

Interpretacija zahtjeva HRN EN ISO 25239 norme za procjenu kvalitete spojeva načinjenih FSW postupkom

Krpeta, Lovre

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:356799>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lovre Krpeta

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Lovre Krpeta

Zagreb, 2022. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Ivici Garašiću na savjetima, komentarima i kritikama tijekom izrade ovog rada. Također bi se zahvalio asistentima i laborantima na velikoj pomoći i potpori. Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na potpori i podršci tijekom ovih godina.

U Zagrebu, 27. studenoga 2022.

Lovre Krpeta



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LOVRE KRPETA** Mat. br.: 0035211063

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Interpretacija zahtjeva HRN EN ISO 25239 norme za procjenu kvalitete spojeva načinjenih FSW postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Interpretation of HRN EN ISO 25239 standard requirements for quality assessment of welds made by FSW process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu detaljno opisati i analizirati postupke zavarivanja trenjem uz miješanje (FSW-friction stir welding). Navesti glavne parametre zavarivanja i specificirati materijale i geometrije radnog trna. Objasniti za koje kombinacije osnovnih materijala je postupak primjenjiv i koja su ograničenja kod zavarivanja aluminija. Dati pregled niza normi HRN EN ISO 25239 i izdvojiti osnovne zahtjeve na osiguranje sustava kvalitete zavarivanjem.

U eksperimentalnom dijelu na zavarenim uzorcima odgovarajuće geometrije koji su načinjeni primjenom FSW postupka provesti potrebna ispitivanja kako bi se ustanovila kvaliteta sukladno zahtjeva norme HRN EN ISO 25239. Posebno izraditi specifikaciju postupka zavarivanja i odrediti primjenjivost iste u realnim uvjetima. Zaključno, ocijeniti kvalitetu zavarenih spojeva i dati preporuke za interpretaciju i primjenu norme HRN EN ISO 25239 u proizvodnji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predvideni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ZAVARIVANJE TRENJEM.....	3
3. FSW ZAVARIVANJE	5
3.1. Osnovni parametri zavarivanja	8
3.1.1. Brzina vrtnje alata	12
3.1.2. Brzina zavarivanja.....	12
3.1.3. Sila zavarivanja	13
3.1.4. Kut nagiba alata prema osnovnom materijalu.....	14
3.2. Princip rada	15
3.3. Geometrija alata	18
3.4. Vrste spojeva.....	24
3.5. Prednosti i nedostaci FSW postupka.....	25
3.6. Primjena postupka i ograničenja kod zavarivanja aluminija	28
4. PREGLED NORMI HRN EN ISO 25239.....	36
4.1. HRN EN ISO 25239-1:2020, 1.dio: Tehnološki rječnik.....	36
4.2. HRN EN ISO 25239-2:2020, 2.dio: Oblikovanje zavarenih spojeva	36
4.3. HRN EN ISO 25239-3:2020, 3.dio: Osposobljenost rukovatelja zavarivanja.....	37
4.4. HRN EN ISO 25239-4:2020, 4.dio: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja	38
4.5. HRN EN ISO 25239-5:2020, 5.dio: Zahtjevi za kvalitetu i inspekciju	39
5. EKSPERIMENTALNI DIO	42
5.1. Opis eksperimentalnog dijela.....	42
5.2. Osnovni materijal	42
5.3. Ispitivanje penetrantima	45
5.4. Radiografsko ispitivanje	49
5.5. Vizualni test	52
5.6. Izrezivanje uzoraka, priprema i makrostrukturalna analiza	54
6. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak zavarivanja trenjem uz miješanje[2].....	1
Slika 2. Shematski prikaz zavarivanja trenjem[3].....	3
Slika 3.Zavarivanje elemenata kvadratnog poprečnog presjeka[3]	4
Slika 4. Shematski prikaz zavarivanja trenjem uz miješanje[4].....	6
Slika 5. Primjena FSW zavarivanja u automobilskoj industriji, LTH Castings[7]	7
Slika 6. FSW zavarivanje aluminijskih poprečnih greda i poluga za kabinske ploče[8]	8
Slika 7. Sile i brzine koje utječu na zavarivanje trenjem uz miješanje[9]	9
Slika 8. Dijagram promjene parametara kod FSW zavarivanja[11]:	10
Slika 9.Prikaz djelovanja sila F_x , F_y i F_z [12]	11
Slika 10. Lica zavara aluminijskih legura AA2014-T651 i AA6063-T651 zavarene s različitim nagibom alata[15].....	14
Slika 11. Faza I. FSW zavarivanja[3]	15
Slika 12.Faza formiranja FSW zavarenog spoja[17]	16
Slika 13.Faza II. FSW zavarivanja [3]	16
Slika 14. Položaj trna alata [3]	17
Slika 15. Područja u zavaru[11]	17
Slika 16. Oblici cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [18]	19
Slika 17. Oblici konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [18].....	19
Slika 18.MegaStir napredni alati za zavarivanje [6]	20
Slika 19. Alat za zavarivanje trenjem MX Triflute™[3]	21
Slika 20. Alat za zavarivanje Flared-Triflute™[19]	21
Slika 21. A-Skew™ alat [20]	22
Slika 22.Uzdužni presjeci čela za alata[3]	22
Slika 23. Utori na površini čela alata[11].....	23
Slika 24. Različiti oblici zavarenih spojeva zavarenih FSW postupkom[3]	25
Slika 25. Savijanje limova zavarenih elektrolučno i FSW postupkom[14]	26
Slika 26. Dijagrami deformacija pri FSW i MIG zavarivanju[3]	26
Slika 27. Proizvodnja aluminijskih panela u tvornici SAPA Profiler AB[22].....	30
Slika 28. Aluminijski paneli zavareni FSW-om na brodu X-Craft[23]	30
Slika 29. Korijeni ploča zavarenih FSW-om na ratnom brodu USNS 'Yuma' (T-EPF-8)[23]	31
Slika 30. Uzdužni i kružni zavareni spojevi na raketi Falcon 9 SpaceX[24].....	32
Slika 31. Zavarivanje modula svemirske letjelice Orion[23].....	33
Slika 32. Središnji tunel Forda GT [23]	34
Slika 33.Tipična karoserija brzih vlakova izrađena od aluminijske legure[24].....	34
Slika 34.Obradak aluminijske legure	43
Slika 35. Bočni pogled obratka aluminijske legure AlSi12	44
Slika 36. FSW zavareni spojevi na obratku	44
Slika 37. Penetrant, odstranjivač, razvijač korišteni u eksperimentu.....	46
Slika 38. Uzorak nakon čišćenja površine	47
Slika 39.Uzorak poprskan penetrantom	47
Slika 40.Zavar nakon ispitivanja penetrantom	48
Slika 41. Zavareni spoj prilikom reakcije razvijača	48
Slika 42. Površina na kojoj su vidljive indikacije u programu ImageJ	49
Slika 43. Postupak radiografskog ispitivanja pomoću RTG uređaja Balteau 300D	50
Slika 44.Radiogram tlocrta uzorka.....	51
Slika 45. Radiogram uzorka nagnutog pod kutom.....	51
Slika 46.Videoskop Mitcrop X750[26]	52
Slika 47.Vizualna kontrola pomoću videoscopa Mitcrop X750	53

Slika 48. Slika zavara pomoću videoskopa	53
Slika 49. Presjeci za rezanje makrouzoraka	54
Slika 50. Makrouzorci nakon ručnog brušenja.....	55
Slika 51. Makrouzorak 1	56
Slika 52. Makrouzorak 2	57
Slika 53. Makrouzorak 3	57
Slika 54. Makrouzorak 4	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Brzina vrtnje alata i brzina zavarivanja pojedinih materijala[14]	13
Tablica 2. Utrošena snaga i toplina kod različitih postupaka zavarivanja[14].....	28
Tablica 3. Kemijski sastav legure Al230	42
Tablica 4. Mehanička svojstva aluminijske legure EN AC 44300	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
C	-	Konstanta materijala
D	mm	Promjer
F_x	N	Uzdužna sila
F_y	N	Bočna sila
F_z	N	Aksijalna sila
M	Nm	Okretni moment
n	o/min	Broj okretaja
p	Pa	Tlak
p_t	Pa	Tlak trenja
p_z	Pa	Tlak zbijanja
T	°C	Temperatura osnovnog materijal
T_m	°C	Temperatura tališta osnovnog materijala
v	o/min	Brzina vrtnje alata
w	o/min	Brzina rotacije alata
α	-	Eksponent
α_A	°	Kut nagiba alata prema materijalu

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
FSW	<i>Friction stir welding</i> – zavarivanje trenjem uz miješanje
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
TWI	<i>The Welding Institute</i> – institut za zavarivanje

SAŽETAK

U ovom su radu obrađeni zahtjevi norme HRN EN ISO 25239 za procjenu kvalitete spojeva načinjenih postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada ukratko su opisani pojmovi poput povijesti, parametara, prednosti, nedostataka i primjene postupka zavarivanja trenjem uz miješanje (eng. Friction stir welding (FSW)). Opisan je princip rada te detaljno obrađena geometrija radnog alata. Također, navedena su i opisana ograničenja postupka kod zavarivanja aluminijskih legura.

U eksperimentalnom dijelu ispitan je uzorak načinjen od aluminijske legure AlSi12 postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje. Odrađena su ispitivanja prema zahtjevima norme HRN EN ISO 25239, kako bi se ocijenila kvaliteta zavarenog spoja. Dobiveni rezultati su analizirani te je ocijenjena primjenjivost postupka pri zavarivanju aluminijskih legura.

Ključne riječi: FSW postupak zavarivanja, aluminij, norma HRN EN ISO 25239, geometrija alata

SUMMARY

In this paper, the requirements of the HRN EN ISO 25239 standard for assessing the quality of joints made by the friction stir welding process are discussed. The paper consists of a theoretical and an experimental part.

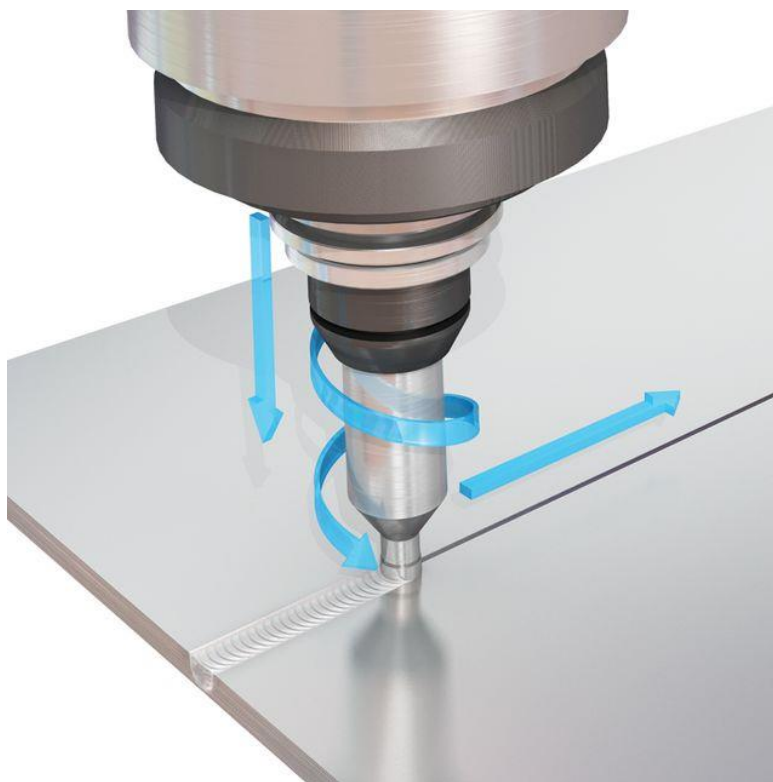
In the theoretical part of the work, terms such as history, parameters, advantages, disadvantages and applications of friction stir welding (FSW) are briefly described. The working principle is described and the geometry of the working tool is detailed. Limitations of the aluminum welding procedure are also listed and described. At the end of the theoretical part, each norm was interpreted separately.

In the experimental part, a sample made of aluminum alloy AlSi12 was tested using friction stir welding. Tests were performed according to the requirements of HRN EN ISO 25239, in order to evaluate the quality of the welded joint. The obtained results were analyzed and the applicability of the procedure for welding aluminum alloys was assessed.

Key words: FSW welding process, aluminum, standard HRN EN ISO 25239, tool geometry

1. UVOD

Tehnologija zavarivanja jedna je od najvažnijih tehnoloških procesa u metalnoj industriji. Zavarivanje je spajanje dvaju ili više materijala taljenjem ili pritiskom, s ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Ono ima neograničeno područje primjene u proizvodnji metalnih proizvoda u strojarскоj, zrakoplovnoj, automobilskoj, građevinskoj i energetskej industriji [1]. Kako bi se eliminirale sve negativne posljedice taljenja metala i naknadnog skrućivanja taline, poput povećanja tvrdoće u zavaru, mogućeg nastanka pukotina i poroznosti, patentiran je postupak zavarivanja trenjem uz miješanje. Postupak je prikazan slikom 1.



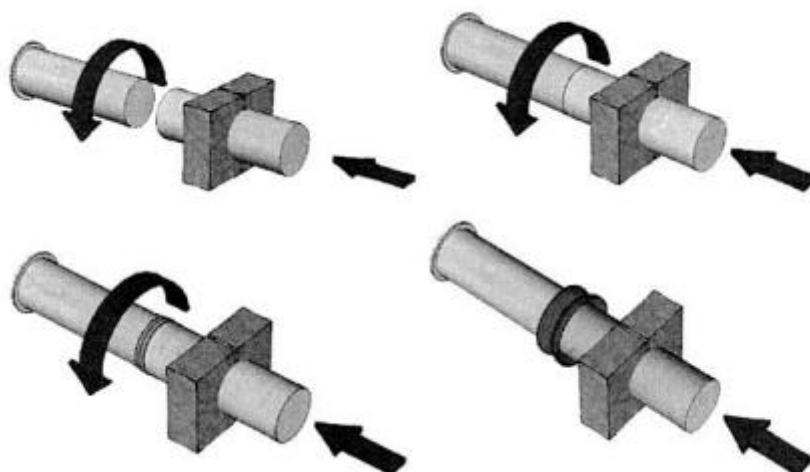
Slika 1. Postupak zavarivanja trenjem uz miješanje[2]

Postupak spajanja odvija se u čvrstom stanju te se koristi nepotrošni alat za spajanje dva obložena obratka bez upotrebe dodatnog materijala i zaštitnog plina. Zavarivanje trenjem uz miješanje posebno se ističe kao pogodan proces kada se radi o iznimno dugim pravocrtnim zavarima. Uz to, postupak omogućava veliku brzinu zavarivanja s minimalnim deformacijama što je posebno pogodno pri zavarivanju tankih limova. Također i kod zavarivanja debljih limova nije potrebno zavarivati u više prolaza jer postupak omogućava

dovođenje dovoljne količine topline potrebne za miješanje materijala [3]. U ovom radu detaljno će se obraditi način zavarivanja trenjem uz miješanje, i to zavarivanje trenjem aluminijskih legura, gdje će posebno biti opisani postupak zavarivanja kao i kvaliteta zavara, svojstva zavara i ostalo.

2. ZAVARIVANJE TRENJEM

Zavarivanje trenjem vrsta je zavarivanja pritiskom koja koristi kombinaciju mehaničke i toplinske energije tako što se trenjem između dva elementa dobiva toplina na dodirnim površinama. Princip rada je da barem jedan od dvaju elemenata vrši rotacijsko gibanje. Na taj način oslobođena toplina na dodirnoj površini dvaju elemenata dovodi materijal u omekšano stanje, a djelovanjem aksijalne sile ostvaruje se zavareni spoj [4]. Na slici 2. shematski je prikaz procesa zavarivanja trenjem u četiri faze. U prvoj fazi se jedan od dva radna dijela rotira, dok se drugi dio aksijalno pomiče prema njemu. Zatim se u drugoj fazi njihove površine dodiruju te tako dolazi do trenja između dodirnih površina. U trećoj fazi oslobođena toplina na dodirnoj površini dvaju elemenata dovodi materijal u omekšano stanje, dok se u posljednjoj fazi pomoću djelovanja aksijalne sile ostvaruje zavareni spoj između ta dva radna komada [3].



Slika 2. Shematski prikaz zavarivanja trenjem[3]

Zahvaljujući istiskivanju dijela materijala, u tom vijencu se izbacuju oksidi i nečistoće, pa je mikrostruktura spoja je uvelike povoljna.

Osnovni parametri su :

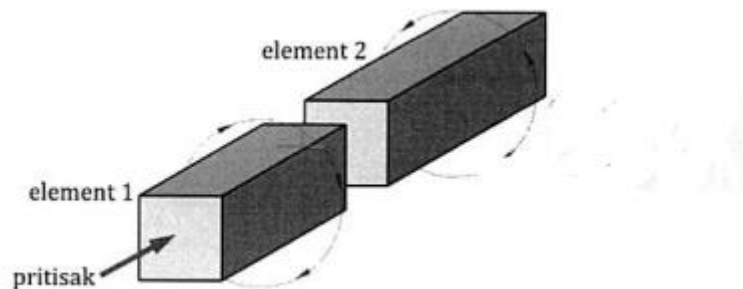
- Broj okretaja – $n, \frac{\circ}{\text{min}}$
- Tlak (pritisak) – $p, \text{N/m}^2(\text{Pa})$
- Okretni moment – M, Nm i
- Aksijalni pomak, s, mm .

Broj okretaja je usko povezan sa promjerom elementa odnosom:

$$n \times d = C \quad (1)$$

gdje C predstavlja konstantu materijala te je zbog toga primjena postupka limitirana na relativno male promjere, od 30 do 50 mm za čelike. Da bi postupak bio uspješan, rotirajući dio treba imati dovoljnu krutost da bi se izbjeglo izvijanje kod djelovanja sile tlaka. Time je ograničena i dužina rotirajućeg dijela u pravilu na 200 mm. Tlak na dodirnim površinama (tlak trenja p_t) izaziva trenje te se tako dodirne površine zagrijavaju. Prilikom zavarivanja različitih materijala, u trenutku postizanja potrebnog broja okretaja, tlak se povećava do tlaka zbijanja p_z , dok se kod zavarivanja istih materijala tlak zadržava na vrijednosti p_t do kraja procesa [3].

Procesom se postiže visoka razina proizvodnosti pa je vrlo pogodan za izradu manjih osno simetričnih dijelova, kao što su osovine. Za elemente kvadratnog presjeka, koristeći tehniku rotacija jednog ili oba elementa daje rezultate i moguće je spajanje materijala pod uvjetom da im se uzdužne osi poklapaju. Na slici je primjer zavarivanja trenjem elemenata kvadratnog poprečnog presjeka.

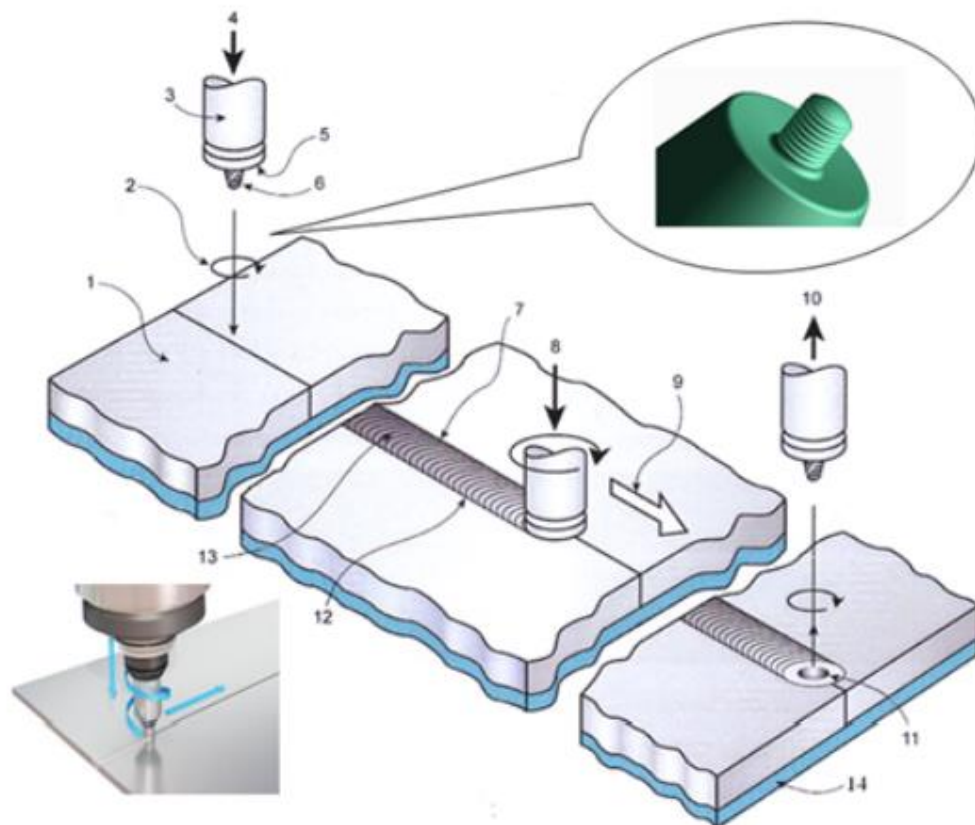


Slika 3. Zavarivanje elemenata kvadratnog poprečnog presjeka [3]

3. FSW ZAVARIVANJE

FSW zavarivanje (*Friction stir welding*) ili zavarivanje trenjem uz miješanje postupak je zavarivanja trenjem izumljen 1991. od grupe znanstvenika s instituta The Welding Institute of Cambridge U.K (TWI). Proces je tada klasificiran kao postupak zavarivanja bez taljenja materijala. Prvu industrijsku primjenu postupak je doživio 1994. u švedskoj tvornici SAPA Profiler AB za zavarivanje aluminijskih legura serije 6000.[5]

Postupak spajanja odvija se u čvrstom stanju te se koristi nepotrošni alat za spajanje dva obložena obratka bez upotrebe dodatnog materijala i zaštitnog plina. Toplina nastaje trenjem između rotirajućeg alata i materijala obratka, što dovodi do omekšanog područja u blizini alata FSW. Dok se alat kreće duž zglobne linije, on mehanički miješa dva komada metala i kova vrući i omekšani metal mehaničkim pritiskom koji na njega primjenjuje alat. Proces je primjenjiv za sve položaje za koje postoje mogućnosti opreme, poput horizontalnog ili vertikalnog položaja. Na donjoj strani limova na mjestu zavarivanja umetnuta je dodatna podloga koja služi kao osiguranje naspram izmicanja omekšanog materijala na mjestu zavarenog spoja. Alat kojim se zavaruje građen je od dva dijela: gornjeg koji je veći koji se naziva tijelo alata, te donjeg dijela koji se naziva trn alata. Zadaća trna je superplastična deformacija materijala kako bi se osiguralo povezivanje i miješanje materijala. Čelo alata predstavlja površinu alata koja u dodiru s površinom materijala uzrokuje pojavu trenja koje izaziva oslobađanje topline. Shematski prikaz FSW zavarivanja prikazan je na slici 4 [6].



Slika 4. Shematski prikaz zavarivanja trenjem uz miješanje[4]

1. Osnovni materijal
2. Smjer rotacije alata
3. Alat za zavarivanje
4. Smjer kretanja alata okomito na osnovni materijal
5. Čelo valjka alata – *shoulder*
6. Trn – pin
7. Napredna strana metala zavara
8. Smjer djelovanja aksijalne sile
9. Smjer kretanja alata – smjer zavarivanja
10. Smjer kretanja alata okomito na osnovni materijal
11. Izlazna rupa – *keyhole*
12. Povučena strana metala zavara
13. Lice metala zavara
14. Podložna ploča

Zbog habanja alata, FSW je prvotno namijenjen zavarivanju mekših materijala, kao što su aluminij, bakar, magnezij, cink, a u novije vrijeme čak i nemali broj čeličnih materijala i polimera. Važno je istaknuti da kod zavarivanja trenjem miješanjem nije potreban zaštitni plin, osim u slučaju zavarivanja čeličnih limova koji sadrže povećan udio mangana i kroma. Iznimno u tom slučaju kao zaštitni plin, koristi se argon koji štiti zavar od utjecaja atmosfere. Razvojem tehnologije, FSW je počeo dobivati primjenu u gotovo svim područjima proizvodne industrije, posebice u modernoj brodogradnji, automobilskoj, zrakoplovnoj i procesnoj industriji. Primjer primjene postupka u automobilskoj industriji, tvrtka LTH Castings d.o.o koja je proizvela obradak čija je kvaliteta ispitivana u eksperimentalnom dijelu ovog rada, prikazan je na slici 5. [6].



Slika 5. Primjena FSW zavarivanja u automobilskoj industriji, LTH Castings[7]



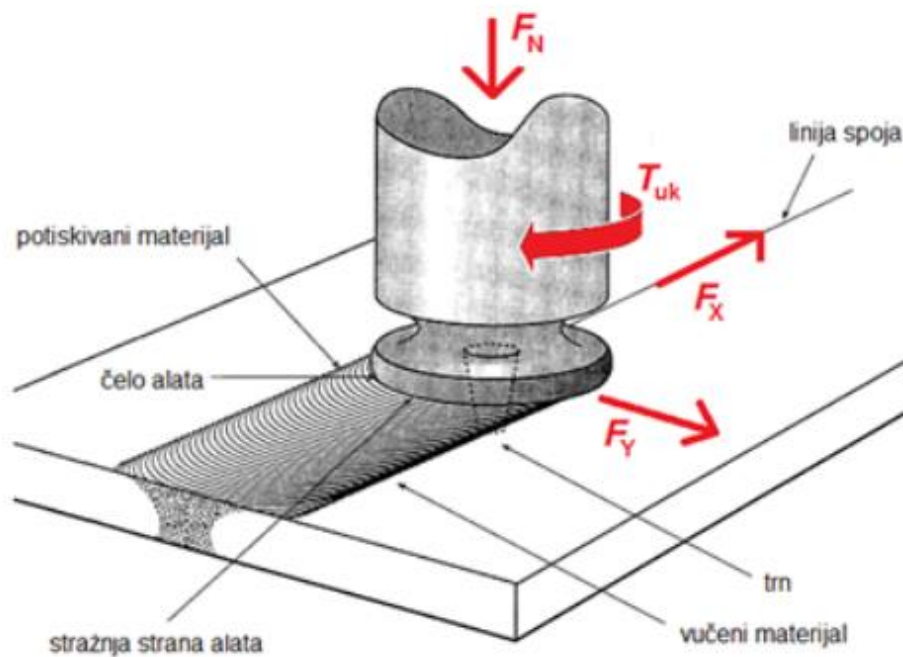
Slika 6. FSW zavarivanje aluminijskih poprečnih greda i poluga za kabinske ploče[8]

3.1. Osnovni parametri zavarivanja

Značajan utjecaj na kvalitetu zavarenih spojeva FSW postupka zavarivanja ima nekoliko faktora i parametara, kao i svojstva materijala koji se zavaruje. Ti parametri utječu i određuju brzinu i količinu dobivene topline, temperaturno polje, temperaturu hlađenja, tok materijala, raspodjelu topline, snagu i broj okretaja. Najznačajniji parametri su:

1. Brzina zavarivanja
2. Brzina vrtnje alata
3. Geometrija alata
4. Aksijalna sila- sila u smjeru gibanja alata
5. Nagibni kut alata
6. Odnos brzine zavarivanja i brzine vrtnje alata [6].

Ovi parametri također utječu na nastanak grešaka, izgled, mehanička svojstva i mikrostrukturu zavarenog spoja. Na slici 7. nalazi se prikaz zavarivanja trenjem uz miješanje uz detaljan prikaz sila koje djeluju na kvalitetu zavarenog spoja.



Slika 7. Sile i brzine koje utječu na zavarivanje trenjem uz miješanje[9]

Parametri zavarivanja ovise o mehaničkim svojstvima osnovnog materijala, ali i obliku alata za zavarivanje. Vlačna čvrstoća, žilavost i tvrdoća osnovnog materijala definiraju plastičnu deformaciju, tok omekšanog materijala oko trna alata i nastanak spoja, dok kasnije utječu i na mehanička svojstva nastalog spoja. Postupkom zavarivanja trenjem miješanjem lakše se zavaruju materijali koji imaju manju tvrdoću i manju vlačnu čvrstoću [10].

Na slici 8. dijagramom je prikazano kako se parametri zavarivanja mijenjaju u vremenu od početka do kraja zavarivanja [11].



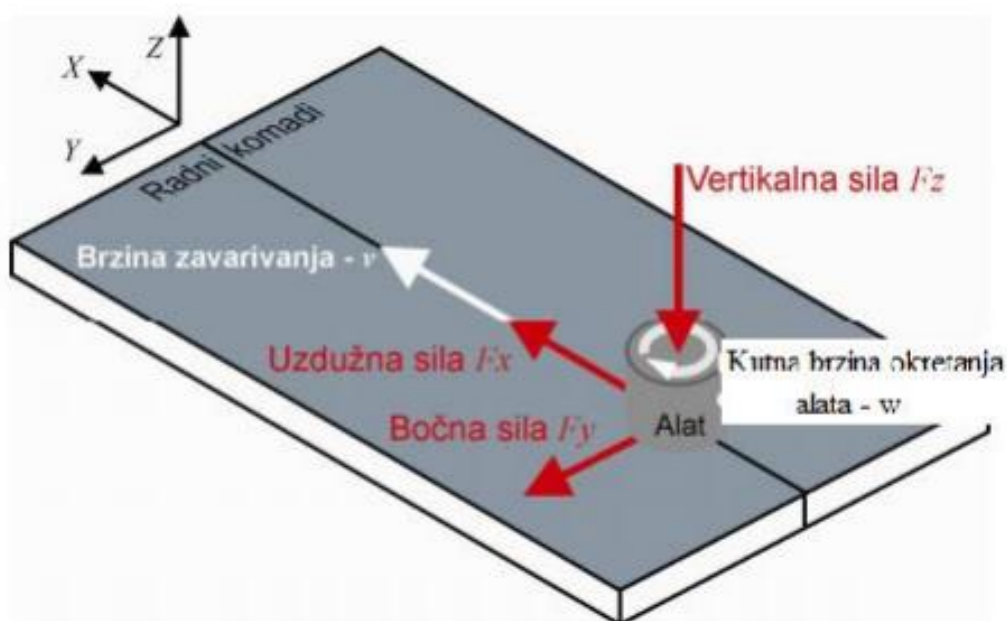
Slika 8. Dijagram promjene parametara kod FSW zavarivanja[11]:

1. ulaz trna u osnovni materijal
2. dodir čela alata s osnovnim materijalom
3. najveći moment kojim alat miješa materijal
4. omekšano stanje osnovnog materijala [11].

Osnovna tri parametra su:

- Brzina vrtnje alata ili brzina rotacije alata w je kroz cijeli proces konstantne vrijednosti od 100 do 1600 o/min. Konstantna je iz razloga što svaka promjena brzine vrtnje alata može dovesti do oštećenja alata
- Brzina zavarivanja (brzina translacije) – ona se bira isključivo na temelju mehaničkih svojstava materijala koji se zavaruje, njegove debljine te prihvaćene brzine vrtnje alata
- Aksijalna sila (F_z) – sila zavarivanja, odnosno ona sila koja omogućuje prodiranje alata u osnovni materijal. Svoj minimum postiže na kraju faze prodiranja, dok svoju maksimalnu vrijednost ostvaruje u trenutku prodiranja trna (*eng. Pin*) u materijal koji se zavaruje. Ona ovisi o svojstvima materijala zavarivanih dijelova i geometrijskih karakteristika trna i čela alata i može dostići vrijednosti čak i do 200 kN [3].

Osim aksijalne sile F_z , na alat djeluju još dvije sile uzdužna sila F_x te bočna sila F_y . Uzdužna ili longitudinalna sila djeluje usporedno sa smjerom gibanja alata. Javlja se kao posljedica otpora materijala gibanju alata te se njena vrijednost mijenja obrnuto proporcionalno temperaturi materijala oko alata. To bi značilo da bi povećanje temperature materijala oko materijala za posljedicu imalo smanjenje vrijednosti uzdužne sile. Uzdužna sila negativno djeluje na vijek trajanja materijala alata tako što pospješuje trošenje materijala alata. Bočna ili F_y djeluje normalno na pravac kretanja alata. Na slici 9. nalazi se shematski prikaz rasporeda sila kod FSW zavarivanja.



Slika 9. Prikaz djelovanja sila F_x , F_y i F_z [12]

Kako bi se osigurao učinkovit i kvalitetan ciklus nužno je pažljivo odabrati ranije navedene parametre. Također, nužno je da materijal koji okružuje alat bude dovoljno vruć kako bi osigurao potreban protok omekšanog materijala i sveo sile koje djeluju na minimum. Inače, u slučaju da je alat prehladan, u zoni miješanja može doći do poroznosti i drugih smetnji, čak u najgorem slučaju može doći i do pucanja samog alata. S druge strane prekomjerni unos topline može također negativno utjecati na konačna svojstva i kvalitetu zavara. Kako bi se FSW postupkom zavarivanja postigao što kvalitetniji zavareni spoj potrebna je optimalna kombinacija vrijednosti navedenih parametara koje u novije vrijeme osim eksperimentalnim metodama, moguće utvrditi i numeričkim simulacijama [10].

3.1.1. Brzina vrtnje alata

Brzina vrtnje alata v (o/min) je najutjecajniji parametar kod zavarivanja trenjem uz miješanje jer uz sve navedeno utječe i na brzinu zavarivanja. Povećanjem brzine vrtnje alata dolazi do povećanja unosa topline, a iz toga proizlazi redukcija brzine hlađenja u području zavarivanja, što rezultira nepovoljnom mikrostrukturom. Povećanjem brzine vrtnje, ravnomjernija je raspodjela tvrdoće po cijelom području spoja, a povećava se i veličina zrna [11]. Iz toga se može zaključiti kako uvijek postoji najpovoljniji omjer brzine vrtnje alata i brzine posmičnog gibanja alata za određenu vrstu metala i određenu debljinu materijala koji se zavaruje. Za pojedine aluminijske legure vrijedi formula [13]:

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

T , °C predstavlja temperaturu osnovnog materijala kod zavarivanja, T_m , °C je temperatura tališta osnovnog materijala, α je eksponent čija vrijednost varira između 0,04 i 0,06 te je K konstanta u rasponu od 0,65 do 0,75 [13].

Najveća aksijalna brzina gibanja ostvaruje se na vanjskom rubu čela alata te ona izaziva najznačajniji dovod topline. Ukoliko se tangencijalna brzina poveća iznad dozvoljene granice doći će do prekomjernog omekšavanja materijala te njegovog istiskivanja na licu zavara. Posljedica svega toga je povećani broj pukotina na zavarenom spoju. Mala brzina rotacije alata rezultira nedovoljnim unosom topline i suženom zonom miješanja materijala, što također može rezultirati nedovoljnim miješanjem materijala. Pri velikim brzinama vrtnje, postoji mogućnost veće istežljivosti zavarenog spoja [10].

3.1.2. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja ili brzina translacije je uz brzinu rotacije alata najvažniji parametar ovog postupka zavarivanja. Ima jako značajan utjecaj na produktivnost i ekonomičnost ukupnog procesa zavarivanja. Ovisi o utjecajnim faktorima poput vrste aluminijske legure koju je potrebno zavariti, brzini vrtnje alata, dimenzijama i obliku alata, obliku spoja i dubini prodiranja. Prilikom velikih brzina zavarivanja dolazi do smanjenja unosa topline po dužini zavara što rezultira do nedostatne plastičnosti materijala i nastajanja pukotina. Kod nižih brzina zavarivanja formira se zavareni spoj veće vlačne čvrstoće, međutim niže brzine mogu imati i

negativan utjecaj na mehanička svojstva, kao što je primjerice nastanak crvolike pore [11]. U tablici 1. su navedeni podaci brzina vrtnje alata i brzine zavarivanja za neke materijale, gdje n predstavlja brzinu vrtnje alata dok v predstavlja brzinu zavarivanja [14].

Tablica 1. Brzina vrtnje alata i brzina zavarivanja pojedinih materijala[14]

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

U istraživanju [15], zavarivane su dvije iste aluminijske legure, debljine 5 mm u sučeljenom spoju. Brzina vrtnje alata je 1600 o/min, dok su brzine zavarivanja bile različite 50 mm/min i 62 mm/min. Prilikom statičkog vlačnog pokusa zavara izvedenih brzinom zavarivanja 50 mm/min s legurom EN AW-6082-T6 na potiskivanoj strani izmjerena je vlačna čvrstoća od 183 MPa. Za slučaj zavara koji su zavareni brzinom zavarivanja 62 mm/min izmjerena je vlačna čvrstoća 170 MPa [15]. Pri tome se dolazi do zaključka da porastom brzine zavarivanja opada vlačna čvrstoća zavarenog spoja.

3.1.3. Sila zavarivanja

Aksijalna sila (F_z) ili sila pritiska alata na materijal je ona sila kojom alat pri zavarivanju djeluje na materijal. Minimalna sila zavarivanja je ona pri kojoj se dobiju zavareni spojevi bez pogrešaka te se ona naziva optimalna sila zavarivanja. O sili zavarivanja ovise debljina deformiranih lamela u mikrostrukturi, stupanj miješanja materijala i međusobna difuzija kao i tok materijala pri zavarivanju aluminijskih legura. Kod zavarivanja materijala koji imaju veću vlačnu čvrstoću potrebna je veća pritiska sila nego kod materijala s nižom vlačnom čvrstoćom. Sila zavarivanja direktno utječe na prodiranje trna u osnovni materijal. Tokom prodiranja alata u materijal pojavljuju se dva karakteristična skoka sile. Prvi se javlja u početku prodiranja trna

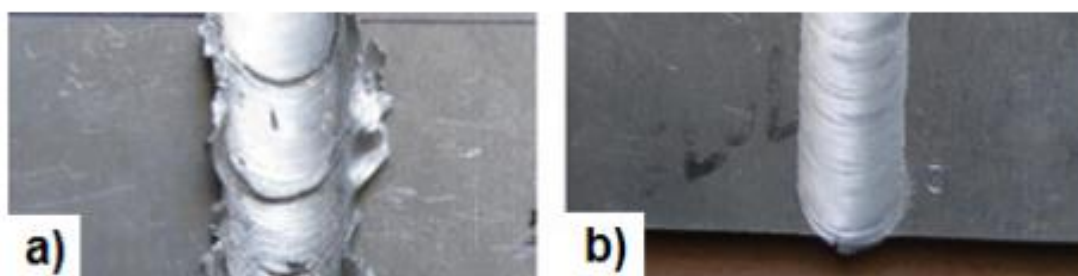
alata, dok se drugi pojavljuje u trenutku kontakta čela alata s materijalom. Nakon uspostavljanja stabilnog režima zavarivanja temperatura u blizini čela alata i sila pritiska alata na materijala konstantne su vrijednosti [11].

Prekomjerna sila zavarivanja izazivat će istiskivanje omekšanog materijala oko čela alata što izravno utječe na lošija mehanička svojstva zavarenog spoja kao i na smanjenje poprečnog presjeka materijala na mjestu zavara. Nedovoljna aksijalna sila za posljedicu će imati zavar lošijeg izgleda, grublju površinu lica zavara zbog nedovoljnog miješanja i omekšavanja materijala [11].

3.1.4. Kut nagiba alata prema osnovnom materijalu

Alat se u praksi može postaviti okomito na osnovni materijal ili u drugom slučaju može biti nagnut pod određenim kutom. Kut α_A predstavlja kut između osi alata i normale na površinu elemenata koji se zavaruju te se njim mjeri nagib alata. U slučaju da je alat nagnut u smjeru zavarivanja, kut α_A je negativan i na taj način se omogućava ostvarivanje većeg pritiska prednjeg dijela alata u gibanju kako bi se materijal prije zavarivanja još dodatno predgrijao. Kod zavarivanja teže zavarljivih materijala kojima je viša temperatura tališta potrebno je dodatno predgrijavanje. Međutim, u praksi se ipak češće upotrebljava alat nagnut suprotno do smjera zavarivanja. U tom je slučaju kut nagiba α_A pozitivan te on na taj način povećava pritisak na materijal iza trna alata. Povećanjem kuta nagiba, ujedno se povećava kovanje materijala te hidrostatski tlak iz trna alata. Povećanjem kuta nagiba s 0° na 3° , sila zavarivanja se može povećati čak i do 300 % [10].

Na slici 10. prikazana su dva zavara aluminijskih legura zavarena pod različitim nagibom alata. Iz slike je vidljivo kako se većim kutom nagiba alata postiže bolji izgled lica zavara. Na slici a) zavarivano je pod nagibom od 2° dok je pod b) zavareno pod nagibom 4° [15].



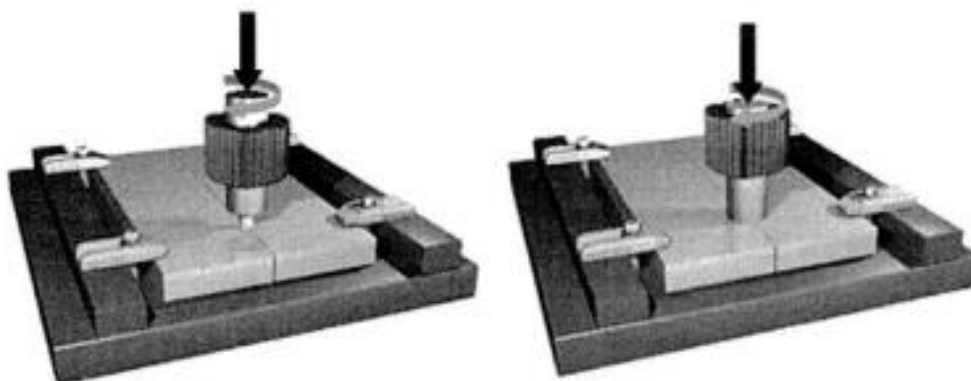
Slika 10. Lica zavara aluminijskih legura AA2014-T651 i AA6063-T651 zavarene s različitim nagibom alata [15]

3.2. Princip rada

Zavarivanje dva radna elementa pomoću postupka zavarivanja trenjem uz miješanje se odvija kroz dvije faze:

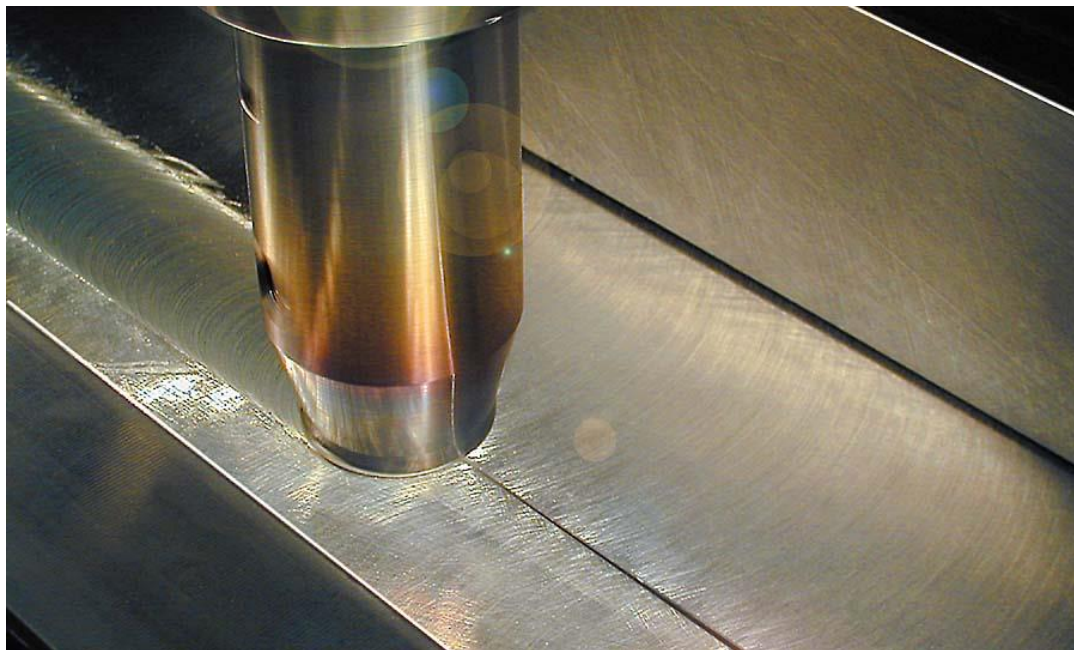
- faza I.: stvaranje topline u osnovnom materijalu,
- faza II.: zavarivanje.

U prvoj fazi alat rotira kutnom brzinom većom 600 o/min te se translacijski kreće prema radnim elementima koje je potrebno zavariti. Pri tome je vrlo bitno provjeriti jesu li radni elementi (komadi) pravilno stegnuti, jer se pri prodiranju alata kroz materijal radnih elemenata pojavljuju vrlo jake sile otpora. Kako bi sam proces mogao krenut, potrebna je aksijalna sila koja u kombinaciji s oslobođenom toplinom omogućuje prodiranje alata u materijal radnih komada. Aksijalna sila najvećeg je iznosa na samom startu prodiranja alata u materijal, te kako vrijeme prolazi, njena vrijednost se polagano snižava, dok se kao rezultat trenja između osnovnog materijala i alata povećava količina oslobođene topline. Oslobođena toplina može se povisiti povećanjem radijusa valjka. Nužno je zagrijavanje osnovnog materijala na temperaturu njegove tople plastične deformacije, koja u praksi iznosi 80% temperature taljenja materijala. Prva faza FSW zavarivanja završava potpunim zavarivanjem radnih komada koje se dobije prodiranjem igle alata u osnovni materijal na udaljenosti od 0,3 ÷ 0,6 mm od njegove suprotne plohe. Alat se namješta tako da mu je uzdužna os okomita ili pod blagim kutom unatrag (do 3°) u odnosu na liniju spoja [3]. Prikaz faze I. vidljiv je na slici 11.



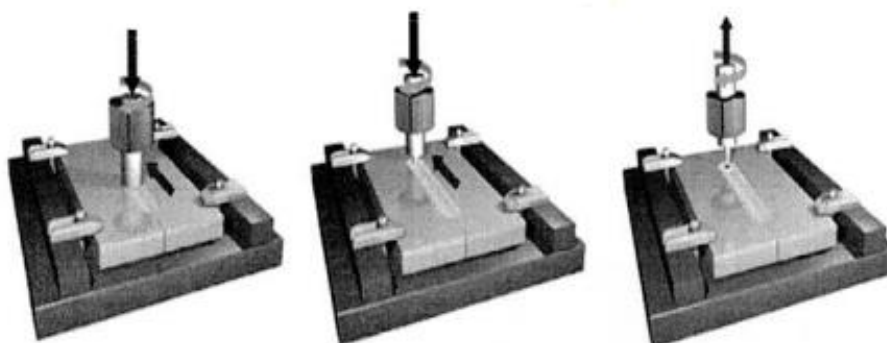
Slika 11. Faza I. FSW zavarivanja[3]

Nakon toga slijedi druga faza, faza formiranja zavarenog spoja, u kojoj nakon što je osnovni materijal postigao optimalnu temperaturu, alat započinje složeno gibanje. To se gibanje sastoji od kontinuiranog rotacijskog te translacijskog po liniji spoja dva radna elementa što je prikazano slikom 12.



Slika 12.Faza formiranja FSW zavarenog spoja[17]

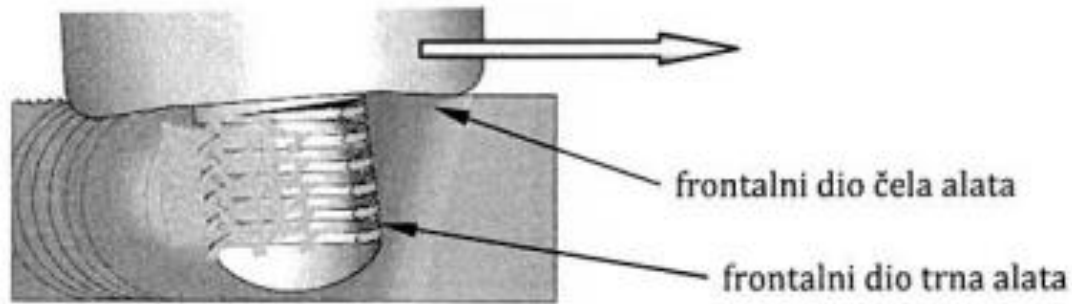
Trn se kreće uzduž linije spoja dva radna elementa. Translaciju vrši samo alat ili postolje s radnim elementima. Za vrijeme procesa, konstantno se zagrijava novi materijal koji prelazi u plastično stanje i miješa se, dok se paralelno iza alata glatko zagrijani materijal koji se hladi i skrućuje te se tako formira homogen spoj. Pri formiranju korijenske strane zavara koristi se pomoćna podložna ploča. Prikaz druge faze FSW zavarivanja vidljiv je na slici 13 [4].



Slika 13.Faza II. FSW zavarivanja [3]

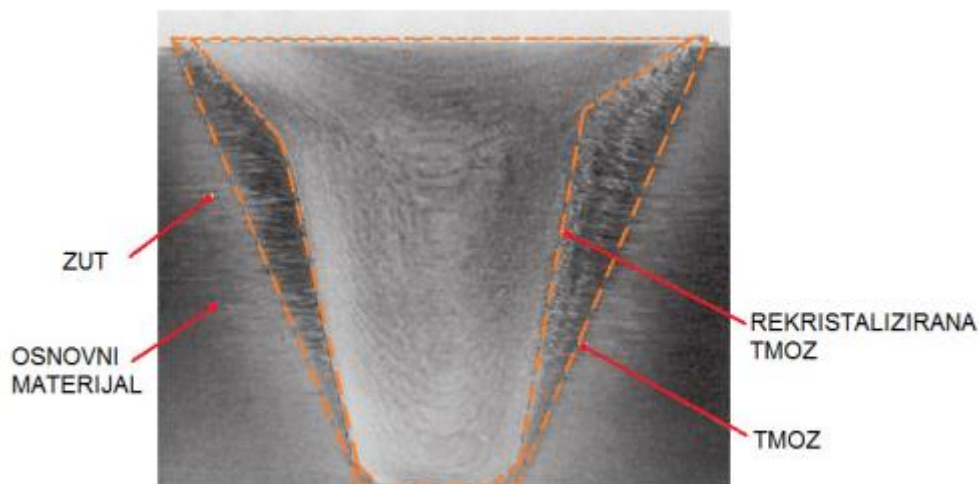
Ovu fazu karakterizira specifično i različito oslobađanje topline trenjem. Miješanje metala odvija se pomoću trna (*eng. Pin*), koji uz miješanje ujedno i usitnjava strukturu istog materijala (slika 14.). Najveći dio oslobođene topline stvaraju prednji dio trna i čelo alata zbog svog

konstantnog dodira s nezagrijanim materijalom prilikom translacijskog gibanja alata. Na površini čela alata, kao i na ostalim dijelovima površine trna, stupanj oslobađanja topline znatno je manji upravo zbog toga što se te površine nalaze u kontaktu s materijalom koji je već ranije zagrijan i plastičan [3].



Slika 14. Položaj trna alata [3]

Postupkom zavarivanja trenjem miješanjem dolazi do promjena u mikrostrukturi osnovnog materijala oko i unutar područja miješanja. Tako dobiveni zavari dijele se na 4 različita područja u poprečnom presjeku. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom rezultira značajnim promjenama u mikrostrukturi osnovnog materijala unutar i oko područja miješanja. Dobiveni zavari obično se dijele na 4 područja u poprečnom presjeku što je prikazano slikom 15.



Slika 15. Područja u zavaru[11]

ZUT predstavlja zonu utjecaja topline, a TMOZ je termo-mehanički obrađena zona. Kreiranje navedenih područja posljedica je miješanja materijala. Zagrijavanje u zoni utjecaja topline

prilično povećava temperaturu materijala oko zavora te utječe na promjenu čvrstoće, duktilnosti, tvrdoće i otpornosti na koroziju [11].

3.3. Geometrija alata

Dizajn alata je vrlo važan faktor, jer dobar alat može poboljšati i kvalitetu zavora i maksimalnu moguću brzinu zavarivanja. Poželjno je da materijal alata bude dovoljno čvrst, žilav i otporan na temperaturu zavarivanja. Osnovni oblik alata za FSW zavarivanje dizajniran je s glatkim čelom i konusnim vrhom. Alat za zavarivanje trenjem miješanjem sastoji se od vrha i čela alata. Njegove dvije osnovne funkcije su:

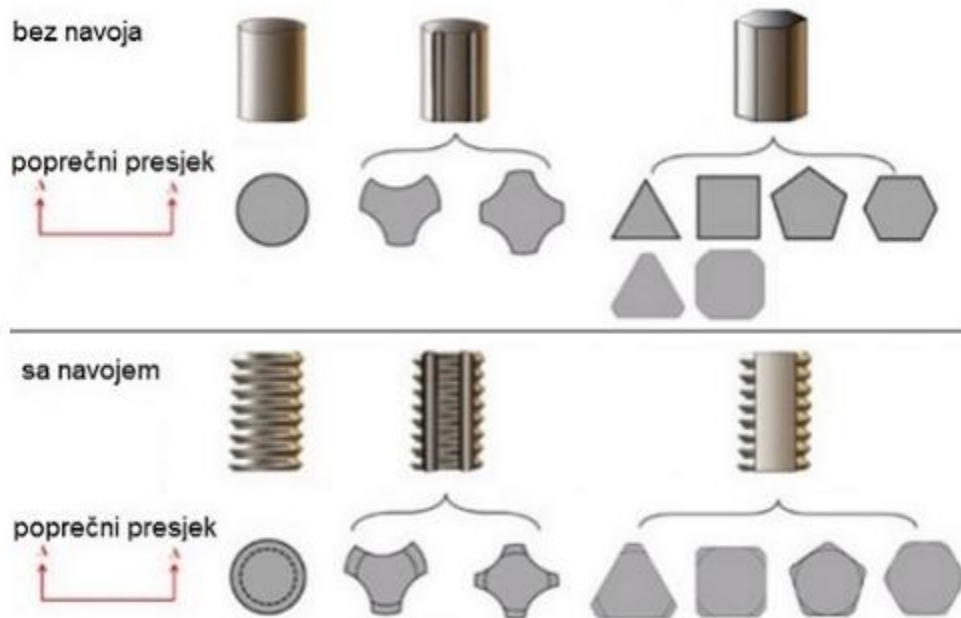
- tečenje materijala
- lokalno zagrijavanje.

Geometrija alata neizravno utječe na unos topline kroz količinu osnovnog materijala koji sudjeluje u miješanju materijala pri stvaranju zavarenog spoja. Pri većim količinama omekšanog plastično deformiranog osnovnog materijala u području oko trna i ispod čela alata oslobađa se više topline zbog samog trenja unutar materijala pri miješanju [11].

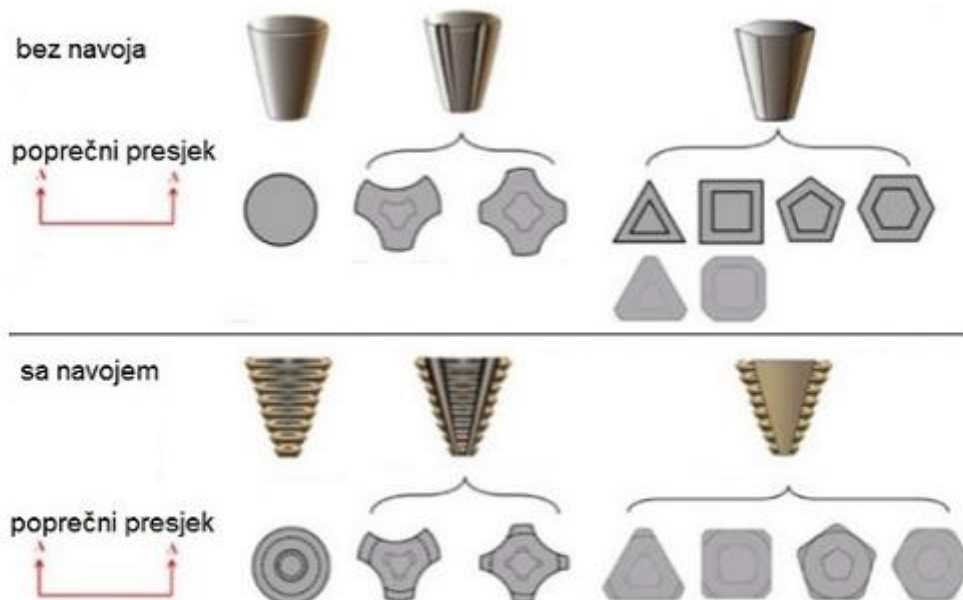
Korištenje različitih geometrija alata za zavarivanje trenjem miješanjem može rezultirati različitim gibanjem omekšanog materijala između elemenata u spoju. Tijela alata mogu biti konusna ili cilindrična. Oblik tijela nema bitan utjecaj na zavarivanje radi minimalnog ulaza tijela alata u osnovni materijal pri zavarivanju. Postoje dva dijela alata, a to su gornji dio – tijelo te donji dio – trn. Trn alata ima ulogu kod postizanja superplastične deformacije materijala što osigurava njegovo miješanje i spajanje te u manjoj mjeri i za dovođenje topline. Mogu biti cilindričnog ili konusnog oblika ili i s ravnim stranicama sa strana. Alati koji nemaju trn, odnosno imaju ravnu površinu čela upotrebljavaju se za zavarivanje tanjih limova.

Za zavarivanje limova veće debljine koriste se konusni trnovi, dok se za zavarivanje limova do 12 mm debljine koriste jednostavni alati s cilindričnim trnom. Na trnu alata također može biti izveden i navoj: metrički, trapezni, pilasti, cijevni i drugi. Pri zavarivanju materijala koji imaju veću čvrstoću i tvrdoću primjenjuju se alati s jednostavnim cilindričnim trnom koji omogućava veći vijek trajanja samog alata. Alati sa složenijom izvedbom trna služe za zavarivanje mekših materijala poput bakrovih i aluminijskih legura. Vrh trna alata može biti ravan, zaobljen ili konusan. Zaobljen ili konusan vrh trna smanjuje iznos potrebne pritisne sile pri ulasku trna u materijal na početku zavarivanja, a samim time se povećava radni vijek trajanja alata [11].

Slika 16. prikazuje neke od najčešćih oblika cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini, dok na slici 17. prikazani su neki od najčešćih oblika konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini.



Slika 16. Oblici cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [18]



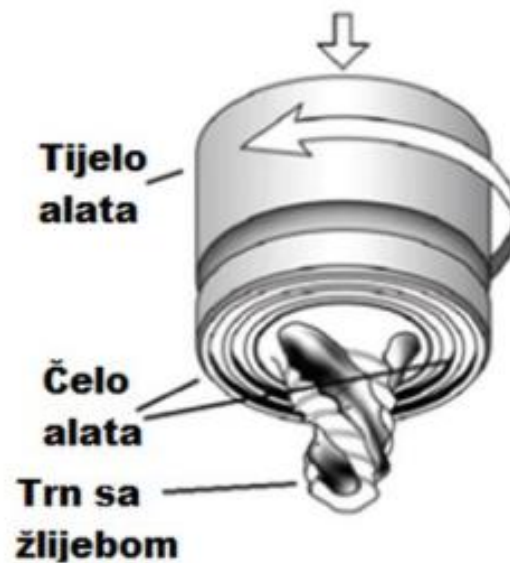
Slika 17. Oblici konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [18]

Na slici 18. prikazani su MegaStir napredni alati koji se koriste danas za zavarivanje materijala. Iznimno su korisni jer omogućuju zavarivanje različitih geometrija zavarenih spojeva te se njima mogu spajati različite legure.



Slika 18. MegaStir napredni alati za zavarivanje [6]

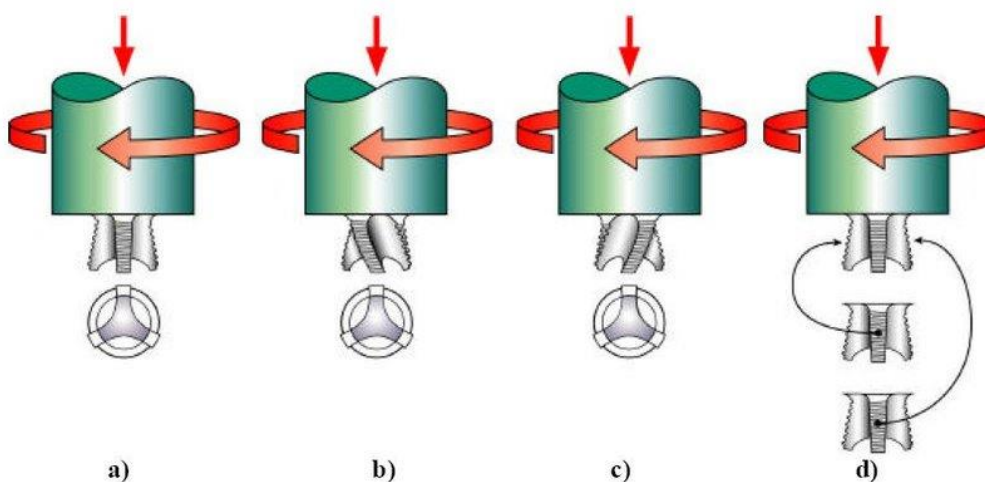
Razvojem dizajna alata, došlo je do zaključka da poboljšanja dizajna uvelike utječu na kvalitetu i produktivnost. Tako je TWI institut patentirao grupu trospiralnih alata za zavarivanjem trenjem miješenjem Flared-Triflute™ za preklopne zavare i MX Triflute™ (slika 19.) za sučeljene zavare [3].



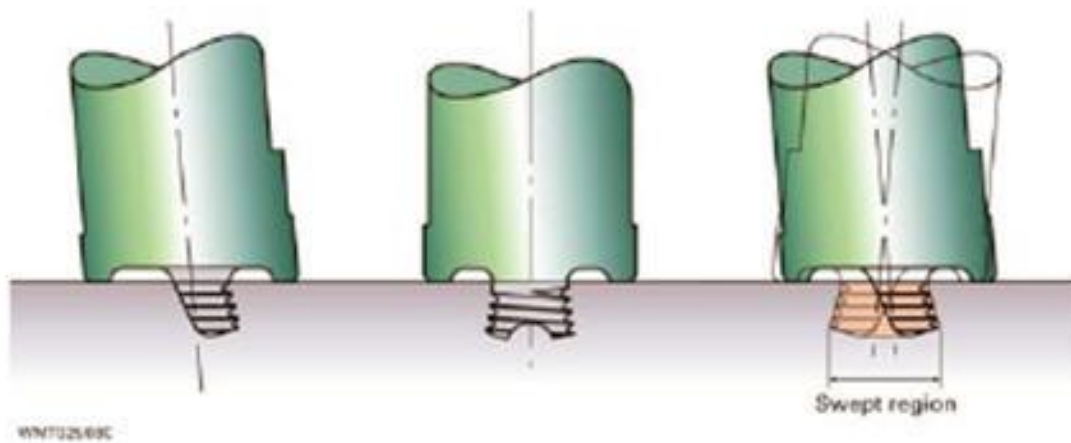
Slika 19. Alat za zavarivanje trenjem MX Triflute™[3]

Alat MX Triflute™ ima zaobljenje na vrhu trna te radi puno manju dislokaciju (oko 70%) nego što je to slučaj za običan konusni alat istog promjera u samom korijenu trna. Tako se povećava efektivna površina dodira materijala i alata što za posljedicu ima povećanje oslobođene topline, reduciranje aksijalne sile te se poboljšava primarni i sekundarni tok materijala.

Uz alat Flared-Triflute (slika 20.) za preklopne zavarene spojeve, TWI je patentirao još jedan poseban alat A-skew™, prikazan na slici 21. Specifičnost ovog alata je ta da je os trna pod kutom naspram osi cilindričnog tijela alata.

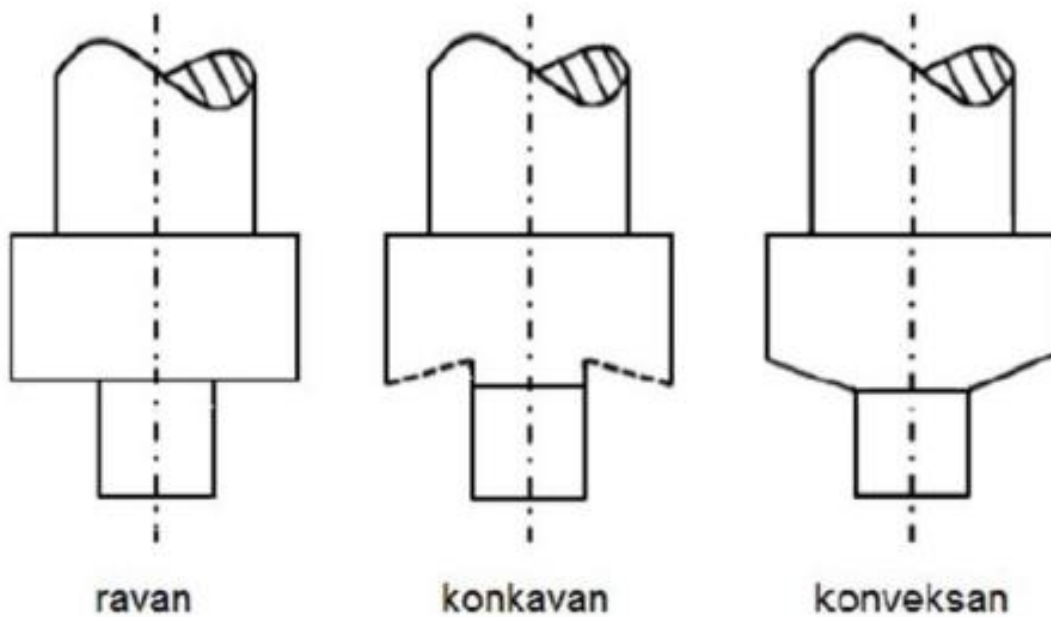


Slika 20. Alat za zavarivanje Flared-Triflute™[19]



Slika 21. A-Skew™ alat [20]

Osim dizajna trna alata, bitno je dati važnost i izradi profila čela (*eng. Shoulder*) alata. Alatno čelo najčešće ima reljefni oblik s koncentričnim kružnicama ili spiralnim utorima. Oblik čela utječe na dovođenje topline trenjem kao i na utiskivanje materijala i oblikovanje lica zavara. Alatno čelo može imati ravan, konkavan ili konveksan uzdužni presjek. Primjeri uzdužnih presjeka čela alata namijenjenih FSW zavarivanju prikazani su na slici 22 [11].

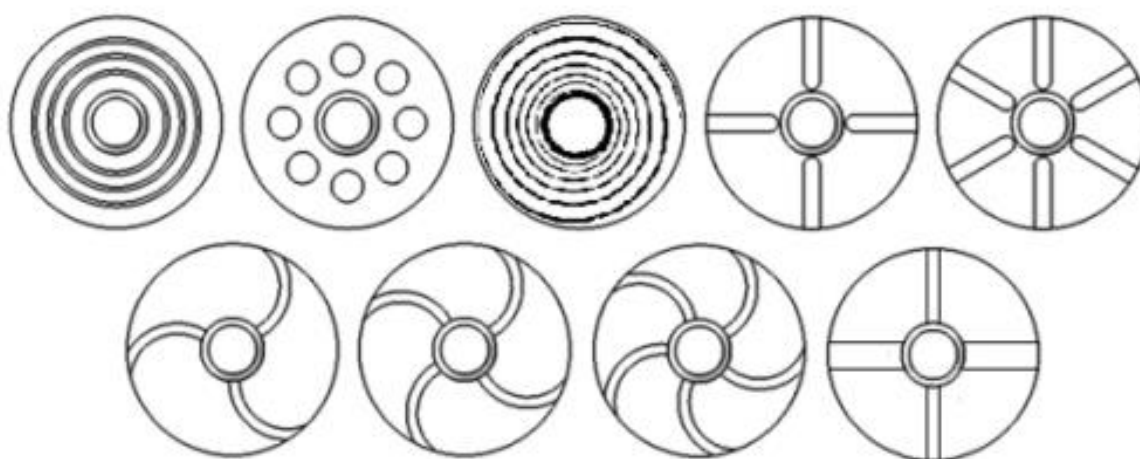


Slika 22. Uzdužni presjeci čela za alata[3]

Alat koji ima ravni uzdužni presjek čela nije efikasan u sprečavanju curenja omekšanog materijala iz područja zavarivanja. Zavareni spojevi napravljeni alatom s ravnim čelom imaju zakrivljene rubove zbog istiskivanja materijala. Najveća prednost alata s ravnim čelom je jednostavnost pri samoj izradi.

Konkavan presjek čela alata s kutom od 6° do 10° onemogućuje izlaz omekšanog materijala. Kada se alat utisne na samom početku procesa, dio materijala ulazi u konkavnu šupljinu, koja tada djeluje kao opskrba stvarajući pritisak na preostali materijal u presjeku. Postupnim pomicanjem alata u smjeru zavarivanja, istovremeno iz zalihe materijal konstantno izlazi i ostaje u zavara. Što se tiče novog materijala, on ispred alata iznova ulazi u konkavnu šupljinu te i dalje služi za opskrbu sve do samo završetka procesa zavarivanja. Pri zavarivanju alatom konkavnog presjeka čela poželjno je montirati vertikalnu os alata 1° do 3° suprotno od smjera zavarivanja kako bi se osigurao što bolji ulaz materijala ispred alata i povećala sila zavarivanja na stražnjoj strani alata. Alati izrađeni s konveksnim presjekom čela ne koriste se učestalo u praksi, ponajviše zbog ekstruzije i gubitka omekšanog materijala u zakrivljenim rubovima. Pogodnost alata s konveksnim presjekom čela alata je mogućnost spajanja dvaju limova različitih debljina postavljenih u sučeljeni spoj [11].

Velika se važnost posvećuje profiliranju površine čela alata, čija površina može biti glatka ili može sadržavati izrađene različite oblike gravura, utora. Najčešće korišteni utori prikazani su slikom 23. Utori ili gravure različitih oblika na površini čela alata poboljšavaju miješanje osnovnog materijala. Pravilan izbor čela rezultirat će povećanjem oslobođene topline, jer će se zbog povećanja dodirne površine, povećati i trenje između alata i osnovnog materijala. Utori na površini čela alata omogućuju bolji tok omekšanog materijala s prednje na stražnju stranu iza alata. Negativna strana utora na površini čela alata je ta što zavar ima lošiji izgled lica, međutim daju puno bolja mehanička svojstva [13].



Slika 23. Utori na površini čela alata[11]

Čelo alata najčešće ima reljefni oblik s koncentričnim krugovima ili spiralnim žljebovima. Izrađuje se žlijeb u obliku zavojnice koja počinje na rubu tijela alata, a završava u centru ili uz

trn alata. Ovaj utor pospješuje površinski tok materijala strujanjem od ruba čela prema sredini zavarenog spoja, a uz to i otklanja potreban nagib alata. Žlijeb izrađen u obliku zavojnice na alatu s konkavnim presjekom povećava stabilnost procesa pri većim brzinama zavarivanja. Ova vrsta žlijeba izrađena na alatima s konveksnim presjekom također povećava stabilnost procesa održavajući stalnu dubinu zavarivanja pri zanemarivim promjenama u visini limova koji se zavaruju pri konstantnoj pritisknoj sili. Oblik čela alata ima utjecaj samo na horizontalno miješanje materijala, u ravnini s čelom alata. Oblik čela određuje dinamiku miješanja materijala u gornjem sloju osnovnog materijala, ispod čela alata. Gustoća osnovnog materijala, njegov udarni rad loma i prionjivost na površnu čela alata uvjetuju debljinu sloja osnovnog materijala koji se miješa rotacijom alata [11].

Materijali za izradu zavarivačkih glava alata moraju:

- Imati visoku otpornost na trošenje
- Visoka mehanička i toplinska svojstva
- Nizak koeficijent toplinske provodljivosti [3].

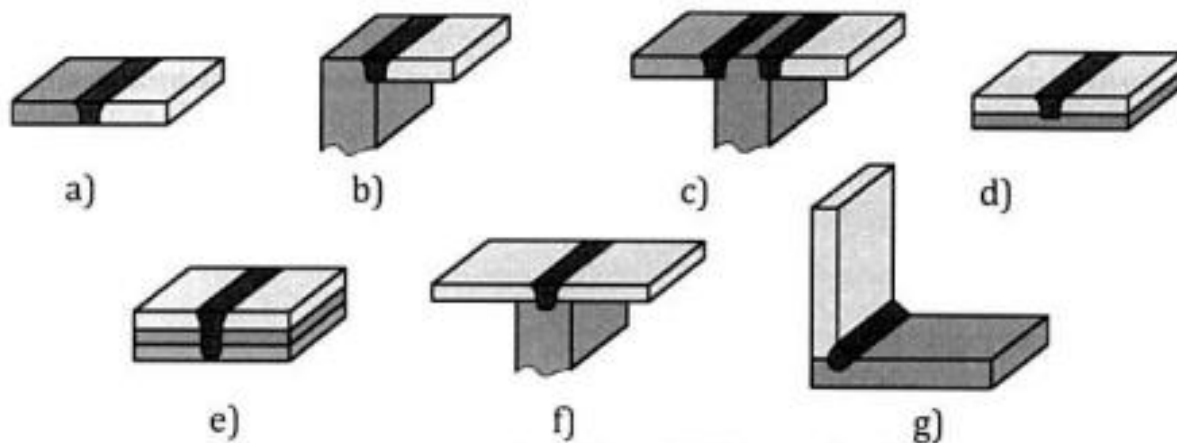
Također, materijal alata trebao bi imati dobru otpornost na oksidaciju i relativno nisku toplinsku vodljivost kako bi se reducirali gubici topline i toplinska oštećenja strojeva dalje uz pogon. Vruće obrađeno – alatni čelik kao što je AISI H13 pokazao se savršeno prihvatljivim za zavarivanje aluminijskih legura u rasponu debljina od 0,5-50 mm, međutim za zahtjevnije primjene potrebni su napredniji materijali kao što su visoko abrazivni kompoziti metalne matrice ili materijali s višom talištem poput čelika ili titana.

Najčešće korišteni materijali za izradu alata su superlegure na bazi volframa i molibdena, sialona ili polikristalnog kubnog nitrida bora [6].

3.4. Vrste spojeva

Prvenstveno, ovaj proces patentiran je za zavarivanje sučeljeno zavarivanje aluminijskih legura, te su zbog toga najčešće vrste spojeva sučeljeni i preklopni spojevi. Za vrijeme početne faze zavarivanja kod ulaska alata u materijal, zbog javljanja sila visokih vrijednosti, nužno je dobro učvrstiti radne komade te poduzeti posebne mjere opreza. Zato se kod zavarivanja preklopnog i sučeljenog spoja pri postavljanju limova, ispod samih limova postavlja podložna ploča. Postavlja se na mjestu zavarivanja, omogućuje hidrostatski tlak pri miješanju materijala te onemogućava izmicanje omekšanog materijala. Pri oblikovanju spojeva treba uzeti u obzir i

važnost ravnomjernog ili približno ravnomjernog odvođenja topline na obje strane od mjesta zavarivanja. U slučaju da se s jedne strane sučeljenog spoja nalazi materijal manjeg volumena koji zadržava toplinu, u zavarenom spoju mogu se pojaviti greške kao posljedica nejednakog odvođenja topline [13]. Na slici 24. prikazani su primjeri različitih vrsta i oblika zavarenih spojeva.



Slika 24. Različiti oblici zavarenih spojeva zavarenih FSW postupkom[3]

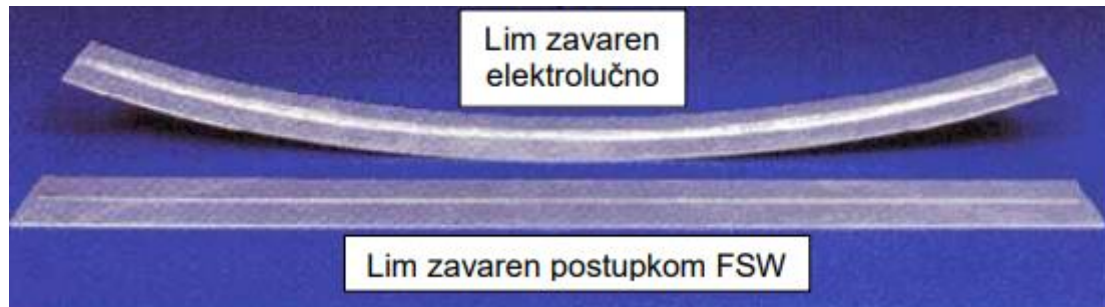
Na slici 24. prikazano je :

- a) sučeljeni spoj
- b) rubni sučeljeni spoj
- c) T – preklopni spoj
- d) preklopni spoj
- e) višestruki preklopni spoj
- f) T – spoj
- g) kutni spoj.

3.5. Prednosti i nedostaci FSW postupka

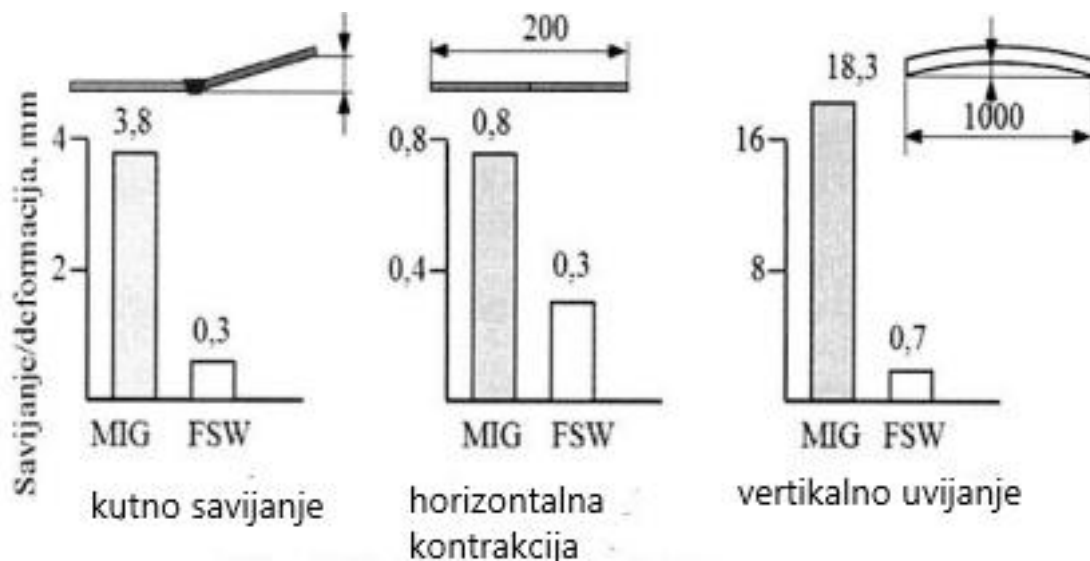
Postupak zavarivanja trenjem uz miješanje razvijen je zbog problema koji se javljaju pri zavarivanju taljenjem materijala, kao što su mogući nastanak poroznosti, pukotina, povećanja tvrdoće u zavarenom spoju. Ti problemi se najčešće javljaju kod zavarivanja aluminija i njegovih legura. Postupak se koristi kod zavarivanja limova većih debljina, dok se rjeđe koristi

za zavarivanje limova manjih debljina. U načelu, FSW postupak je našao svoju primjenu u raznim industrijama i vrlo je tolerantan na varijacije u parametrima i materijalima. Jedna od značajnih prednosti u odnosu na postupke elektrolučnog zavarivanja je ta što nema distorzije, to jest savijanje lima tijekom FSW procesa što je prikazano slikom 25. [14].



Slika 25. Savijanje limova zavarenih elektrolučno i FSW postupkom[14]

Na slici 26. nalaze se dijagrami koji pokazuju usporedbu deformacija kod FSW i MIG postupka zavarivanja.



Slika 26. Dijagrami deformacija pri FSW i MIG zavarivanju[3]

Prednosti postupka zavarivanja trenjem miješanjem u odnosu na konvencionalne elektrolučne postupke zavarivanja su;

- nije potreban dodatni materijal
- energetski najefikasniji postupak
- pouzdani zavareni spojevi
- visoka produktivnost

- jednostavan rad i mogućnost automatizacije postupka
- nije potrebna zaštitna atmosfera
- nema potrošnog materijala
- homogena sitnozrnata struktura zavarenog spoja s dobrim mehaničkim i drugim svojstvima
- minimalna skupljanja zavara i plastične deformacije
- nema isparavanja štetnih plinova
- minimalna skupljanja zavara i plastične deformacije
- nije potrebna zaštitna maska kod zavarivanja aluminijskih spojeva
- širina zavara je po dužini ravnomjerna
- zavareni spoj ne sadrži nemetalne uključke i nečistoće
- estetski lijepi izgled zavarenog spoja
- mogućnost zavarivanja u svim položajima jer nema tečenja materijala iz zavara
- mogućnost izvođenja linearnih, nelinearnih i kružnih zavarenih spojeva
- ne dolazi do distorzija spoja kao kod konvencionalnih elektro-lučnih postupaka
- velika ušteda energije i manja upotreba snage nego kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja prikazano tablicom 2.[14]
- proces zavarivanja odvija se u krutom stanju metala
- u usporedbi s laserskim zavarivanjem potrebno je 40 puta manje električne energije
- minimalna debljina ispod i iznad zavarenog spoja zbog čega se smanjuje potreba za naknadnom obradom odvajanjem čestica [3].

Tablica 2. Utrošena snaga i toplina kod različitih postupaka zavarivanja[14]

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

Uz razne prednosti i pogodnosti koje nudi FSW postupak nudi, također postoje i pojedini nedostaci postupka. Jedan od njih je pojava velikih plastičnih deformacija koje su posljedica nedovoljne temperature zavarivanja, male brzine okretanja alata ili velike brzine horizontalnog pomaka. Osim navedenog nedostatka to su još i:

- potrebna velika aksijalna sila na materijal
- rupa na kraju zavara zbog izlaza alata iz materijala
- manja fleksibilnost procesa u odnosu na elektro-lučno zavarivanje
- duže vrijeme zavarivanja od ostalih postupaka
- potrebno je kvalitetno stegnuti limove koje zavarujemo kako ne bi došlo do njihovog pomaka tijekom procesa [21].

3.6. Primjena postupka i ograničenja kod zavarivanja aluminija

Postupak zavarivanja trenjem uz miješanje primjenjiv je za zavarivanje slijedećih materijala:

- Aluminij i njegove legure:
 - serija 1XXX (komercijalno čist aluminij)
 - serija 2XXX (Al-Cu)
 - serija 3XXX (Al-Mn)
 - serija 4XXX (Al-Si)
 - serija 5XXX (Al-Mg)

- serija 6XXX (Al-Mg-Si)
- serija 7XXX (Al-Zn)
- serija 8XXX (Al-Li)

- olovo
- bakar i njegove legure
- cink
- plastika
- niskouglični čelici
- titan i njegove legure
- legure magnezija
- austenitni, martenzitni i dupleks čelici
- legure nikla [3].

Aluminij i njegove legure moguće je zavarivati u svim položajima. U slučaju jednostranog zavarivanja, debljina aluminijskog lima kreće se od 0,5 do 50 milimetara, dok se kod dvostranog zavarivanja mogu zavarivati limovi debljine čak do 75 milimetara. Kod zavarivanja čeličnih materijala, debljina lima za jednostrano zavarivanja iznosi do 25 milimetara [14].

Svoju primjenu, FSW postupak zavarivanja pronašao je u različitim granama industrije, ponajviše u brodogradnji. Postupak je u početku korišten za proizvodnju jednostavnih platformi kod brodskih hladnjaka za zamrzavanje ribe. Nakon toga je tvrtka SAPA Profiler AB razvila čitavu seriju automatiziranih strojeva za zavarivanje trenjem uz miješanje, dok je dio proizvodnje prikazan na slici 27.



Slika 27. Proizvodnja aluminijskih panela u tvornici SAPA Profiler AB[22]

Osim navedenog, FSW postupak se u brodogradnji koristi i za izradu aluminijskih panela za brodove (slika 28.), jahte i ratne brodove (slika 29.), kao i za izgradnju paluba, podova, jarbola, konstrukcije broda pa čak i kod platforma za slijetanje helikoptera [21].



Slika 28. Aluminijski paneli zavareni FSW-om na brodu X-Craft[23]



Slika 29. Korijeni ploča zavarenih FSW-om na ratnom brodu USNS 'Yuma' (T-EPF-8)[23]

Dobre karakteristike i visoka pouzdanost zavarenih spojeva dobivenih postupkom FSW je došao do izražaja u proizvodnji velikog broja različitih dijelova u zrakoplovstvu i svemirskoj industriji. Na SpaceShuttle-u nedavno su izvedeni spojevi vanjskih spremnika goriva isključivo FSW procesom. To omogućuje izradu ovih spremnika od posebnih legura Al-Li 2195, čime je njihova masa smanjena za više od tri tone. Primjer jednog takvog zavarenog spremnika goriva nalazi se na slici 30. [14].



Slika 30. Uzdužni i kružni zavareni spojevi na raketi Falcon 9 SpaceX[24]

U zrakoplovnoj industriji gotovo 40000 zakovica zamijenjeno je FSW spojevima, s tendencijom daljnjeg rasta. Budući da je FSW proces vrlo produktivan, vrijeme izrade spremnika za gorivo Delta program u tvornicama Boeinga skraćeno je s 23 na 6 dana, a smanjeni su i ukupni troškovi za 60%.[14]Prvo zavarivanje svemirske letjelice Orion (slika 31.) dovršeno je u siječnju 2021. u NASA-inom pogonu Michoud Assembly Facility [23].



Slika 31. Zavarivanje modula svemirske letjelice Orion[23]

Uz navedene industrijske grane, postupak zavarivanja trenjem uz miješanje sve veću upotrebu nalazi i u automobilske industriji. Postupak se koristi zbog potrebe za što manjim težinama vozila, čime se povećava njihova nosivost i smanjuje potrošnja goriva, dok se samim time smanjuje i emitiranje štetnih plinova i zagađenje okoliša. U automobilske industriji postupak se primjenjuje za izradu automobilske karoserije, veza s hidrauličkim cijevima, felgi, tijela kamiona, prikolice, okvira motocikala i bicikala, cisterni za gorivo i drugo [14].

Jedan od primjera je središnji tunel Forda GT (slika 32.), kojih je ukupno 4038 proizvedeno u razdoblju od 2004. do 2006., bio je zavaren FSW postupkom. Središnji tunel ovog automobila strukturna je komponenta koja povećava krutost šasije, a također se koristi kao spremnik goriva koji ne propušta paru [23].



Slika 32. Središnji tunel Forda GT [23]

U posljednje se vrijeme FSW sve više koristi i u željezničkoj industriji za proizvodnju vagona cisterni, željezničkih vagona, tijela kontejnera, kao i za zavarivanje stranica, krovova, podova vlakova i mnogih drugih elemenata koji su izrađeni od aluminijske legure [14]. Na slici 33. prikazan je karoserija brzog vlaka koji je zavaren FSW postupkom.



Slika 33. Tipična karoserija brzih vlakova izrađena od aluminijske legure [24]

Također, FSW je svoju primjenu pronašao i pri proizvodnji: kućišta elektromotora, rashladnih ploča, kuhinjske opreme, bijele tehnike, plinskih boca, namještaja i ostalog. Postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje, dobiveni su jednako dobri rezultati pri spajanju limova od bakra, cinka, magnezija i njihovih legura. Shodno tome, mnoge vrste čeličnih limova, ali i kombinacije različitih metala, kao što je titan i čelik te pojedini kompozitni materijali na bazi metalne matrice također daju veoma dobre rezultate zavarivanjem FSW-om. Aluminijski, bakarni, ugljični i niskolegirani čelici i mnogi drugi metali zavaruju se postupkom u normalnim vanjskim uvjetima. Kod zavarivanja čelika sa velikim udjelom legirajućih elemenata, savjetuje se korištenje nekog od zaštitnih plinova radi neutraliziranja štetnog utjecaja atmosfere. Limovi od niskougljičnog čelika i čelika sa 12% kroma debljine od 3 mm do 12 mm, mogu se uspješno zavarivati samo sa jedne strane. Limove debljine veće od 25 mm treba zavarivati obostrano [21].

4. PREGLED NIZA NORMI HRN EN ISO 25239

U ovom poglavlju dan je pregled niza normi HRN EN ISO 25239, te će biti izdvojeni osnovni zahtjevi za osiguranje sustava kvalitete zavarivanjem. Norma je podijeljena na 5 dijelova te će svaki biti zasebno opisan i objašnjen u nastavku rada.

4.1. HRN EN ISO 25239-1:2020, 1.dio: Tehnološki rječnik

Puni naslov ove norme glasi „Zavarivanje trenjem uz miješanje“ -- Aluminiij -- 1. dio: Terminološki rječnik. Norma je podijeljena na tri različita dijela: područje, referentni standardi i treći dio, nazive i definicije. Ovaj dokument definira pojmove koji se odnose na zavarivanje trenjem s miješanjem. U ovom dokumentu pojam „aluminiij“ odnosi se na aluminiij i njegove legure. Definirani su nazivi koji će se koristiti kod zavarivanja trenjem miješanjem. Podesiva alatna sonda je alat čija se duljina, brzina vrtnje i smjer vrtnje sonde mogu podešavati. Napredujuća strana je strana zavara gdje je smjer vrtnje alata isti kao i smjer zavarivanja. Aksijalna sila je ona koja je primijenjena na obradak duž osi rotacije alata. Vrijeme zadržavanja na kraju zavarivanja je vremenski interval nakon što je hod zaustavljen, ali prije nego što se rotirajući alat počne povlačiti iz zavara, dok je vrijeme zadržavanja na početku zavarivanja je interval između faze prodiranja i početka zavarivanja. Izlazna rupa nastaje na kraju zavara nakon izlaska alata iz materijala. Od ostalih pojmova navedeni i objašnjeni su fiksna sonda, prolazna površina, kontrola sile i deformacija spoja [25].

4.2. HRN EN ISO 25239-2:2020, 2.dio: Oblikovanje zavarenih spojeva

Puni naziv ove norme je „Zavarivanje trenjem uz miješanje“ -- Aluminiij -- 2. dio: Oblikovanje zavarenih spojeva. Norma je podijeljena na četiri različita dijela: područje, referentni standardi, nazive i definicije i projektne zahtjeve. Ovaj dokument utvrđuje projektne zahtjeve za zavarene spojeve trenjem i miješanjem. U ovom dokumentu kao i u prethodnom pojam „aluminiij“ odnosi se na aluminiij i njegove legure. Ovaj se dokument ne odnosi na točkasto zavarivanje trenjem s miješanjem koje je pokriveno serijom ISO 18785. Zavareni spoj mora biti projektiran u skladu s definiranim zahtjevima koji podržavaju krajnju upotrebu proizvoda. U dokumentaciji moraju biti definirani svi zahtjevi za zavar. Bitne procesne kontrole bit će definirane kako bi se potvrdilo da se svi projektne zahtjevi mogu ispuniti zavarima koji su proizvedeni u skladu sa specifikacijom postupka zavarivanja i zahtjevima inspekcije. Simboli zavara moraju biti u

skladu s ISO 2553. Projekt zavarenog spoja mora uzeti u obzir potrebne podatke o svojstvima materijala. Neke od vrsta zavarenih spojeva su:

- sučeljeni spoj
- sučeljeni spoj različitih debljina
- preklopni spoj
- višestruki preklopni spoj
- polupreklopni spoj
- T-spoj
- kutni spoj [26].

4.3. HRN EN ISO 25239-3:2020, 3.dio: Osposobljenost rukovatelja zavarivanja

Puni naslov ove norme glasi „Zavarivanje trenjem uz miješanje“ -- Aluminij -- 3. dio: Osposobljenost rukovatelja zavarivanja. Norma je podijeljena na pet različita dijela: područje, referentni standardi, nazive i definicije, zahtjevi i certifikat. Ovaj dokument utvrđuje zahtjeve za kvalifikaciju operatera za zavarivanje pri postupku zavarivanja trenjem s miješanjem (FSW) aluminija. U ovom dokumentu kao i u prethodnom pojam „aluminij“ odnosi se na aluminij i njegove legure. Za potrebe ovog dokumenta primjenjuju se pojmovi i definicije dani u ISO 25239-1. Operateri za zavarivanje moraju biti kvalificirani jednim od sljedećih testova:

- standardni test zavarivanja
- ispitivanje postupaka zavarivanja
- ispitivanje zavarivanja prije proizvodnje ili ispitivanje zavarivanja
- test uzorka zavarivanja [27].

Za svaku bitnu varijablu definira se niz kvalifikacija. Ako je potrebno da operater radi nešto za što nije dovoljno kvalificiran, potrebno je da odradi novi test kvalifikacije. Uspješan test kvalifikacije operatera zavarivanja obavljen bilo kojom vrstom FSW metode kvalificira operatera samo za tu metodu zavarivanja. Ovo se odnosi na FSW metode koje uključuju, ali nisu ograničene na, robotske metode, metode s jednim vretenom, više vretena, alat s bobinom, podesivu sondu alata ili bilo koju drugu FSW metodu definiranu u specifikacijama postupaka zavarivanja koji se koristi za taj kvalifikacijski test. Zahtjevi su postavljeni i na osnovni materijal, opremu za zavarivanje, geometriju zavarenog spoja i razinu prihvatanja kvalitete.

Ispitni zavari moraju se izvesti u skladu sa specifikacijama postupaka zavarivanja, osim u slučaju ispitivanja postupaka zavarivanja ili ispitivanja zavarivanja prije proizvodnje ili ispitivanje zavarivanja. Zavarivanju i ispitivanju ispitnih komada svjedoči ispitivač. Ispitni zavari koji se koriste za kvalifikaciju zavarivača moraju imati duljinu od najmanje 500 mm. Ako se kvalifikacija temelji na pretproizvodnim ispitivanjima, proizvodnim ispitivanjima ili ispitivanjima proizvodnih uzoraka, a korišteni proizvod ima duljinu zavara kraću od 500 mm, tada broj ispitanih proizvoda mora biti takav da je zadovoljena zahtijevana duljina zavara. Međutim, ne smiju se testirati više od tri proizvoda. Ispitni komad i ispitni uzorci moraju biti označeni oznakom ispitivača ili ispitnog tijela i zavarivača prije početka zavarivanja. Ispitivač može prekinuti ispitivanje ako uvjeti zavarivanja nisu ispravni ili ako se čini da operater zavarivanja nema vještinu da ispuni zahtjeve ovog dijela ISO 25239. Razine prihvatljivosti za ispitne zavare moraju biti iste kao one koje se koriste za kvalifikaciju specifikacije postupaka zavarivanja. Moraju se provesti najmanje sljedeća ispitivanja:

- vizualno ispitivanje 100%
- makroskopski pregled
- testovi savijanja.

Rezultati svih ispitivanja se dokumentiraju, a o obliku dokumentacije odlučuje proizvođač. Mora se potvrditi da je zavarivač položio kvalifikacijski ispit. Sve bitne varijable moraju biti zabilježene na potvrdi. Ako ispitni uzorci ne zadovolje bilo koje od potrebnih ispitivanja, neće se izdati potvrda. Potvrda o osposobljenosti za polaganje ispita za zavarivača vrijedi 3 godine, a rok valjanosti završava zadnjeg dana u mjesecu [27].

4.4. HRN EN ISO 25239-4:2020, 4.dio: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja

Puni naslov ove norme je „Zavarivanje trenjem uz miješanje“ -- Aluminijski -- 4. dio: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja. Norma je podijeljena na šest različitih dijelova: područje, referentni standardi, simboli i skraćeni pojmovi, razvoj i kvalifikacija postupaka zavarivanja i kvalifikacija temeljena ispitivanjem postupaka zavarivanja. Ovaj dio norme ISO 25239 utvrđuje zahtjeve za specifikaciju i kvalifikaciju postupaka zavarivanja za zavarivanje trenjem s miješanjem (FSW) aluminijski. U ovom dijelu ISO 25239 pojam "aluminijski" odnosi se na aluminijski i njegove legure. Ovaj dio ISO 25239 ne odnosi se na točkasto zavarivanje trenjem i

miješanjem. Kvalifikacija postupaka zavarivanja mora se provesti prije proizvodnog zavarivanja. Proizvođač mora pripremiti preliminarnu specifikaciju postupka zavarivanja i osigurati da ona primjenjiva je u proizvodnji koristeći iskustvo iz prethodnih proizvodnih poslova i opći fond znanja tehnologije zavarivanja. Sljedeće informacije, kao minimum, moraju biti uključene u preliminarnu specifikaciju postupka zavarivanja:

- podatke o proizvođaču
- vrstu, karakteristike i referentne standarde osnovnog materijala
- dimenzije osnovnog materijala
- identifikaciju alata i opreme
- raspored stezanja
- oblik spoja
- pripremu spoja i metode čišćenja
- brzinu i poziciju zavarivanja
- toplinsku obradu prije zavarivanja
- temperaturu predgrijavanja
- zaštitni plin
- obradu nakon zavarivanja [28].

4.5. HRN EN ISO 25239-5:2020, 5.dio: Zahtjevi za kvalitetu i inspekciju

Puni naslov ove norme glasi „Zavarivanje trenjem uz miješanje“ -- Aluminijski -- 5. dio: Zahtjevi za kvalitetu i inspekciju. Norma je podijeljena na četiri različita dijela: područje, referentni standardi, nazive i definicije, zahtjevi za kvalitetu. Ovaj dokument specificira metodu za određivanje sposobnosti proizvođača da koristi postupak zavarivanja trenjem s miješanjem (FSW) za proizvodnju proizvoda specificirane kvalitete. Određuje zahtjeve kvalitete, ali te zahtjeve ne dodjeljuje niti jednoj specifičnoj skupini proizvoda. U ovom dokumentu kao i u prethodnom pojam „aluminijski“ odnosi se na aluminijski i njegove legure. Ovaj se dokument ne odnosi na točkasto zavarivanje trenjem s miješanjem koje je pokriveno serijom ISO 18785. Za potrebe ovog dokumenta primjenjuju se pojmovi i definicije dani u ISO 25239-1 i ISO/TR 25901 (svi dijelovi). Zahtjevi za kvalitetom se odnose samo na one aspekte kvalitete proizvoda na koje može utjecati FSW postupak. Proizvođači moraju imati na raspolaganju dovoljno

kompetentnog osoblja za planiranje, izvođenje te nadzor proizvodnje FSW-a u skladu sa zadanim zahtjevima. Operateri za zavarivanje moraju biti kvalificirani u skladu s ISO 25239-3. Zapisi o kvalifikacijama trebali bi biti ažurirani. Ispitivanje zavara bez razaranja (uključujući vizualno ispitivanje) i završno vrednovanje rezultata prihvat mora obaviti kvalificirano i sposobno osoblje. Preporuča se da se osoblje bude kvalificirano u skladu s ISO 9712 ili ekvivalentnim standardom na odgovarajućoj razini relevantni industrijski sektor. Osoblje koje provodi razorna ispitivanja mora biti osposobljeno za te metode ispitivanja. Proizvođač mora imati dokumentirani plan održavanja opreme. Plan osigurava da se provjere održavanja provode na opremi koja kontrolira varijable navedene u relevantnom specifikacijom postupaka zavarivanja. Plan održavanja može biti ograničen na one stavke koje su bitne za izradu zavara zadovoljiti zahtjeve kvalitete ovog dokumenta. Prije zavarivanja, stezaljke, šablone koje dolaze u dodir s radnim komadima moraju biti čisti i dovoljno bez uključaka (npr. ulja, masti i prljavštine) koji mogu imati štetan učinak na zavareni spoj. Neispravna oprema se ne smije koristiti. Mjesto i učestalost primjenjivih inspekcija i ispitivanja ovisi o standardu proizvoda i tipu konstrukcije. Prije početka zavarivanja potrebno je provjeriti sljedeće:

- prikladnost i valjanost potvrde o osposobljenosti zavarivača
- prikladnost specifikacije postupaka zavarivanja
- pripremu spoja
- predgrijavanje i međuprolaznu temperaturu.[29]

Nakon zavarivanja mora biti usklađenost s relevantnim standardima primjene ili relevantnim zahtjevima potvrđen odabirom iz sljedećih testova:

- vizualni test
- nerazorna ispitivanja
- razorna ispitivanja
- oblik, izgled i dimenzija zavara
- rezultati i zapisi postupaka nakon zavarivanja (npr. toplinska obrada nakon zavarivanja, starenje).

Vizualno ispitivanje provodi se u skladu s ISO 17637. Ispitivanje penetrantima provodi se u skladu s ISO 3452-1. Radiografsko ispitivanje provodi se u skladu s ISO 17636 (svi dijelovi). Ultrazvučno ispitivanje može se koristiti umjesto radiografskog ispitivanja kada je to navedeno u specifikaciji dizajna ili relevantnim zahtjevima. Kada je potrebno radiografsko ispitivanje

preklopnih spojeva ili sučeljenih zavara s djelomičnim prodiranjem, projektna specifikacija mora odrediti razine prihvatljivosti. Ultrazvučni pregled provodi se u skladu s normom ISO 17640. Kad se koristi ultrazvučni pregled pri uranjanju ili ultrazvučni pregled s fazama, odgovarajući zahtjevi određuju primjenjive norme ili zahtjeve.[29]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Opis eksperimentalnog dijela

U laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu provedena su ispitivanja. Cilj ispitivanja bio je ustanoviti kvalitetu zavarenih spojeva sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 25239. U eksperimentalnom dijelu, na uzorku kojeg je postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje proizvela tvrtka LTH Castings d.o.o, Slovenija, provedena su ispitivanja kako bi se ocijenili zahtjevi za procjenom kvalitete zavarenih spojeva. Dobiveni uzorak podvrgnut je vizualnoj analizi, ispitivanju penetrantima, radiografsko ispitivanje i analizi makrostrukture.

5.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u ovom eksperimentu je aluminijska legura EN AC 44300 (AlSi12,Al230). Eutektička legura s izvrsnim svojstvima lijevanja, izvrsnom fluidnošću i velikom otpornošću na vruće trganje. Ima dobru obradivost kao i visoku kemijsku otpornost. Kemijski sastav aluminijske legure prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav legure Al230

ELEMENT	MASENI UDIO
Si	10,5 do 13,5
Fe	1,0 (0,45 do 0,9)
Cu	0,10 (0,08)
Mn	0,55
Zn	0,15
Ti	0,15

Mehanička svojstva osnovnog materijala prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Mehanička svojstva aluminijeve legure EN AC 44300

Vlačna čvrstoća R_m , MPa, min.	Granica razvlačenja R_e , MPa, min.	Istezanje A_{50} , %, min.	Tvrdoća po Brinellu HBS, min.
240	130	1	60

Na slikama 34. i 35. može se uočiti proizvod dobiven FSW postupkom zavarivanja koji je zavaren od strane tvrtke LTH Castings d.o.o za vrijeme obavljanje stručne prakse.

**Slika 34. Obradak aluminijske legure**



Slika 35. Bočni pogled obratka aluminijske legure AlSi12

Na slici 36. strelicama su označena mjesta na kojima se nalaze zavareni spojevi.



Slika 36. FSW zavareni spojevi na obratku

U nastavku rada opisana su ispitivanja koja su provedena na uzorku.

5.3. Ispitivanje penetrantima

Nerazorno ispitivanje provedeno je uz pomoć penetranta. Ispitivanje penetrantima provodi se u skladu s ISO 3452-1. Ispitivanje penetrantima je jedna od najraširenijih metoda nerazornih ispitivanja koja se koristi za otkrivanje pukotina i diskontinuiteta na površinama čvrstih neporoznih tijela, prvenstveno metala. Koriste se tri tekuća sredstva: penetrant, odstranjivač i razvijlač (slika 37.). Ispitivanje penetrantima se provodi u nekoliko koraka:

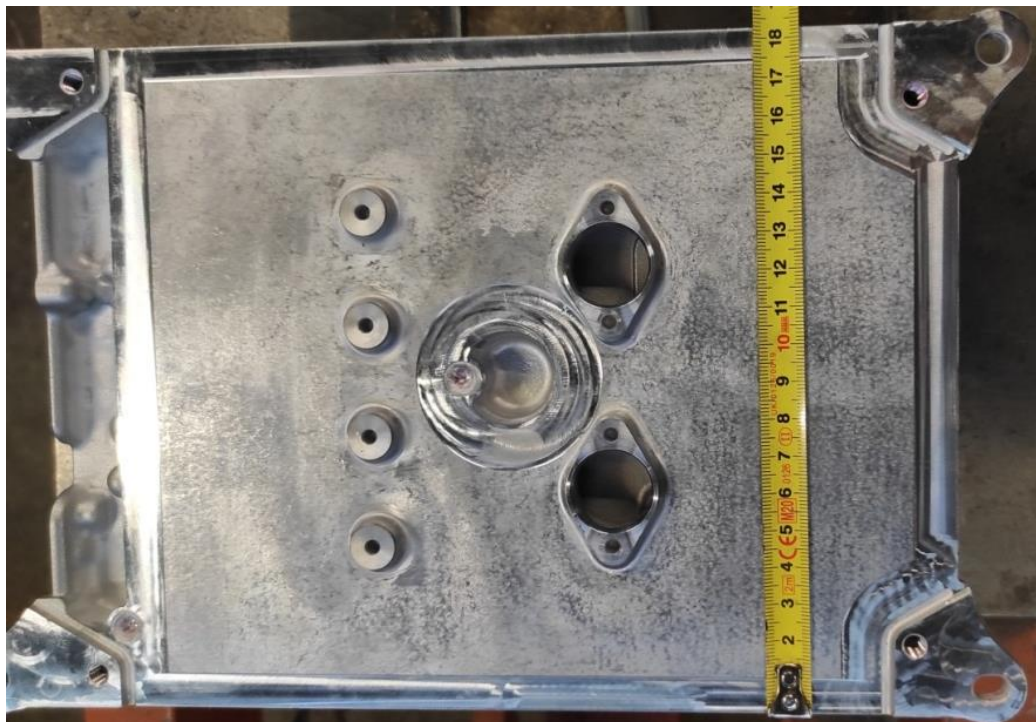
- Čišćenje i odmašćivanje površine;
- Nanošenje penetranta
- Odstranjivanje viška penetranta
- Nanošenje razvijlača
- Pregled, odnosno traženje indikacija.

Prema normi ISO 3452-1 prije ispitivanja penetrantima površina koja se pregledava mora se očistiti i osušiti. Prikladni penetranti se zatim nanose na ispitno područje i ulaze u diskontinuitete otvorene prema površini. Nakon što je odgovarajućeg vrijeme penetracije isteklo, višak penetranta se uklanja s površine te se nanosi razvijlač. Razvijlač upija penetrant koji je ušao i ostaje u diskontinuitetima i može dati jasno vidljivu pojačanu indikaciju diskontinuiteta.



Slika 37. Penetrant, odstranjivač, razvijач korišteni u eksperimentu

Primarno se površina uzorka očistila i odmastila što je prikazano slikom 38. Nakon toga je na površinu uzorka nanesen penetrant koji je ostavljen 15 minuta kako bi imao dovoljno vremena za penetraciju (slika 39.).



Slika 38. Uzorak nakon čišćenja površine



Slika 39. Uzorak poprskan penetrantom

Nakon penetriranja, penetrant je uklonjen s površine. Željeni rezultat je da površina bude potpuno čista od suviška penetranta, ali da se penetrant iz pukotina ne ukloni. Pretjerano čišćenje može ukloniti penetrant iz volumena pukotina, pa je moguće da ga razvijajč ne dosegne, što za posljedicu ima izostanak indikacije. Nakon odstranjivanja viška penetranta, na ispitnu

površinu se nanio porozni, tanki sloj razvijaača kako bi izvukao penetrant iz pukotina na površinu i na taj način povećao vidljivost indikacije. Razvijaač je bio ostavljen 20 minuta kako bi izreagirao s penetrantom preostalim u pukotinama ili porama. Nakon 20 minuta, izvršeno je promatranje površine obratka. Na slikama 40. I 41. nalaze se prikazi uzorka nakon reakcije razvijaača.



Slika 40. Zavar nakon ispitivanja penetrantom



Slika 41. Zavareni spoj prilikom reakcije razvijaača

Na slici 40. mogu se primijetiti ostaci penetranta, dok se na slici 41. ne vidi gotovo nikakav indikator za pukotine ili pore. Naknadno je površina na kojoj su se pojavile indikacije obrađena u programu ImageJ te je uvećana za 300%, a nalazi se na slici 42.



Slika 42. Površina na kojoj su vidljive indikacije u programu ImageJ

Prema normi se mjeri duljina linearnih indikacija, a ne stvarna duljina pronađenih linearnih indikacija. Pošto se na cijelom uzorku nisu pronašle nikakve indikacije, osim ove prikazane na slici 42. čija duljina linearne indikacije zadovoljava zahtjeve za kvalitetom, dolazi se do zaključka da zavareni spoj uzorka zadovoljava zahtjeve kvalitete prema normi ISO 3452-1.

5.4. Radiografsko ispitivanje

Radiografska kontrola ili ispitivanje prozračivanjem, metode su radijacijske kontrole koje omogućavaju kvalitativno i kvantitativno praćenje nepravilnosti u strukturi ili kroz presjek ispitnog objekta. Gotovo sve radijacijske metode informacije o ispitnom objektu dobivaju prozračivanjem objekta odgovarajućim ionizirajućim zračenjem. Za potrebe ovog ispitivanja korišteni su slijedeći parametri snimanja:

- napon - 125 kV
- struja - 3 mA
- film fokus udaljenost - 700 mm
- vrijeme – 75 s.

Također koristili su se i slijedeći parametri skeniranja:

- napon lasera - 15 V
- napon fotomultiplikatora - 5.25 V
- rezolucija skeniranja - 50 um.

Što se tiče opreme, korišteni su :

- RTG uređaj - Balteau 300 D (slika 43.)
- skener - VMI 5100
- slikovna ploča - Kodak industreflex Blue.

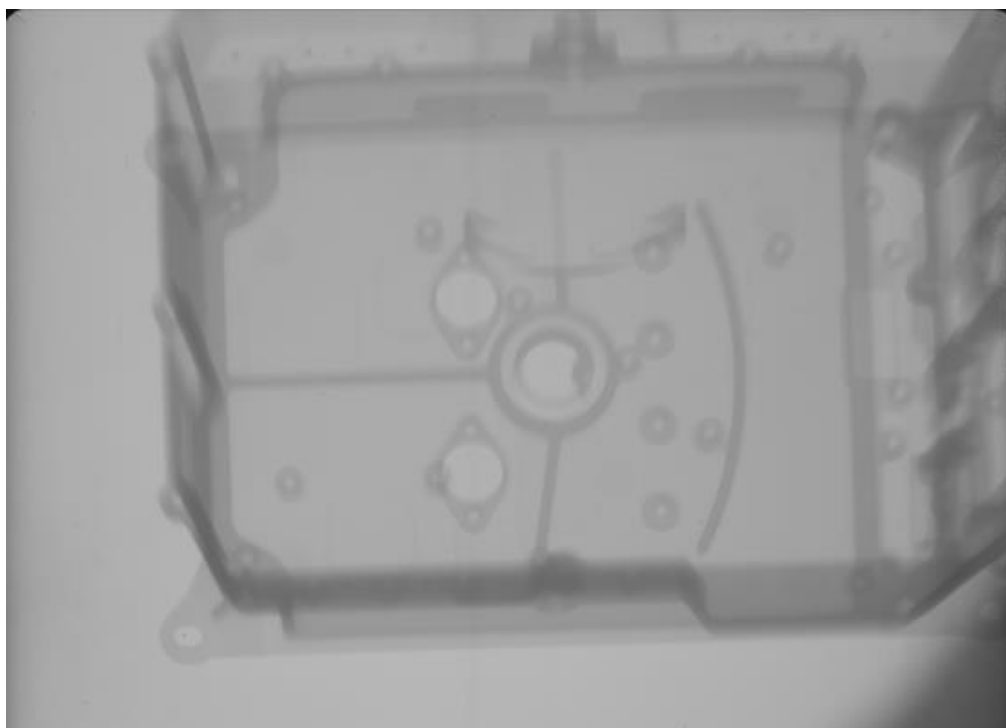


Slika 43. Postupak radiografskog ispitivanja pomoću RTG uređaja Balteau 300D

Nakon toga, dobiveni su se radiogrami koji ne ukazuju na nikakve značajne pogreške, što znači da zavar zadovoljava zahtjeve kvalitete i ovim ispitivanjem. Radiogrami se nalaze na slikama 44. i 45.



Slika 44. Radiogram tlocrta uzorka



Slika 45. Radiogram uzorka nagnutog pod kutom

Detaljnom analizom radiograma, nisu se pronašle greške, niti pukotine na zavarima, što znači da su zahtjevi za kvalitetom postavljeni normom HRN EN ISO 25239-5 zadovoljeni po pitanju radiološkog testa.

5.5. Vizualni test

Vizualna kontrola je prva metoda kontrole bez razaranja koju je čovjek instinktivno primjenjivao odavno. Vizualno ispitivanje provodi se u skladu s normom ISO 17637. To je najjednostavnija i osnovna metoda, metoda koja uvijek prethodi ostalim metodama bez razaranja. Vizualna kontrola znatno ovisi o stanju i pripremi površine, te mogućnosti prijenosa informacija s površine, ova metoda povećava svoju učinkovitost ako su poznata očekivana odstupanja ili vrsta i svojstva očekivanih pogrešaka. Za pravilni pregled ravne površine, površina mora biti osvijetljena svjetlošću minimalne jakosti 350 lx-a. Međutim za kvalitetan pregled ipak se preporuča osvijetljenje od 500 lx. Za izravan pregled površine, površina koja se kontrolira mora biti na udaljenosti unutar 600 mm od oka. Isto tako kut promatranja same površine ne smije biti manji od 30°. Sam postupak inspekcije pomoću povećala, boroskopa ili nekih drugih kamera, te upotreba dodatnog osvijetljenja upotrebljava se kada nije moguće izvršiti inspekciju golim okom navedenim postupkom. Kada nam vizualna kontrola ne daje jasne pokazatelje ispravnosti ili u drugu ruku neispravnosti zavarenog spoja, tada se primjenjuju neke nerazorne metode ispitivanja. Za vizualnu kontrolu korišten je videoskop Mitcorp X750 (slika 46.).

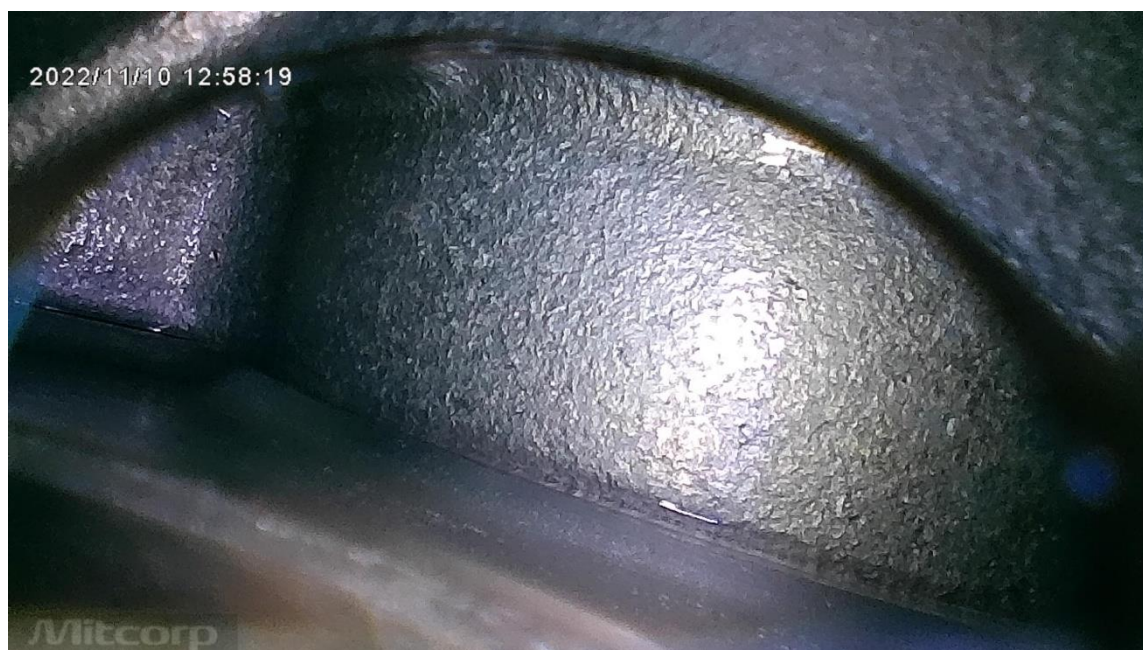


Slika 46. Videoskop Mitcorp X750[26]

Vizualnom kontrolom prikazanom slikom 47. nisu utvrđene nikakve značajne nepravilnosti ni greške nastale prilikom zavarivanja. Slika 48. dobivena je videoskopom i prikazuje zavar.



Slika 47. Vizualna kontrola pomoću videoscopa Mitcorp X750

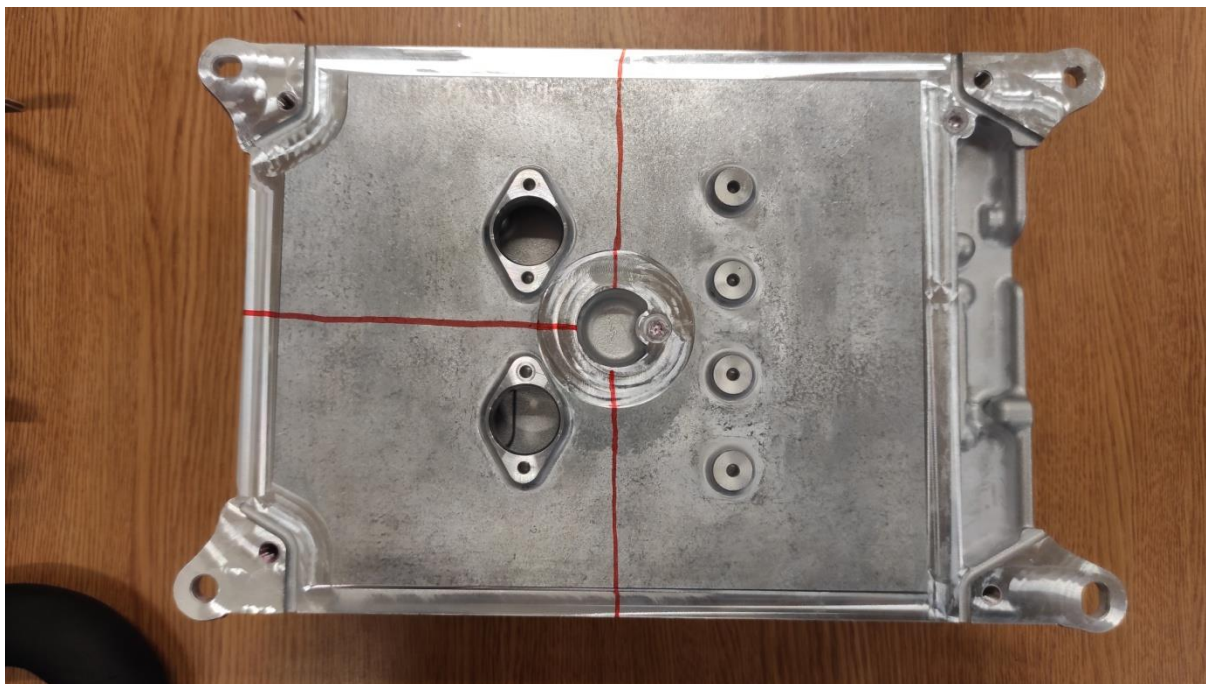


Slika 48. Slika zavara pomoću videoscopa

Kako vizualnom kontrolom zavarenih spojeva nisu pronađene nikakve uključine, pukotine, pogreške u obliku i dimenzijama zavarenog spoja, dolazi se do zaključka kako zavareni spoj zadovoljava zahtjeve za kvalitetom u skladu s normom ISO 17637.

5.6. Izrezivanje uzoraka, priprema i makrostrukturalna analiza

Nakon obavljenih ispitivanja slijedi izrezivanje makrouzoraka. Na slici 49. Označeni su presjeci iz kojih su uzorci tračnom pilom izrezani.



Slika 49. Presjeci za rezanje makrouzoraka

Nakon rezanja obratka, dobiveno je 4 različita makrouzorka koji su naknadno brušeni i polirani. Makroizbrusci se ručno bruse na brusnim papirima grubosti P80, P150, P240, P280. Brusi se strana prema sredini zavora. Na slici 50. prikazani su makrouzorci nakon ručnog brušenja koji su spremni za poliranje.

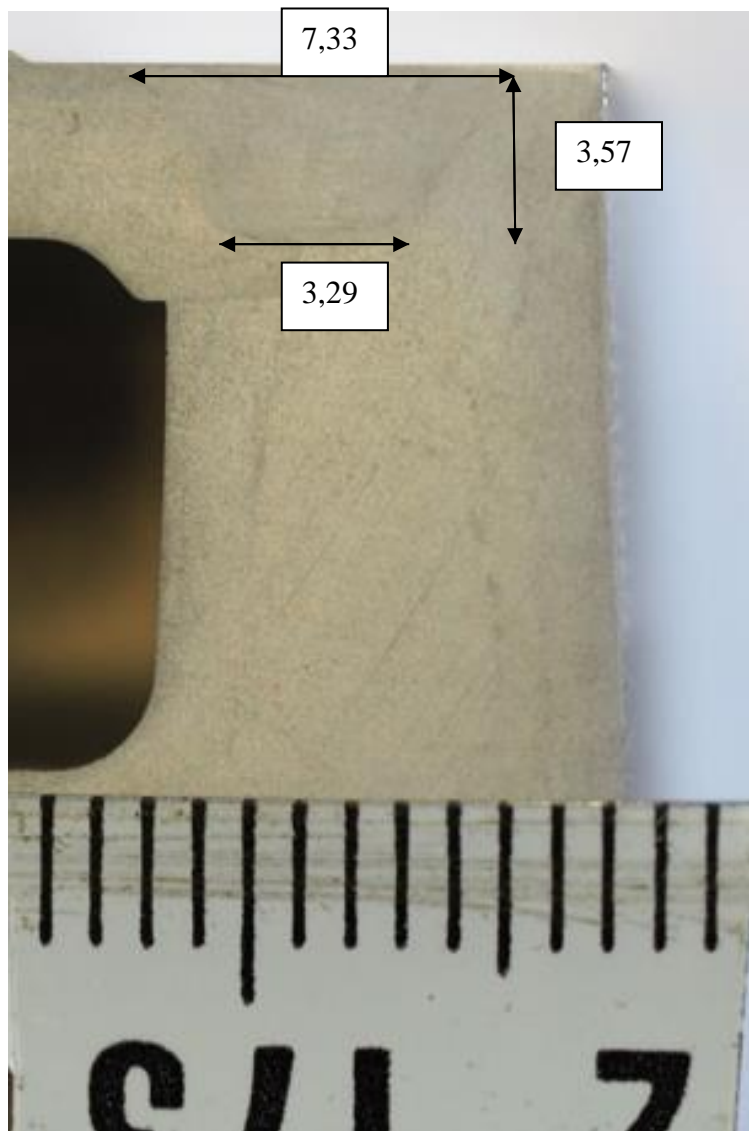


Slika 50. Makrouzorci nakon ručnog brušenja

Nakon finog ručnog brušenja, uzorci su se fino ispolirali, te su polirani makrouzorci fotografirani. Zatim je napravljena makroanaliza. Na slikama 51.-54. prikazani su makrouzorci s mjerkom nakon poliranja.



Slika 51. Makrouzorak 1



Slika 52. Makrouzorak 2



Slika 53. Makrouzorak 3



Slika 54. Makrouzorak 4

Analizom makrostrukture uzorka nisu uočene nepravilnosti poput šupljina i pora, uključaka troske ili naljepljivanja. Iz toga se dolazi do zaključka da zavar zadovoljava zahtjeve za kvalitetom prema normi HRN EN ISO 25239-5.

6. ZAKLJUČAK

Postupak zavarivanja trenjem uz miješanje svoju je primjenu pronašao u industrijama poput automobilske, zrakoplovne, svemirske, željezničke i brodogradnje. Najčešće se koristi za zavarivanje aluminijske i njegovih legura. Glavni razlozi primjene postupka su vrlo jednostavna automatizacija i jako visoka produktivnost postupka, kao i to što nema potrebe za dodatnim materijalom kao i zaštitnim plinom. Također, FSW postupak omogućuje zavarivanje aluminijske u svim položajima što je zahtjevno i teško konvencionalnim postupcima. Težnja za boljom iskoristivošću procesa, povećanjem kvalitete proizvoda, smanjenjem dodatnog i potrošnog materijala izrade i slično, potakla je veći interes te ulaganja u istraživanja i razvoj tehnologija poput FSW tehnologije. Interpretirane su i norme HRN EN ISO 25239 te navedeni zahtjevi norme za kvalitetom zavarenih spojeva načinjenih postupkom.

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada obrađena su ispitivanja s svrhom utvrđivanja kvalitete zavarenih spojeva na obratku kojeg je izradila tvrtka LTH Castings d.o.o. Obradak je izrađen od aluminijske legure AlSi12. Prema zahtjevima norme HRN EN ISO 25239-5 s ciljem procjene zahtjeva za kvalitetom, provedena su različita ispitivanja: ispitivanje penetrantima, radiografsko ispitivanje, vizualni test i makrostrukturalna analiza.

Ispitivanje penetrantom nije pokazalo nikakve greške, nepravilnosti površine ili slično. Također, vizualnim testom i radiografskim ispitivanjem nisu pronađene nikakve greške ni nepravilnosti kod zavarenih spojeva. Nakon izrezivanja makrouzoraka, brušenja i poliranja uzoraka, izvršena je analiza makrostrukture. Analizom makrostrukture nisu uočene nepravilnosti poput šupljina, pora, uključaka troske ili naljepljivanja.

Iz svih tih ispitivanja i analiza dolazi se do zaključka da zavareni spojevi zadovoljavaju zahtjeve za kvalitetom prema normi HRN EN ISO 25239-5. Prijedlog za daljnja istraživanja bi bio ispitivanje primjene postupka za zavarivanje materijala većih tvrdoća, kao i za zavarivanje većih debljina osnovnog materijala.

LITERATURA

- [1] "Povijest zavarivanja", Dr.sc. Ivan Samardžić, izv. prof., Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012.
- [2] <https://www.caranddriver.com/features/a15115566/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept/>, Pristupljeno: 22-09-15
- [3] D.Bajić: Postupci zavarivanja, Univerzitetski udžbenik, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014.
- [4] D. Bajić, S. Miljanić: ZAVARIVANJE LEGURE ALUMINIJUMA 5086 FSW POSTUPKOM, 2015.
- [5] R. S. Mishra: 1. Introduction, Friction Stir Welding and Processing, urednici R.S. Mishra, M. W. Mahoney, ASM International, Ohio, USA, 2007
- [6] https://upwikihir.top/wiki/Friction_stir_welding#google_vignette, Pristupljeno: 22-09-15
- [7] www.lthcastings.com, Pristupljeno: 22-09-15
- [8] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/nz-fabricators-begin-to-use-friction-stir-welding-to-produce-aluminium-components-and-panels-august-2006>, 22-09-17
- [9] D. Trimble, J. Monaghan, G. E. O'Donnell: Force generation during friction stir welding of AA2024-T3, CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, str. 9 – 12, 2012.
- [10] V. Balasubramanian: Relationship between metal properties and friction stir welding process parameters, Materials Science and Engineering A 480, 397 – 403, 2008.
- [11] M. Bušić: Zavarivanje trenjem aluminijskih sendvič panela rotirajućim alatom, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [12] N. Mendes, P. Neto, A. Loureiro : Machines and control systems for friction stir welding: A review
- [13] R. S. Mishra, Z. Y. Ma: Friction stir welding and processing, Materials Science and engineering R, Vol. 50, str. 1-78, 2005
- [14] D. Stamenković, M. Đurđanović, D. Mitić: Zavarivanje postupkom "FSW"
- [15] H. S. Patil, S. N. Soman: Effect of weld parameters on mechanical and metallurgical properties of dissimilar joints AA6082-AA6061 in T6 condition produced by FSW, Frattura ed Integrità Strutturale 24, str. 151 – 160, 2013.

- [16] R. Ranjith, B. Senthil Kumar: Joining of dissimilar aluminium alloys AA 2014 T651 and AA6063 T651 by friction stir welding process, WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, Vol. 9, str. 179 – 186, 2014.
- [17] https://www.aint.com/solutions/friction_stir_welding, Pristupljeno: 22-11-10
- [18] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara: Review of tools for friction stir welding and processing, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 51 (3), str. 250-261, 2012.
- [19] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=190>, Pristupljeno: 22-11-11
- [20] https://www.researchgate.net/figure/Flared-Triflute-Tool-Options-A-Neutral-Flutes-b-Left-Hand-Flutes-c-Right-Hand_fig3_265427115, Pristupljeno: 22-11-13
- [21] A. Gorički: Pomično zavarivanje trenje, Završni rad, Sveučilište Sjever, 2016.
- [22] <https://www.alcircle.com/news/sapa-invests-in-machinery-to-produce-super-large-light-panels-for-offshore-marine-industry-25871>, Pristupljeno: 22-11-13
- [23] <https://www.alustir.com/>, Pristupljeno: 22-11-13
- [24] <https://www.intechopen.com/chapters/75650>, Pristupljeno: 22-11-14
- [25] HRN EN ISO 25239-1:2020, 1.dio: Tehnološki rječnik
- [26] HRN EN ISO 25239-2:2020, 2.dio: Oblikovanje zavarenih spojeva
- [27] HRN EN ISO 25239-3:2020, 3.dio: Osposobljenost rukovatelja zavarivanja
- [28] HRN EN ISO 25239-4:2020, 4.dio: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja
- [29] HRN EN ISO 25239-5:2020, 5.dio: Zahtjevi za kvalitetu i inspekciju
- [30] ISO 3452-1
- [31] <https://www.mitcorp.com.tw/product/x750-hd-industrial-videoscope/>, Pristupljeno: 22-11-15