15 Utjecaj zavarivanja na alat (lijevo- prije, desno- nakon)

Osim pojave obojanosti, na alatu se još vidi i nalijepljeni materijal.

Na uzorcima se mogu vidjeti pojave na i oko zavara. Zavar poprima oblik alata. Stoga su zavari izvedeni prvim alatom imali blaži kut nagiba stijenke zavara, a zavari izvedeni drugim alatom veći kut nagiba stijenke zavara. Površina zavara više nema sjajni izgled kao prije zavara. Vide se tragovi rotacije čela alata. Oko zavara, oko zone gdje su alat i materijal bili u dodiru može se vidjeti višak materijala koji je istisnut iz zavara.



Slika 5.16 Izgled zavara

5.5. Stanja eksperimenta

Kao što je već navedeno u prijašnjim poglavljima, provedeno je pet stanja zavarivanja. Mijenjali su se alat i brzina rotacije. Tablica 5.2 prikazuje uvjete i rezultate dobivene zavarivanjem. Vidi se kako je sa svakim alatom provedeno zavarivanje brzinama rotacije 1750 i 875 okr/min, te je dodatno alatom 1 provedeno zavarivanje brzinom vrtnje 580 okr/min. Osim brzine vrtnje, mijenjalo se i vremensko trajanje zavarivanja. Zbog kraćeg vremenskog trajanja zavarivanja alatom 1 i zbog veće dodirne površine (zbog manjeg kuta nagiba trna), bile su potrebne veće sile za utiskivanje alata 1 u materijal. Iz tog razloga se u alat 1 oslobađalo više topline, pa se na alatu 1 može vidjeti i jače obojenje (Slika 5.17).

Tablica 5.2 Rezultati zavarivanja

	Brzina rotacije alata (okr/min)	Broj alata (geometrija)	Vrijeme zavarivanja (s)
1	1750	2	60
2	875	2	60
3	580	1	60
4	875	1	40
5	1750	1	35



Slika 5.17 Izgled alata nakon zavarivanja

5.6. Analiza i rezultati

Nakon pripreme uzoraka za promatranje na mikroskopu kao što je navedeno u prijašnjim poglavljima, uzorci su stavljeni na mikroskop te su poslikani digitalnom kamerom. Povećanje mikroskopa je iznosilo 12x.

Izračun površine kružnog vijenca zavara

Oblik zavara u tlocrtu je kružni vijenac. Stoga je za svako stanje izračunata površina zavara. Površina se računa na način da se površina manjeg unutarnjeg kruga oduzima od površine većeg vanjskog kruga.

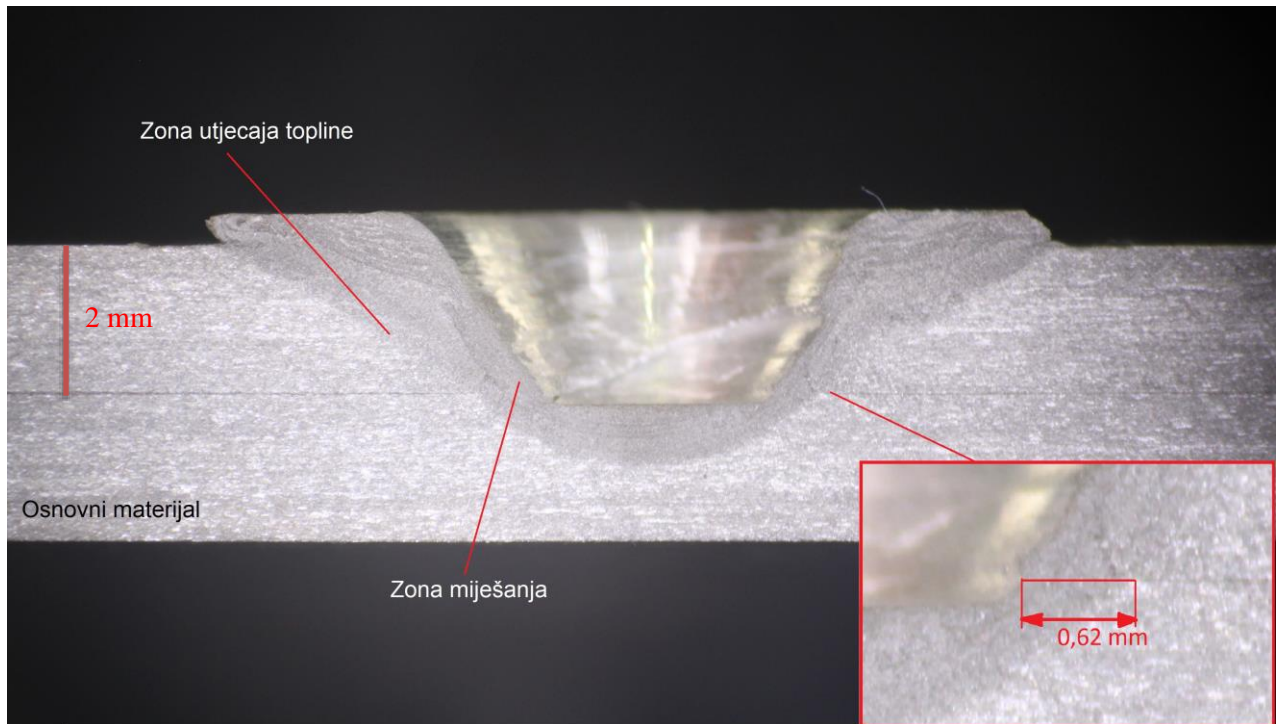


Slika 5.18 Shema izgleda zavara u tlocrtu

Stanje 1

Na zavaru prikazanom na Slika 5.19 se vidi kako je zavar homogen i pločice su dobro povezane. Širina poprečnog presjeka zavara na najtanjem dijelu (mjestu spoja) je 0,62 mm. Površina kružnog vijenca zavara iznosi $7,05 \text{ mm}^2$. Na zavaru nema vidljivih pukotina. Ne vidi se

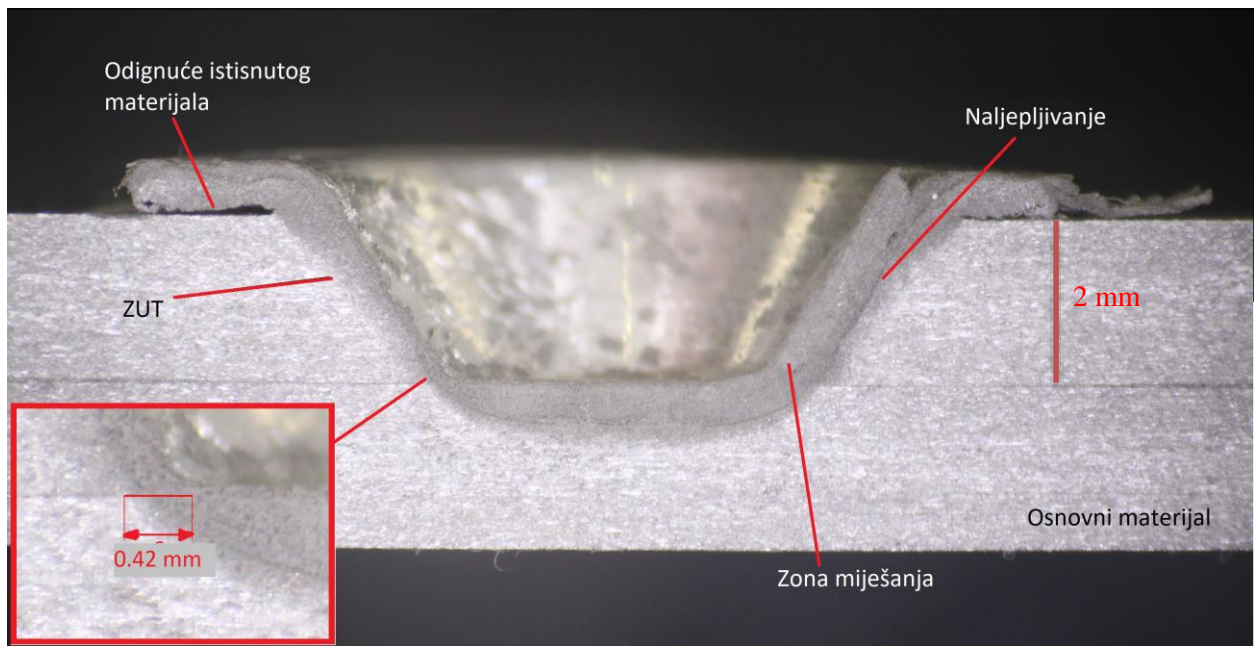
ni da je došlo do naljepljivanja. Istisnuti materijal iz zavara nije visoko odignut od pločice (0,41 mm), te je povezan s zavarom.



Slika 5.19 Zavar u prvom stanju

Stanje 2

Na zavaru prikazanom na Slika 5.20 se vidi kako je zavar s jedne strane deblji nego s druge. Širina poprečnog presjeka zavara na najtanjem dijelu (mjestu spoja) je 0,42 mm. Površina kružnog vijenca zavara iznosi 4,51 mm². Na zavaru nema vidljivih pukotina. Vidi se kako je s desne strane zavara gotovo cijelom dužinom došlo do naljepljivanja. Istisnuti materijal iz zavara je odvojen od pločice što znači da je bila premala sila utiskivanja. Nedovoljnu silu utiskivanja potvrđuje i to što je dno zavara na istoj visini kao i preklop pločica.



Slika 5.20 Zavar u drugom stanju

Stanje 3

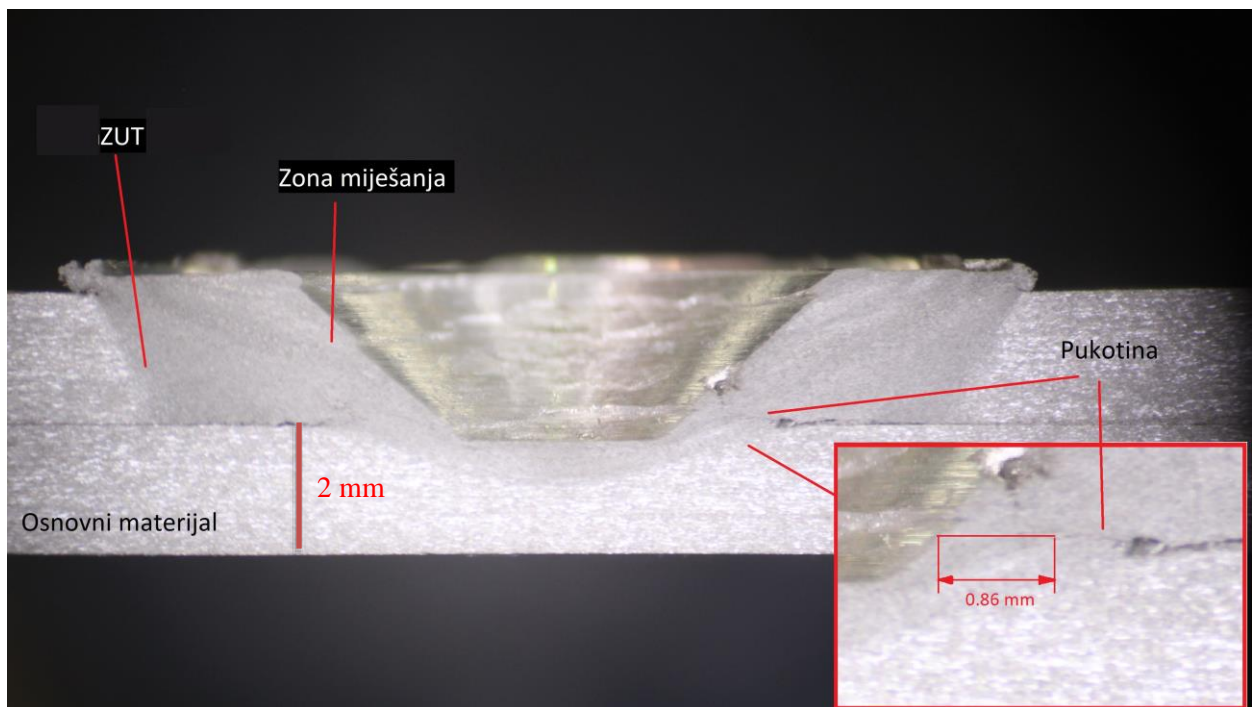
Na zavaru nema vidljivih pukotina. Vidi se kako je cijelom dužinom zavora došlo do naljepljivanja, a nema homogenog spoja. Širina poprečnog presjeka zavora na najtanjem dijelu (mjestu spoja) je 0,48 mm do naljepljenog dijela. Površina kružnog vijenca zavora iznosi 5,25 mm². Istisnuti materijal iz zavora je odvojen od pločice što znači da je bila premala sila utiskivanja. Nedovoljnu silu utiskivanja potvrđuje i to što je dno zavora na istoj visini kao i preklap pločica, kao i u drugom stanju.



Slika 5.21 Zavar u trećem stanju

Stanje 4

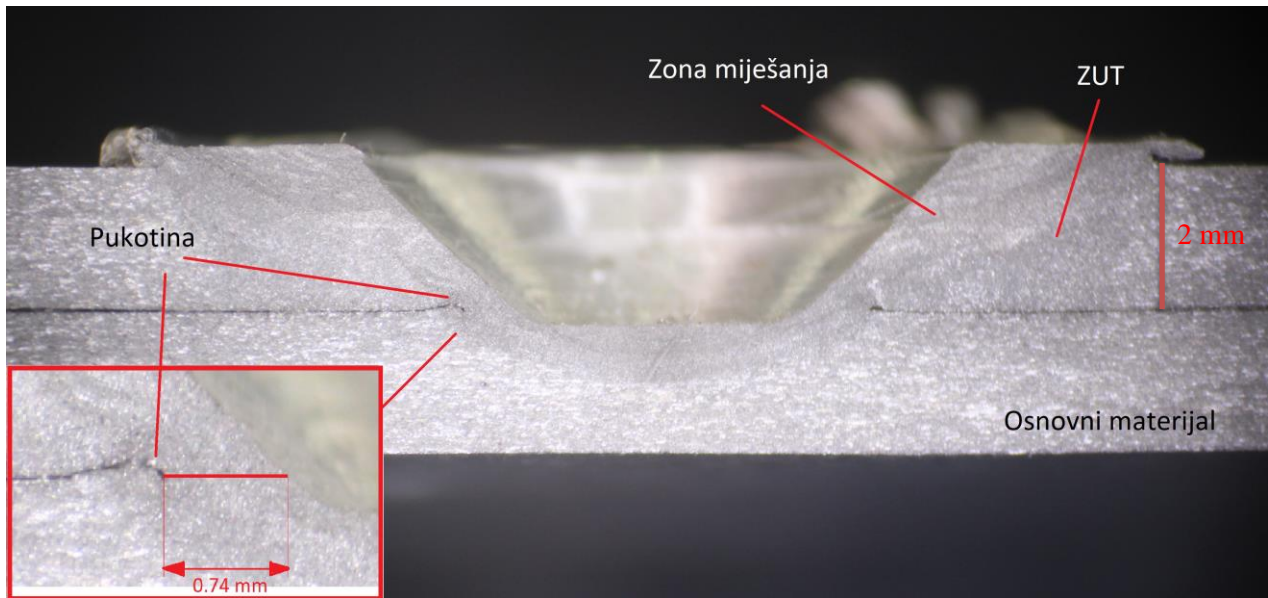
Na zavaru prikazanom na Slika 5.22 se vidi kako je zavar homogen, a razlika od prijašnjih zavara je puno veća zona miješanja i ZUT-a na gornjoj pločici. Širina poprečnog presjeka zavara na najtanjem dijelu (mjestu spoja) je 0,86 mm. Površina kružnog vijenca zavara iznosi 10,43 mm². Debljina zavara je mjerena od mjesta pukotine. Unatoč pukotini ovaj zavar je veće debljine od prijašnjih. Na zavaru se vidi pukotina s desne strane na mjestu preklopa pločica. Do puknuća je vjerojatno došlo zbog velike sile utiskivanja i brzo unesene energije u kratkom vremenu. Nema naljepljivanja. Istisnuti materijal iz zavara je spojen u zavar.



Slika 5.22 Zavar u četvrtom stanju

Stanje 5

Na zavaru prikazanom na Slika 5.23 se može vidjeti kako je zavar homogen, te ima veliku zonu zavara kao u stanju četiri. Širina poprečnog presjeka zavara na najtanjem dijelu (mjestu spoja) je 0,74 mm. Površina kružnog vijenca zavara iznosi 8,69 mm². Debljina zavara je mjerena od mjesta pukotine. Pukotina je šira nego u četvrtom stanju. Na zavaru se vidi pukotina s lijeve strane na mjestu preklopa pločica. Do puknuća je vjerojatno došlo zbog velike sile utiskivanja i brzo unesene energije u kratkom vremenu. Nema naljepljivanja. Istisnuti materijal iz zavara je spojen u zavar.



Slika 5.23 Zavar u petom stanju

6. Analiza rezultata

Tablica 6.1 Rezultati eksperimenta

Stanje	1	2	3	4	5
Brzina rotacije alata, okr/min	1750	875	580	875	1750
Broj alata (geometrija)	2	2	1	1	1
Vrijeme zavarivanja, s	60	60	60	40	35
Širina poprečnog presjeka zavara na najtanjem mjestu, mm	0,62	0,42	0,48	0,86	0,74
Pukotina	Ne	Ne	Ne	Da	Da
Naljepljivanje	Ne	Djelomično	Potpuno	Ne	Ne
Odignuti istisnuti materijal	Ne	Da	Da	Ne	Ne

Tablica 6.1 prikazuje rezultate eksperimenta.

Iz rezultata eksperimenta mogu se usporediti sva stanja zavarivanja. Najveće razlike mogu se zamijetiti između različitih alata. Prilikom zavarivanja alatom 2, proces je trajao duže. Alat 2 ima manje primjetnih obojenja što znači da se u alat 2 oslobađalo manje topline. Veća brzina utiskivanja alata u obradak znači i veću silu utiskivanja. Osim veće sile utiskivanja kod zavarivanja alatom 1, primjetan je i utjecaj geometrije alata 1 na zavarivanje. Zbog manjeg kuta nagiba trna na alatu 1 postoji veća kontaktna površina između alata i obratka. U stanjima 4 i 5 vidljiva je veća zona miješanja, što znači da je veća količina materijala miješana i samim time veće je područje materijala koje je ušlo u zavar. Tomu je razlog veća kontaktna zona gdje dolazi do trenja.

Veće debljine zavara primijećene su u stanjima 1, 4 i 5. U ova 3 stanja korištene su veće brzine rotacije alata. Ovdje se boljim pokazao alat 1 jer je on u svakom stanju, osim u 3. stanju gdje je brzina rotacije bila najmanja, imao najveće debljine zavara. Nedostatak zavara u stanjima 4 i 5, gdje je zavarivano alatom 1, su pukotine. Do pukotina je vjerojatno došlo zbog velikih brzina rotacije i velike primijenjene sile utiskivanja, pa zavar nije stigao otvrdnuti već je napuknuo.

U stanjima 2 i 3 vidljivo je naljepljivanje. U ovim stanjima korištene su male brzine rotacije, pogotovo u stanju 3, pa nije došlo do dovoljnog miješanja materijala. Osim toga, u tim stanjima primijećeno je i odignuće istisnutog materijala od obratka. Do toga je došlo i zbog premale sile utiskivanja koja je također razlog zbog kojeg je došlo do naljepljivanja.

Alat 1 se pokazao boljim od alata 2 po svojstvima zavara. Također, veće brzine rotacije alata su se pokazale boljima. Nedostaci kod zavarivanja alatom s blažim kutom nagiba i velikih brzina rotacije su pukotine koje su se pojavile. Unatoč pukotinama stanja s alatom 1 i većim brzinama zavarivanja su se pokazali boljima zbog većih debljina zavara.

7. Zaključak

Kako je današnja industrija napredovala, javili su se mnogi novi postupci koji se koriste u proizvodnji. Konvencionalnim postupcima zavarivanja se obično smatraju postupci zavarivanja taljenjem. Kod tih postupaka se energija unosi samo topline, te se obrađivani materijal tali, a spoj nastaje miješanjem materijala, s mogućnošću unošenja dodatnog materijala, kada se nalazi u tekućoj fazi. Iako se postupci zavarivanja taljenjem nazivaju konvencionalnima u toj grani zavarivanja se, također, svakodnevno razvijaju novi napredni postupci koji donose nova poboljšanja.

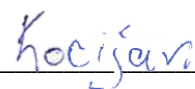
Novijim postupcima zavarivanja se nazivaju postupci zavarivanja pritiskom. Kod tih postupaka se koristi kombinacija toplinske i mehaničke ili samo mehanička energija kako bi se materijal doveo u stanje pogodno za dobivanje spoja. Pod postupke zavarivanja pritiskom spada grupa postupaka zavarivanja trenjem. Kod tih postupaka nema dodatnog unosa topline, već je sva toplina proizvedena trenjem. Jedan od tih postupaka je zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom je noviji postupak zavarivanja, koji za razliku od konvencionalnih postupaka zavarivanja ne koristi nikakve dodatne unose topline, nikakav dodatni unos materijala, već se sva energija unosi trenjem koje proizvodi alat, a spoj nastaje miješanjem materijala koji se obrađuje. Prva upotreba postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom je bila devedesetih godina dvadesetog stoljeća. Do danas se taj postupak razvio na mnogo načina, te se koristi u mnogim industrijskim granama. Vrste postupaka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom mogu se podijeliti u dvije veće skupine, linearno zavarivanje trenjem rotirajućim alatom i točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. Glavna razlika ovih dvaju postupaka je u tome što kod linearnog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom ima pomaka alata, a kod točkastog alat rotira na mjestu ili je pomak minimalan, odnosno ima samo odmak od središnje osi rotacije alata, no alat se i dalje pomiče samo kružno oko središnje osi. Glavni postupci točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom su konvencionalni postupak, *Refill*, *Stitch*, *Swept* i *Swing* postupak. Kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom postoji nekoliko glavnih parametara: brzina rotacije alata, sila utiskivanja alata, vrijeme zavarivanja i geometrija alata. Alat ima veliku ulogu na uspješnost zavarivanja, stoga je potrebno odabrati prikladan alat u kombinaciji s optimalnim parametrima. Kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom, alat ulazi u materijal koji se obrađuje, stoga je potrebno da alat bude tvrdi i čvršći od obrađivanog materijala. Iz tog razloga se ovaj postupak najčešće primjenjuje na mekšim materijalima kao što su aluminij, bakar, magnezij, a rjeđe čelik i titan. Velika prednost ovog postupka je u tome što se njime mogu spajati raznorodni materijali. To je moguće jer se materijali spajaju termomehanički, što znači da se materijali ne tale, pa nema kemijskih promjena u materijalima, nego se oni samo miješaju. Kod konvencionalnih

postupaka to nije slučaj, odnosno različiti materijali se spajaju puno rjeđe i teže. Osim mogućnosti spajanja ostale prednosti zavarivanja trenjem rotirajućim alatom su: manje pogrešaka pri zavarivanju, manje deformacije materijala, ekološki prihvatljiv, mogućnost automatizacije. Dobra mehanička svojstva itd. Nedostaci su: izlazna šupljina, potreban je značajni pritisak i ispravan razmak između zavarivanih dijelova.

U eksperimentalnom dijelu su proučavani utjecaji parametara na točkasto zavarivanje trenjem rotirajućim alatom. Analizom rezultata uočeno je kako je na izgled zavara veliki utjecaj imao oblik alata, ali i vrijeme zavarivanja koje je povezano sa silom utiskivanja. Kod nekih uzoraka su uočene greške koje bi se mogle izbjeći promjenom nekih parametara. Parametri su imali utjecaj ne samo na zavarivane dijelove, već i na sam alat stoga i to treba uzeti u obzir pri odabiru parametara.

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom već je našlo svoje mjesto u komercijalnoj upotrebi. Razvijanje novijih i boljih postupaka moglo bi zamijeniti neke postupke koji se trenutno koriste. Ovaj postupak će se u budućnosti zasigurno koristiti u još većoj mjeri, te će postati nezamjenjiv postupak među proizvodnim tehnologijama.

U Varaždinu, 7.9.2022.



Filip Kocijan

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] Nedal Aluminium BV, „Alloy Data Sheet EN-AW 6060 [AlMgSi]“. <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2017/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6060.pdf> (pristupljeno lip. 08, 2022).
- [3] M. Gojić, *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, 1. izd. Sisak: Metalurški fakultet, 2003.
- [4] S. Kralj, Z. Kožuh, i Š. Andrić, *Zavarivački i srodni postupci : priručnik*, 1. izd. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [5] A. Ambroziak, M. Korzeniowski, P. Kustron, M. Winnicki, P. Sokobowski, i E. Harapinska, „Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloys with Steel“, 2014, doi: 10.1155/2014/981653.
- [6] „What is Friction Welding - Definition, Working, Types, Advantages and Disadvantages. - Mechanical Booster“. <https://www.mechanicalbooster.com/2021/11/friction-welding.html> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [7] „Linear Friction Welding“. <https://www.mtiwelding.com/technologies/linear-friction-welding/> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [8] „Linear Friction Welding - Job Knowledge - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [9] „Rotary Friction Welding - Job Knowledge - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/rotary-friction-welding-148> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [10] „Illustration of the stages of the direct drive rotary friction welding... | Download Scientific Diagram“. https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-stages-of-the-direct-drive-rotary-friction-welding-process_fig9_221919106 (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [11] „Friction Stir Welding, FSW, Wayne Thomas and Solid State Welding - TWI“. <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [12] „Friction Stir Welding - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147> (pristupljeno lip. 28, 2022).
- [13] J. Kundu i H. Singh, „Friction stir welding of AA5083 aluminium alloy: Multi-response optimization using Taguchi-based grey relational analysis“, *Adv. Mech. Eng.*, sv. 8, izd. 11, str. 1–10, stu. 2016, doi: 10.1177/1687814016679277.
- [14] „ISO 25239-1:2020(en), Friction stir welding — Aluminium — Part 1: Vocabulary“.

- <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:25239:-1:ed-2:v1:en> (pristupljeno lip. 28, 2022).
- [15] „Refill Friction Stir Spot Welding - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/refill-friction-stir-spot-welding-150> (pristupljeno lip. 28, 2022).
- [16] „ISO 18785-1:2018(en), Friction stir spot welding — Aluminium — Part 1: Vocabulary“. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18785:-1:ed-1:v1:en> (pristupljeno kol. 22, 2022).
- [17] „Schematic of stitch FSSW. | Download Scientific Diagram“. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-stitch-FSSW_fig8_351061818 (pristupljeno lip. 28, 2022).
- [18] W. Yuan, „Friction stir spot welding of aluminum alloys“, Pristupljeno: lip. 28, 2022. [Na internetu]. Dostupno na: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theseshttps://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5429.
- [19] „Struct Fract & Fat Lab - Swept Friction Stir Spot Weling (Swept-FSSW)“. <https://sites.google.com/view/ccu-me-structural-fatigue-lab/research/swept-friction-stir-spot-weling-swept-fssw> (pristupljeno lip. 29, 2022).
- [20] FSW-TECH, „Friction Stir Welding Handbook“, *Erasmus+*, 2017. <https://www.fsw-tech.eu/documents/IO3 - TRAINING MATERIAL/FSW-Tech Handbook for Specialists and Engineers – EN.pdf> (pristupljeno lip. 29, 2022).
- [21] B. Carter, „Introduction to Friction Stir Welding (FSW)“, *NASA Glenn Research Center*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150009520/downloads/20150009520.pdf> (pristupljeno lip. 30, 2022).
- [22] M. Bušić, „Suvremene proizvodne tehnologije, 1. Predavanje - Zavarivanje trenjem“. Sveučilište sjever, str. 70, 2019.
- [23] „Temperature and Stress Evaluation during Three Different Phases of Friction Stir Welding of AA 7075-T651 Alloy“. <https://www.hindawi.com/journals/mse/2020/3197813/> (pristupljeno lip. 30, 2022).
- [24] „What is Friction Stir Welding (FSW)? - Process and Applications - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-stir-welding> (pristupljeno lip. 23, 2022).
- [25] „Friction Stir Welding and Related Process Characteristics - TWI“. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-and-related-friction-process-characteristics-april-1998> (pristupljeno lip. 30, 2022).
- [26] „, Flared-Triflute™ Tool Options. A) Neutral Flutes, b) Left-Hand... | Download Scientific Diagram“. https://www.researchgate.net/figure/Flared-Triflute-Tool-Options-A-Neutral-Flutes-b-Left-Hand-Flutes-c-Right-Hand_fig3_265427115 (pristupljeno lip. 30, 2022).

- [27] „APCO Technologies QUALITY AND EXPERIENCE - PDF Free Download“.
<https://docplayer.net/101013256-Apco-technologies-quality-and-experience.html>
(pristupljeno kol. 22, 2022).
- [28] „Vibration Test System - Vibration Test Table | Brüel & Kjær“.
<https://www.bksv.com/en/instruments/vibration-testing-equipment/lds-shakers/shaker-equipment/combo-systems-with-lpt-slip-tables> (pristupljeno kol. 22, 2022).
- [29] „London Underground 2009 Stock - Wikipedia“.
https://en.wikipedia.org/wiki/London_Underground_2009_Stock (pristupljeno kol. 22, 2022).
- [30] „Friction Stir Spot Welding | 2016-04-07 | Assembly Magazine | ASSEMBLY“.
<https://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding> (pristupljeno kol. 22, 2022).
- [31] „ZX7550CW Drilling And Mill Machine With 3 Axis DRO - AliExpress Tools“.
<https://www.aliexpress.com/i/32761528798.html> (pristupljeno srp. 05, 2022).
- [32] „BTC STM-9T Professional Trinocular Stereo Microscope ZOOM“.
<https://www.365astronomy.com/BTC-STM-9T-Professional-Trinocular-Stereo-Microscope-ZOOM> (pristupljeno srp. 05, 2022).
- [33] „Digitalni fotoaparat CANON EOS 2000D - 300.000.009 - Links“.
<https://www.links.hr/hr/digitalni-fotoaparat-canon-eos-2000d-ef-s-18-55mm-is-ii-torba-sb130-16gb-mem-kartica-300000009> (pristupljeno srp. 05, 2022).

Popis slika

Slika 3.1 Shema termodinamičke pretvorbe energije i materijala pri zavarivanju [4]	6
Slika 3.2 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [4]	7
Slika 3.3 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [4]	8
Slika 4.1 Shematski prikaz procesa linearnog zavarivanja trenjem [8]	10
Slika 4.2 Shematski prikaz rotacijskog zavarivanja trenjem [10]	11
Slika 4.3 FSW proces zavarivanja [12]	13
Slika 4.4 Tijek FSW zavarivanja prema normi ISO 25239-1:2020 [14]	14
Slika 4.5 Općeniti dijagram FSW zavarivanja [14]	15
Slika 4.6 A) Shematski prikaz konvencionalnog FSSW postupka zavarivanja; B) Poprečni presjek zavara dobiven FSSW postupkom [15]	16
Slika 4.7 Shematski prikaz šavnog FSSW zavarivanja [17]	17
Slika 4.8 Shematski prikaz FSSW zavarivanja s nagibom alata [18]	18
Slika 4.9 A) Refill FSSW oprema na TWI Cambridge-u; B) Površina Refill FSSW zavara [15]	18
Slika 4.10 Refill FSSW proces s utiskujućim čelom [15]	19
Slika 4.11 Refill FSSW proces s utiskujućom sondom [15]	19
Slika 4.12 Shema Swept FSSW postupka zavarivanja [19]	20
Slika 4.13 Izgled Swept FSSW zavara s označenim zonama [19]	20
Slika 4.14 Zone i detalji u Swept FSSW zavaru [19]	21
Slika 4.15 Konvencionalni FSW alat i osnovni parametri [20]	22
Slika 4.16 Shematski prikaz miješanja materijala alatom [21]	25
Slika 4.17 Utjecaj oblika trna na miješanje [22]	25
Slika 4.18 Prikaz različitih presjeka trna alata [22]	26
Slika 4.19 Prikaz zona zagrijavanja kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom [23]	26
Slika 4.20 Shematski prikaz alata i oblika trna alata [20]	27
Slika 4.21 Whorl™, Prikaz različitih izvedbi poprečnih presjeka trna alata: a) konusni b) lopatica c) trokutasti d) propulzni e) promjenjivog kuta [25]	28
Slika 4.22 Flared-Triflute™, Prikaz različitih izvedbi navoja na trnu alata:	29
Slika 4.23 Autoklav tvrtke APCO Technologies SA [27]	30
Slika 4.24 Vibracijski stol tvrtke LDS s magnezijevom pločom zavarenom FSW postupkom [28]	31
Slika 4.25 Vozilo tvrtke Bombardier iz Victoria Line-a [29]	32
Slika 4.26 Solarni kolektor zavaren FSW postupkom [20]	32
Slika 4.27 Robotsko FSSW zavarivanje u tvornici automobila [30]	33

Slika 5.1 Glodalica i bušilica tipa XZX7550CW [31].....	41
Slika 5.2 Uređaj za poliranje uzoraka.....	42
Slika 5.3 Dimenzije alata korištenih u eksperimentu (Dimenzije u mm).....	43
Slika 5.4 Izgled i oblik alata korištenog u eksperimentu (1 lijevo, 2 desno).....	43
Slika 5.5 BTC stereomikroskop [32].....	44
Slika 5.6 EOS 2000D [33].....	45
Slika 5.7 Dimenzija pločice korištene u uzorku	46
Slika 5.8 Izgled preklopnog spoja pločica.....	46
Slika 5.9 Uzorak stegnut u škripcu na glodalici	47
Slika 5.10 Dodir vretena s površinom uzorka	48
Slika 5.11 Alat utisnut u uzorak	50
Slika 5.12 Izvlačenje alata iz uzorka	51
Slika 5.13 Označeni uzorci nakon zavarivanja.....	52
Slika 5.14 Izgled površine poprečnog presjeka uzorka prije i nakon brušenja	53
Slika 5.15 Utjecaj zavarivanja na alat (lijevo- prije, desno- nakon).....	54
Slika 5.16 Izgled zavara.....	55
Slika 5.17 Izgled alata nakon zavarivanja	56
Slika 5.18 Shema izgleda zavara u tlocrtu.....	56
Slika 5.19 Zavar u prvom stanju.....	57
Slika 5.20 Zavar u drugom stanju.....	58
Slika 5.21 Zavar u trećem stanju	58
Slika 5.22 Zavar u četvrtom stanju	59
Slika 5.23 Zavar u petom stanju	60

Popis tablica

Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure [1]	2
Tablica 2.2 Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]	3
Tablica 2.3 Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [1]	4
Tablica 2.4 Kemijski sastav prema EN573-3 (ostatak Al) [2]	4
Tablica 2.5 Mehanička svojstva prema EN755-2 [2]	5
Tablica 2.6 Fizikalna svojstva (prosječno, 20°C) [2]	5
Tablica 4.1 Osnovni parametri FSW zavarivanja.....	22
Tablica 4.2 Debljine obradaka iz različitih materijala i materijal alata [20]	36
Tablica 5.1 Osnovne karakteristike stroja	42
Tablica 5.2 Rezultati zavarivanja	55
Tablica 6.1 Rezultati eksperimenta	61

Sveučilište Sjever

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, **Filip Kocijan** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

Filip Kocijan

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, **Filip Kocijan** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj alata na oblik zavarenog spoja pri točkastom zavarivanju trenjem rotirajućim alatom** čiji sam autor.

Student/ica:

Filip Kocijan