Optimalizacija parametara zavarivanja trenjem Al-Cu spojeva

Stefanović, Luka

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:235:657065

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Stefanović

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing. Luka Stefanović

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, prof. dr. sc. Ivici Garašiću i dr. sc. Maji Jurici na pruženoj pomoći u obliku savjetovanja i usmjeravanja prilikom izrade diplomskog rada. Također, veliko hvala tvrtki Metal Product d.o.o. i svom njenom osoblju na čelu s voditeljem pogona g. Jozefom Tunićem što je pristala na suradnju sa mnom i dopustila korištenje njenih strojeva u svrhu izvođenja eksperimentalnog dijela diplomskog rada. Zahvaljujem se i svojim prijateljima i djevojci Dorotei na pruženoj emocionalnoj podršci tokom svih godina studija. Naposlijetku se zahvaljujem svojoj obitelji na potpori koju su suptilno iskazali svojim strpljenjem. Za kraj, želim reći jedno posebno Hvala svome djedu koji je diplomirao na FSB-u i po čijem uzoru sam i ja upisao ovaj fakultet te je ovaj diplomski rad svojevrsna posveta njemu.

Luka Stefanović

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: **LUKA STEFANOVIĆ** Mat. br.: 0035207139

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimalizacija parametara zavarivanja trenjem Al-Cu spojeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of friction welding parameters of Al-Cu joints**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada detaljno opisati i analizirati postupke zavarivanja trenjem. Navesti glavne parametre zavarivanja i proučiti njihov utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Specificirati za koje kombinacije osnovnih materijala je postupak primjenjiv i koja su ograničenja kod zavarivanja aluminija i bakra. Navesti pregled proizvoda iz industrijske prakse kod kojih se djelomično ili u cijelosti primjenjuje zavarivanje trenjem.
U eksperimentalnom dijelu rada analizirati zahtjeve na kvalitetu Al-Cu spojeva u proizvodnji kabelskog spojnog pribora različitih promjera. Posebno kvantificirati parametre zavarivanja te navesti posljedične nepravilnosti koje se mogu pojaviti u serijskoj proizvodnji. Uz parametre zavarivanja, analizirati i zahtjeve na osnovni materijal i pripremu. Na uzorcima iz proizvodnje provesti odgovarajuća ispitivanja te ustanoviti moguće uzroke pojave nepravilnosti. Zaključno, dati preporuke za poboljšanje tehnologije pri zavarivanju kabelskog spojnog pribora.

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

Zadatak zadan: 29. rujna 2022.

Rok predaje rada: 1. prosinca 2022.

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

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. INDUSTRIJSKA PRIMJENA ZAVARIVANJA TRENJEM 3
2.1. Materijali pogodni za zavarivanje trenjem 3
2.2. Pregled proizvoda zavarenih trenjem 5
3. POSTUPCI ZAVARIVANJA TRENJEM 8
3.1. Linearno zavarivanje trenjem 8
3.1.1. Morfologija istisnutog materijala 12
3.1.2. Uklanjanje nečistoća iz međusloja 12
3.2. Rotacijsko zavarivanje trenjem 14
3.3. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom 15
3.3.1. Geometrija alata 16
3.3.2. Temperaturna distribucija 20
3.3.3. Struktura zavara proizvedenog ZTRA postupkom 24
3.4. Navarivanje trenjem 28
3.4.1. Mikrostruktura u postupku navarivanja trenjem 32
3.4.2. Parametri navarivanja trenjem 33
4. ZAVARIVANJE TRENJEM AL-CU SPOJEVA 37
4.1. Parametri zavarivanja RZT postupka 37
4.1.1. Vrijeme zavarivanja 37
4.1.2. Brzina vrtnje 39
4.1.3. Tlak 41
4.2. Difuzija intermetalnih spojeva u Al-Cu spojevima nastala RZT postupkom 42
4.2.1. Opis pokusa 42
4.2.2. Rezultati i analiza 43
5. EKSPERIMENTALNI RAD 46
5.1. Izrada uzoraka 46
5.2. Opis eksperimenta 49
5.3. Izrada uzoraka 50
5.4. Rezultati ispitivanja 55
6. ZAKLJUČAK 62
LITERATURA 64
PRILOZI 66

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer kabelske spojne opreme Al-Cu spoja zavarenog trenjem 5
Slika 2. Turbina od Ti-6Al-4V proizvedena zavarivanjem trenjem a), turbina izrađena konvencionalnim metodama b), turbina zavarena LZT-om c) 6
Slika 3. 3 barijere za zbrinjavanje nuklearnog otpada 6
Slika 4. ZTRA postupak za izradu Cu spremnika i ilustracija postupka 7
Slika 5. Skupine proizvoda napravljenih zavarivanjem trenjem 7
Slika 6. (a) Shematski prikaz LZT-a, (b) Zavar legure Ti-6Al-4V na kojem je vidljiv istisnut materijal 9
Slika 7. (a) Komponenta iz zrakoplovne industrije obrađena isključivo strojnom obradom, (b) Komponenta titanove legure izrađena kombinacijom strojne obrade i LZT-a 10
Slika 8. Shematski prikaz LZT postupka 11
Slika 9. Naborana i glatka morfologija istisnutog materijala LZT postupka 12
Slika 10. Kretanje nečistoća izvan zavara uslijed LZT postupka 13
Slika 11. Postupak rotacijskog zavarivanja trenjem 14
Slika 12. Shematski prikaz zavarivanja trenjem rotirajućim alatom 15
Slika 13. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom 16
Slika 14. Shematski crtež alata za postupak ZTRA 17
Slika 15. Alat Whorl^{TM} za ZTRA razvijen na Institutu za zavarivanje, UK 17
Slika 16. Flared-Triflute^{TM} alat s proširenim vrhom i izraženijim žlijebovima 19
Slika 17. A-skew^{TM} alat s nagnutom osi trna alata u odnosu na os glavnog pogonskog vretena glodala 19
Slika 18. Temperaturna distribucija unutar 7075Al-T651 tokom ZTRA postupka 21
Slika 19. Ovisnost temperature i brzine vrtnje glodala na različitim duljinama od trna alata 21
Slika 20. Efekt omjera brzine vrtnje i translacijske brzine na temperaturu zavara 22
Slika 21. Tipično formiranje različitih zona na poprečnom presjeku zavarenog spoja 25
Slika 22. Tok materijala i karakteristična zona (OZ) ZTRA postupka 26
Slika 23. Al-Cu binarni fazni dijagram 27
Slika 24. Mikrostruktura Al strane postignuta različitim geometrijama alata: a) - Alat bez obilježja, b) – Trn s navojem, c) – Trn s navojem i žlijebovima, d) Mikrostruktura u neposrednoj blizini „ključanice“ zavara 27

Slika 25. Mikrostruktura Al i Cu spoja s prikazanim vrtložnim slojem intermetalnih spojeva 28
Slika 26. Postupak navarivanja trenjem aluminijske legure 29
Slika 27. Ilustracija nanošenja dodatnog materijala navarivanjem trenjem na osnovni materijal 30
Slika 28. Poprečni presjek navara austenitnog nehrđajućeg čelika EN 1.4401 nanešenog preko osnovnog materijala feritnog čelika 31
Slika 29. Razlika u mikrostrukturi navarenog čelika prije (a) i poslije (b) navarivanja 32
Slika 30. Profil tvrdoće nakon navarivanja trenjem 33
Slika 31. Efekt aksijalne sile na kvalitetu spoja navarenog čelika korištenjem glodala promjera 10 mm 34
Slika 32. Efekt brzine vrtnje na hrapavost i širinu navara 35
Slika 33. Ovisnost širine i debljine navara s brzinom navarivanja 35
Slika 34. Veza između brzine navarivanja i čvrstoće spoja alatni čelik 1.2344/niskougljični čelik 36
Slika 35. Načini pucanja na testu savijanja depozita alatnog čelika 1.2344 nanešenog preko niskougljičnog čelika: a) pucanje navara i b) pucanje spoja 36
Slika 36. Uzorci Al i Cu pod različitim vremenom zavarivanja 38
Slika 37. Utjecaj vremena zavarivanja na vlačnu čvrstoću 5083 Al 38
Slika 38. (a) – termalna slika temperaturnog polja; (b) – ovisnost temperature o brzini vrtnje 6061 Al – Cu spoja 39
Slika 39. (a) – Slika snimljena optičkim mikroskopom Al-Cu spoja napravljenih pri različitim brzinama vrtnje; (b) – histogram ovisnosti brzine vtnje i širine toplinskih zona Al strane spoja na udaljenosti od R/2 40
Slika 40. Ovisnost brzine vrtnje o vlačnoj čvrstoći Al-Cu spoja 40
Slika 41. Razlika u mjestu pucanja zbog primjene različitih tlakova sabijanja za spoj A5052-Cu; a) – 210 MPa; b) – 30 MPa 41
Slika 42. Veza između efikasnosti spoja i tlaka sabijanja 42
Slika 43. Ovisnost temperature zavara o vremenu zavarivanja 43
Slika 44. SEM slika međusloja sa različitim vremenima zavarivanja: a) 2s, b) 4s, c) 6s i d) 8s 43
Slika 45. SEM slika regija A i B sa odabranim točkama od 1 do 8 za mjerenje kemijskog sastava 44
Slika 46. Intenzitet difuzijskog sloja nastalog pri zavarivanju trenjem od 8 s 45

Slika 47. Cu i Al sirovci namijenjeni za zavarivanje trenjem 46
Slika 48. Zavareni Al-Cu sirovci sa srhom izbačenog materijala 46
Slika 49. Prikaz uobičajenih iskustveno dobivenih parametara zavarivanja trenjem..... 47
Slika 50. Granice parametara zavarivanja trenjem 47
Slika 51. Parametri za plansko tokarenje sirovaca prije zavarivanja 48
Slika 52. Parametri za uklanjanje srha nakon zavarivanja 48
Slika 53. Grafički prikaz kretanja sile, brzine vrtnje i aksijalnog pomaka u odnosu na vrijeme tokom postupka zavarivanja trenjem 49
Slika 54. Montiranje sirovca – lijevo, izrada spoja - desno..... 50
Slika 55. Ispitivanje spoja na stolnoj kidalici 51
Slika 56. Neispravno puknuće spoja..... 52
Slika 57. 3 grupe uzoraka sa različitim tlakom sabijanja i posljedično većim promjerom izbačenog materijala (srha) 53
Slika 58. Primjer uzdužno izglodanog uzorka u svrhu ispitivanja mikrostrukture na Al-Cu spoju 53
Slika 59. Pripremljeni uzorci podijeljeni u grupe i spremni za ispitivanje na vlačni test 54
Slika 60. Uzorci pripremljeni na ispitivanje mikrostrukture 54
Slika 61. Montirana ispitna epruveta spremna na vlačni test 55
Slika 62. Uzorak 2 - odvajanje spoja na Al dijelu epruvete (p_s = 25 bar) 56
Slika 63. Uzorak 8 - odvajanje spoja na zavaru (p_s = 8 bar) 56
Slika 64. Uzorci 2, 3, 4, 6, 8 i 9 nakon vlačnog testa 57
Slika 65. Vlačno ispitivanje – uzorak 2 58
Slika 66. Vlačno ispitivanje – uzorak 3 58
Slika 67. Vlačno ispitivanje – uzorak 4 58
Slika 68. Vlačno ispitivanje – uzorak 6 59
Slika 69. Vlačno ispitivanje – uzorak 8 59
Slika 70. Vlačno ispitivanje – uzorak 9 59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav točaka 1-8 međusloja zavara 44
Tablica 2. Grupe uzoraka i odabrani tlakovi sabijanja 50
Tablica 3. Svojstva aluminija i bakra 55
Tablica 4. Rezultati ispitivanja vlačnim testom uzoraka 2, 3, 4, 6, 8 i 9 60
Tablica 5. Prikaz uzoraka 1, 5 i 7 uvećanih na svjetlosnom mikroskopu 200 puta 61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	°	Kut konusa čela alata
μ	/	Faktor trenja
σ_{yield}	N/mm^2	Granica razvlačenja aluminijske legure
ω	rad/s	Kutna brzina glodala
Ag	/	Srebro
Al	/	Aluminij
Au	/	Zlato
BCC	/	Prostorno centrirana kubična kristalna rešetka
CNC	/	Computer numerical control (računalno numeričko upravljanje)
CO_2	/	Ugljikov dioksid
CP	/	Komercijalno dostupni titan visoke čistoće
Cr	/	Krom
Cu	/	Bakar
DRZ	/	Zona dinamičke rekristalizacije zrna
FBR	mm	Širina kuke
FCC	/	Plošno centrirana kubična kristalna rešetka
Hf	/	Hafnij
HH	mm	Visina kuke
H_{trn}	m	Visina trna alata
LZT	/	Linearno zavarivanje trenjem
Mg	/	Magnezij
n	min^{-1}	Broj okretaja u minuti
Ni	/	Nikal
OZ	/	Zona utjecaja topline zavara koja nalikuje na glavicu luka (*eng. onion zone*)
p_s	bar	Tlak sabijanja
p_t	bar	Tlak trenja
q_0	W/m^2	Unešena toplina po jedinici površine
Q_{adhz}	W	Toplina proizvedena adhezijom između čela alata i površine ploče
$Q_{klizanja}$	W	Toplina proizvedena klizanjem plastificiranog materijala preko trna i čela alata
Q_{uk}	W	Ukupna unešena toplina ZTRA postupka
R	m	Radijus dijela čela alata u dodiru s obrađivanom površinom
$R_{čelo}$	m	Radijus čela alata
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća materijala
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Granica razvlačenja pri kojoj dolazi do 0,2 % trajne plastične deformacije materijala
R_{trn}	m	Radijus trna alata
RZT	/	Rotacijsko zavarivanje trenjem

SEM	/	Skenirajući elektronski mikroskop
SKB	/	Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag (Švedska tvrtka zadužena za zbrinjavanje nuklearnog otpada)
Sn	/	Kositar
T	°C	Temperatura
Ti	/	Titan
T_m	°C	Temperatura taljenja aluminijske legure
TWI	/	Training within industry (institut za obučavanje stručnjaka tehnologije zavarivanja)
UV	/	Ultraljubičasto
V	/	Vanadij
v	m/s	Translacijska brzina glodala
ZM	/	Zona miješanja materijala
ZOM	/	Zona osnovnog materijala
Zr	/	Cirkonij
ZTRA	/	Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom
ZUPD	/	Zona utjecaja plastične deformacije
ZUT	/	Zona utjecaja topline
ZUTPD	/	Zona utjecaja topline i plastične deformacije

SAŽETAK

Zavarivanje trenjem je relativno nova i nedovoljno istražena tehnologija zavarivanja čija je svrha spajanje materijala unosom topline proizvedene trenjem. Konvencionalnim tehnologijama zavarivanja je unos topline ostvaren preko električnog luka pomoću kojeg se metali rastaljuju i formiraju međumolekulske veze koje nakon skrućivanja ostvaruju čvrst zavareni spoj. Takvim načinom zavarivanja je teško povezati dva različita metala odnosno metala koja imaju lošu metaluršku kompatibilnost koja ovisi o radijusu atoma, temperaturi tališta, rasporedu elektrona u vanjskoj ljusci, vrsti kristalne rešetke i sposobnosti stvaranja zajedničkih intermetalnih spojeva koji ojačavaju međusobne veze. Nadalje, unos topline kod zavarivanja električnim lukom je proporcionalan kvadratu jakosti struje koja se koristi pri zavarivanju što znači da unesena toplina može postići enormne vrijednosti. Prekomjeran unos topline dovodi do prekomjerno povećanih temperatura koje olakšavaju ostvarivanje nepoželjnih pojava korozije i vodikove krhkosti. Prilikom zavarivanja trenjem, kinetička energija međusobnog gibanja dijelova prelazi u toplinsku energiju i na taj način je unos topline manji. U procesu zavarivanja trenjem metali ne prelaze u tekuće agregacijsko stanje, već postižu viskozno-plastično stanje u kojem pri povišenoj temperaturi i pod utjecajem tlaka zadržavaju trajnu plastičnu deformaciju i ostvaruju trajnu vezu. Ovim postupkom moguće je zavarivati gotovo sve vrste čelika, titanove legure, magnezij, aluminij i bakar. Glavni nedostatak postupka jest što iziskuje visoka početna ulaganja i to što je uglavnom limitiran na sučeljene i kutne spojeve. U ovom diplomskom radu, navesti će se postupci zavarivanja trenjem i s njima povezani parametri te specificirati kako oni utječu na svojstva zavara. U radu će također biti navedene kombinacije materijala koje je moguće zavarivati trenjem te će se prikazati pregled industrijskih proizvoda kod kojih se koristi zavarivanje trenjem za njihovu izradu. Nadalje, utvrditi će se granični tlak sabijanja za izradu uzoraka promjera 14 mm te će se proučiti kako promjena tlaka sabijanja utječe na Al-Cu spojeve. Izrađeni uzorci će biti analizirani pomoću vlačnog testa i preko svjetlosnog mikroskopa pod uvećanjem od 200 puta. U konačnici će se prikazati rezultati ispitivanja iz kojih će biti izvučeni odgovarajući zaključci.

Ključne riječi: Aluminij, bakar, unos topline, zavarivanje trenjem

SUMMARY

Friction welding is relatively new and insufficiently researched welding technology whose purpose is bonding of metals enabled through heat input created through friction. Heat input of conventional welding technologies is accomplished by electric arc which melts metals that create intermolecular bonds in liquid state. Thus, after solidification is completed, firm welded connection is formed. With arc welding it is hard to bond two different metals that have unfortunate metallurgical compatibility which depends on radii of atoms, layout of outer-shell electrons, crystal lattice, melting temperature and the ability to form intermetallic compunds that strengthen the bond between metals. Furthermore, heat input in arc welding processes is proportional with rate of charges in electric current used for welding squared, which means that excessive heat can be achieved. Overwhelming amount of heat leads to increased temperatures that in turn increase the chances of corrosion and hydrogen induced cracks occurrence. With friction welding, kinetic energy of mutual motion of parts is converted into heat. That way heat input is much lower. In friction welding process, metals do not reach liquid state, but achieve permanent bond through highly viscous-plastic state in which they permanently deform through conditions of increased temperatures and pressures. With this process it is possible to weld almost all types of steel, titanium alloys, magnesium, aluminium and copper. Main drawback of this process is that it requires high starting investment and its usage is mostly limited to angular and butt joints. In this master's thesis, friction welding processes and their process parameters will be listed. It will also be analyzed how these process parameters affect the properties of the weld. In this thesis, combinations of materials that can be friction welded will also be adduced and industrial products that have friction welding as a part of their making will be showcased. Furthermore, marginal upsetting pressure for the making of samples with the diameter of 14 mm will be established as well as the effect that upsetting pressure has on Al-Cu welds. Samples will be analyzed by tensile test and welds will be studied under optical microscope under 200x magnification. In the end, results of the testing will be shown and appropriate conclusions will be brought.

Key words: Aluminium, copper, heat input, friction welding

1. UVOD

Zavarivanje je tehnologija kojom se spajaju materijali, poglavito metali, korištenjem visoke količine topline koja tali dijelove te se nakon njihova hlađenja formiraju međumolekulske veze koje omogućuju njihovo međusobno stapanje u jedan dio. Pri razmatranju gore navedene definicije bitno je razlikovati tehnologiju zavarivanja od lemljenja. Naime, pri zavarivanju se tale materijali koji se žele spojiti i vrlo često se pritom dodaje dodatni materijal koji zavarenom spoju daje bolja svojstva poput poželjnijih mehaničkih svojstava i veće otpornosti na koroziju te na taj način obogaćuju zavar dok se kod lemljenja ne tale materijali koji se spajaju, već dodatni materijal koji pri svom hlađenju i skrućivanju spaja materijale. Ovakva vrsta spajanja materijala se uglavnom koristi u proizvodnji elektronike jer se lemljenjem ne postiže visoka čvrstoća spoja kao što je to slučaj kod zavarivanja. Kao što je već spomenuto, za uspješno zavarivanje nužan je unos topline između spojeva materijala. Izvor topline može biti različit pa se tako razlikuju i vrste odnosno načini zavarivanja. Iako u starim ljudskim civilizacijama postoje naznake o zavarivanju to su ipak bili primitivni načini spajanja metala konstantnim udaranjem dvaju predmeta pri povišenim temperaturama. Pri povišenim temperaturama metali su se mogli lakše oblikovati te bi se njihovim udaranjem napravio željeni spoj. Ovakav način spajanja više nalikuje na kovanje nego na zavarivanje. Prvo konvencionalno zavarivanje jest bilo rađeno plamenom proizvedenim pomoću kemijskih reakcija između acetilena i kisika. Nastala kemijska reakcija je egzotermna po prirodi što znači da oslobađa toplinu u obliku plamena koji onda tali željene materijale. Ubrzo nakon razvoja zavarivanja plamenom, za unos topline se počeo koristiti električni luk. Električnim lukom mogle su se postići veće temperature nego sa plamenom te je bilo relativno lako upravljati unosom topline budući da ona direktno ovisi o kvadratu jakosti struje koja se mogla povisiti ili sniziti po želji. Zbog toga je zavarivanje električnim lukom i danas najpopularniji način zavarivanja. Danas se zavarivanje električnim lukom samo usavršilo, primjerice automatskim dodavanjem žice odnosno dodatnog materijala, štićenjem zavara od oksidacije pomoću inertnih plinova, razvojem elektronike kojom je moguće postići pulsiranje struje zavarivanja, izmjeničnu struju, podešavanje frekvencije i drugo. Razvojem robotike se sva navedena tehnologija može prebaciti na robota koji nema devijacija u svom radu poput čovjeka te je tako moguć precizniji rad odnosno bolje napravljeni zavar. Daljnjim razvojem tehnologija nastalo je i zavarivanje laserom pri kojem toplinu uzrokuju fokusirani fotoni koji stvaraju toplinu kad udare o površinu metala. Ova vrsta

zavarivanja je korisna jer rezultira izrazito uskom zonom utjecaja topline (ZUT). Slično laserskom zavarivanju također se razvila i tehnologija zavarivanja elektronskim zrakama. Ovdje se toplina stvara zbog visoke kinetičke energije elektrona koji su prethodno ubrzani pomoću magnetskih polja. Pri sudaru s metalima njihova kinetička energija se pretvara u toplinu. Osim zavarivanja ove dvije tehnologije mogu se koristiti za rezanje metalnih ploča. Iako je zavarivanje sve pouzdanija tehnologija ipak dijelovi metala unutar ZUT-a su zbog povišenih temperatura skloni kemijskim reakcijama s kisikom i drugim spojevima što često uzrokuje koroziju i slabljenje spoja. Nerijetko nastaje pojava „obojanost metala“ pri kojoj metal unutar ZUT-a nakon hlađenja poprimi razne boje koje su prva naznaka korozije. Još jedan nedostatak konvencionalnih načina zavarivanja taljenjem metala jest nemogućnost spajanja različitih metala zbog ekstremnih razlika u temperaturi tališta ili razlika u elektrokemijskoj prirodi materijala. Tako se npr. vrlo teško mogu zavariti čelik i titan ili aluminij i bakar što je prilično velik problem jer aluminij i bakar imaju iznimno dobra svojstva električne vodljivosti i sve više se koriste u elektroindustriji koja je u značajnom porastu zbog povećanog stupnja automatizacije i robotike u poduzećima diljem svijeta. Gore navedeni problemi su se riješili razvojem tehnologije zavarivanja trenjem. Danas je zavarivanje trenjem sve češće korišteno te se tehnologija razgranala na različite podvrste. Prvi je put razvijeno u Sovjetskom Savezu 1956. g. kad se počelo koristiti u obliku zavarivanja trenjem konstantnom rotacijom gdje se jedan dio rotirao visokim okretnim brzinama i silom gurao u statični drugi dio pri čemu su se dva dijela spojila. Zavarivanje trenjem rješava gore navedene probleme jer se metali koji se spajaju ne tale već pri povišenim temperaturama dobivaju svojstvo povišene duktilnosti i pod utjecajem sile stapaju se jedan s drugim. Zbog toga što se ne tale je unos topline puno manji te je tendencija za koroziju također manja. Tehnologijom zavarivanja trenjem je također moguće kvalitetno spajati različite metale što je glavna prednost ove tehnologije. Osim zavarivanja trenjem rotiranja razvile su se i druge vrste zavarivanja trenjem poput linearnog zavarivanja trenjem gdje se dva dijela gibaju oscilirajuće linearno pritom trljajući međusobno svoje bočne površine, zavarivanje trenjem rotirajućim alatom pri kojem se koristi glodalo posebnog oblika koje svojom rotacijom prolazi kroz sučeljeni spoj te ga na taj način plastično deformira i spaja te još navarivanje trenjem kod kojeg se cilindrično glodalo načinjeno od prevlake koja se želi nanijeti rotira po radnoj površini te svojim trošenjem nanosi prevlaku na radnu površinu koja onda štiti površinu od vanjskih utjecaja poput korozije, mehaničkih oštećenja ili temperaturnih razlika [1].

2. INDUSTRIJSKA PRIMJENA ZAVARIVANJA TRENJEM

Razvojem tehnologije, nužda za korištenjem različitih materijala je u porastu. Budući da se zavarivanjem različitih materijala nailazi na mnoštvo različitih problema poput različitih temperatura tališta, potrebe za besprijekornom čistoćom dijelova, nedostataka u obliku poroznosti zavara i nedovoljne čvrstoće zavarenog spoja, zaostalih temperaturnih naprezanja zbog kojih su potrebne višestruke toplinske obrade, razvijena je upotreba tehnologije zavarivanja trenjem koja nema gore navedene probleme pri zavarivanju različitih materijala.

2.1. Materijali pogodni za zavarivanje trenjem

Najčešći materijal zavarivan trenjem zbog kojeg je djelomično i izumljena tehnologija zavarivanja trenjem rotirajućim alatom jest aluminij. Za neke serije aluminija se smatra da im je zavarljivost jako nepogodna koristeći postupak zavarivanja električnim lukom, a neke serije poput legura visoke čvrstoće 2XXX legirane s bakrom poznatije još po nazivu duraluminij i serije 7XXX legirane s cinkom, bakrom i magnezijem je nemoguće zavarivati električnim lukom. Osim što Al reagira s kisikom i stvara tanki oksidni sloj koji ima znatno više talište od osnovnog materijala što stvara probleme kod zavarivanja, neki legirni elementi poput litija lakoćom oksidiraju ili potpuno ispare tokom zavarivanja taljenjem što znači da nakon solidifikacije, područje zavara više nije ista serija kao osnovni materijal. Al i njegove legure bivaju podvrgnute značajnim temperaturnim dilatacijama pri kojima se volumen materijala pri taljenju i solidifikaciji može promijeniti i do 4 %. Takve značajne promjene u volumenu mogu uzrokovati velike deformacije komponenata koje se zavaruju, što može dovesti do pojave pukotina pri solidifikaciji zbog velikih toplinskih naprezanja. Zavarivanje trenjem nema takvih problema pri zavarivanju jer materijali ne prelaze u tekuće agregacijsko stanje i toplinska naprezanja su znatno manja te se sve aluminijske legure mogu uspješno zavarivati [2].

Postoji raširena percepcija da se Mg teško zavaruje koristeći tehnologije zavarivanja taljenjem pa je porasla potražnja za zavarivanje trenjem magnezija nakon što je tehnologija uspješno primijenjena na Al. Razvojni program TWI instituta je ustanovio da se magnezijeve legure mogu zavariti trenjem s relativnom lakoćom čak i u kovanoj i lijevanoj formi. TWI Yorkshire tehnološki centar je proizveo zavar magnezijskih ploča debljine 75 mm kako bi se proizvelo postolje za strojeve koji provode vibracijska ispitivanja [2].

Svojstva dobre toplinske i električne vodljivosti su oduvijek stvarale teškoće kod zavarivanja Cu i njegovih legura, posebice u debljim izvedbama materijala. Budući da se zavarivanjem trenjem ne tale obratci i generirana toplina se aplicira lokalno u veoma uskom području, ta

tehnologija je viđena kao potencijalno koristan postupak za zavarivanje Cu. Rani pokušaji zavarivanja Cu ploča od strane SKB-a, Švedske organizacije zadužene za razvoj limenih kanti namijenjenih za odlaganje nuklearnog otpada, dali su obećavajuće rezultate. Uspješno su zavarene Cu ploče debljine 50 mm te je također razvijen stroj za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom koji može zavarivati po opsegu obradaka. Danas se uspješno zavaruju komponente od bronce legirane s Al i Ni za izradu propelera u brodogradnji gdje se njihove površine procesiraju robotiziranim ZTRA postupcima. Time se smanjio broj pojava pukotina uzrokovanih zamorom materijala pri korijenu lopatica propelera te se također ustanovilo da lopatice zavarene trenjem stvaraju manje buke i kavitaciju [2].

Hf i Zr su metali s posebnim primjenama u petrokemijskoj i procesno-energetskoj industriji. Istraživanja su pokazala da se oba metala mogu zavarivati trenjem.

Zavarivanje čelika i željeznih legura je dostiglo stupanj razvoja gdje se mogu postići duljine zavara do 30 m koristeći zavarivanje trenjem. Postignuti zavari imaju odlična mehanička svojstva i postoje dobre indikacije da imaju bolju korozijsku postojanost i otpornost na zamor materijala u odnosu na čelike zavarene električnim lukom. Pokazalo se da je moguće zavariti čak i ODS čelike koji se trenutno smatraju nezavarivima. Prednosti zavarivanja trenjem čelika uključuju [2]:

- Smanjene deformacije pa tako i troškove ravnanja dijelova
- Poboljšana svojstva korozijske postojanosti i otpornosti na zamor materijala
- Mogućnost zavarivanja čelika koji su teško zavarljivi konvencionalnim metodama
- Smanjeni troškovi rada, treniranja osoblja i dobave certifikata
- Smanjena potrošnja energije postupka
- Nema izloženosti parama, UV zračenju, heksavalentnom kromu i rastaljenim česticama metala.

Kad se navedene prednosti uzmu u obzir, ulazak tehnologije zavarivanja trenjem čelika i željeznih legura na ekonomsko tržište je sve izgledniji.

Iako većina uobičajenih Ti legura ima svojstva dobre zavarljivosti konvencionalnim metodama, mogu se dogoditi problemi prevelikih deformacija obradaka i loše kvalitete zavara. Pored toga, neke naprednije Ti legure poput Ti-6246 i Ti-17 se teško zavaruju taljenjem. Razvoj zavarivanja trenjem omogućuje proizvodnju Ti limova i ploča visokih kvaliteta i malih deformacija. Zavari izvedeni postupkom trenja titana su uspješno napravljeni na CP (komercijalno dostupan čisti

titan) Ti, Ti-6Al-4V i Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn. Na limovima Ti-6Al-4V debljine 6,35 mm je postignuta slična čvrstoća zavara kao i na osnovnom materijalu [2].

Budući da je zavarivanje trenjem postupak koji mehanički miješa metale kako bi formirao spoj između njih, mogu se zavarivati različiti materijali. To se najlakše postiže kad metali imaju slična toplinska svojstva i temperature plastificiranja. Primjerice, uspješno su zavareni Cu, Au i Ag, kopirajući pritom drevnu japansku tehniku izrađivanja nakita mokume-gane, ali sa puno manje rasipanja materijala nego kod tradicionalne ručne metode.

Plastomeri omekšavaju i teku pri zagrijavanju, a tokom hlađenja ponovno dobivaju svoju krutost. Njih je također moguće zavarivati trenjem. Zavarivanje plastomera je kompleksniji postupak nego zavarivanje metala zbog toga što su plastomeri polimeri odnosno lanci dugačkih molekula, a ne individualni atomi pa tako imaju vrlo drugačija svojstva plastičnog tečenja. Parametri postupka i dizajn alata za zavarivanje plastomera su stoga puno drugačiji u odnosu na zavarivanje metala [2].

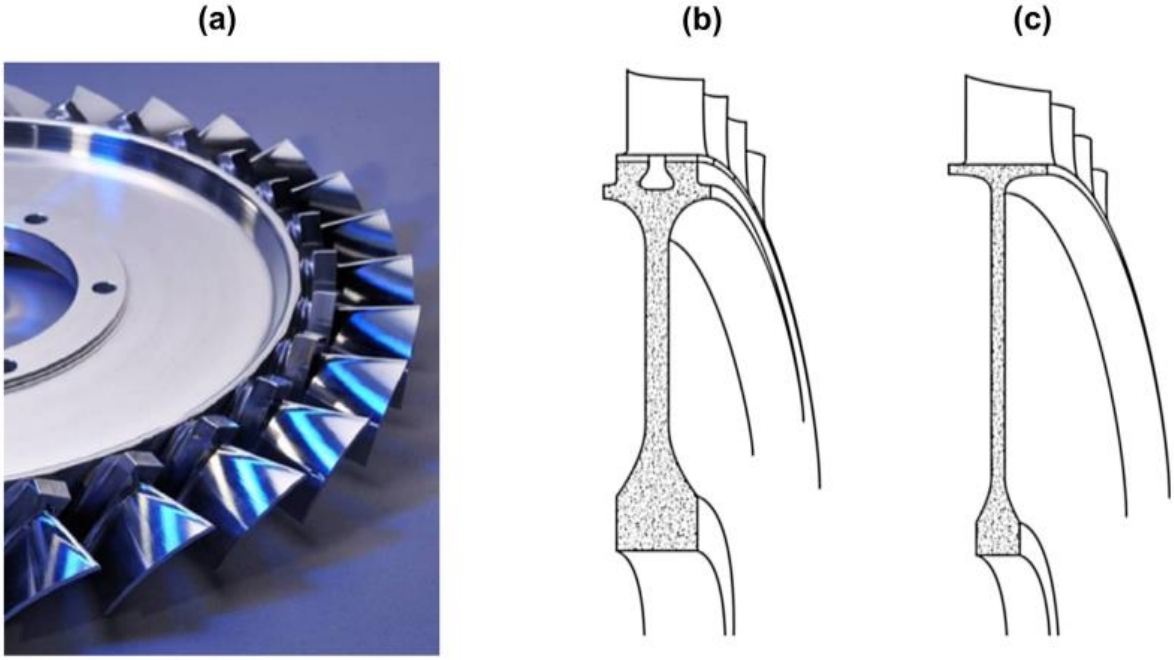
2.2. Pregled proizvoda zavarenih trenjem

Najčešći proizvod zavarivan trenjem je verzija kabelske spojne opreme izrađena od Al i Cu. Omjer električne vodljivosti sa gustoćom materijala je kod Al dvostruko veći u odnosu na Cu stoga ne čudi da je kod nekih dijelova sustava prijenosa električne energije spoj Cu i Al primamljiva alternativa, posebice zbog niže cijene Al. Primjer kabelske spojne opreme zavarene trenjem prikazan je na slici [1].

Slika 1. Primjer kabelske spojne opreme Al-Cu spoja zavarenog trenjem [3]

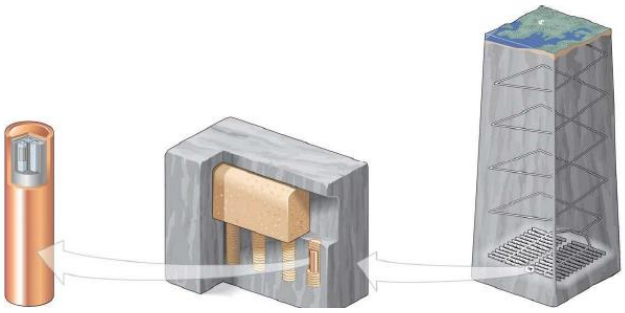
Zavarivanje trenjem primjenjuje se za izradu turbina u zrakoplovnom inženjerstvu. Turbine se sastoje od cilindričnih diskova s lopaticama te se inače izrađuju na način da se iskovani obratci strojno obrađuju na preciznim CNC strojevima. Međutim, na taj način je prisutan visok stupanj neiskorištenosti materijala. Koristeći se LZT postupkom, moguće je zavariti lopatice na disk

turbine i pritom znatno smanjiti gubitak materijala. Za izradu diskova turbina i lopatica koristi se legura Ti-6Al-4V koju odlikuje iznimno visoka tvrdoća i teško se strojno obrađuje odnosno zahtijeva čestu promjenu reznih pločica na alatu i njegovo ubrzano trošenje. Postupkom LZT-a se taj problem uklanja budući da se dijelovi trljaju međusobno jedan o drugoga [4]. Lopatice zavarene trenjem za disk turbine prikazane su na slici [2].



Slika 2. Turbina od Ti-6Al-4V proizvedena zavarivanjem trenjem a), turbina izrađena konvencionalnim metodama b), turbina zavarena LZT-om c) [5]

Švedska tvrtka za upravljanje nuklearnim otpadom SKB je zadužena za zbrinjavanje svog nuklearnog otpada proizvedenog u Švedskoj. To je uglavnom otpad iz nuklearnih elektrana, ali i iz istraživačkih projekata i područja medicine. SKB je razvio metodu zbrinjavanja nuklearnog otpada sa 3 zaštitne barijere. Prva barijera je izrađena od nodularnog lijeva okruženog bakrenim oklopom. Nepropusni bakreni oklopi su uronjeni u bentonitu koji čini drugu barijeru i konačno cijeli sustav je zakopan na dubini od 500 m u kristalnim stijenama koje leže iznad plašta Zemlje. Barijere su ilustrirane na slici 3.

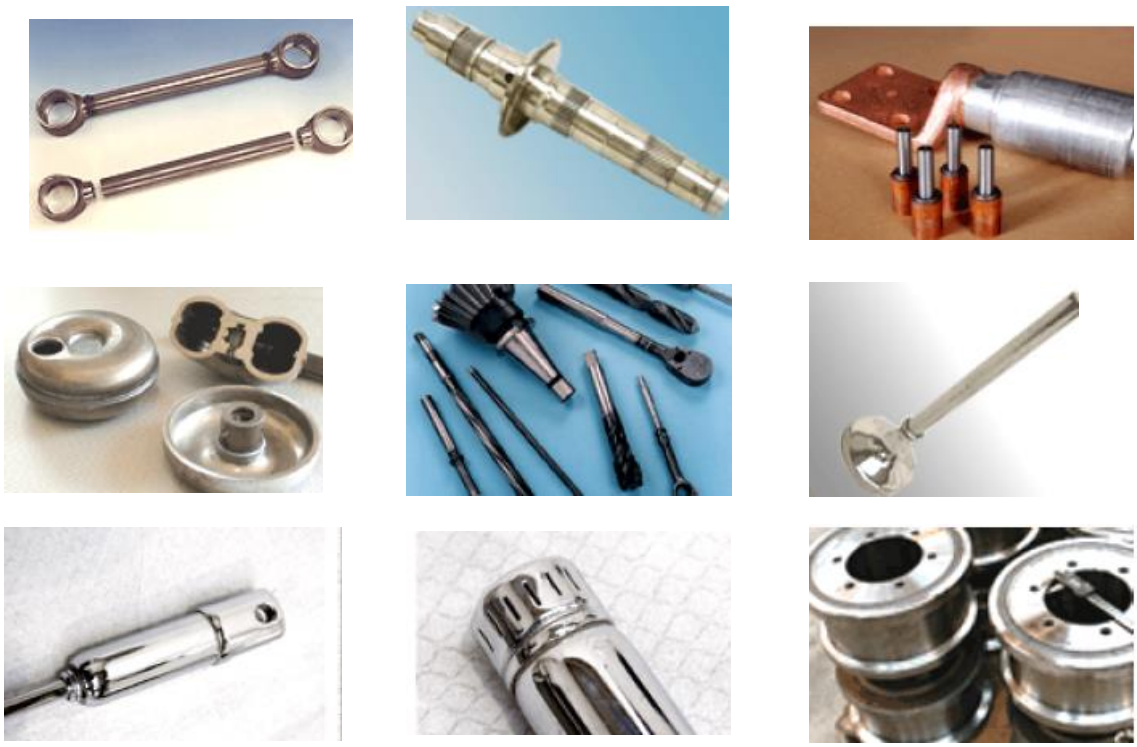


Slika 3. 3 barijere za zbrinjavanje nuklearnog otpada [6]

Bakreni spremnici su 5 m dugi te imaju promjer preko 1 m. Njihova masa iznosi između 25 i 27 t uključujući oko 2 t potrošenog nuklearnog goriva. Debljina stijenke bakrenih spremnika iznosi 5 cm. Bakreni spremnik prvenstveno služi kao barijera za koroziju, a sastoji se od poklopca i baze koji se zavaruju ZTRA postupkom. ZTRA postupak korišten za izradu bakrenih spremnika prikazan je na slici 4 zajedno s ilustracijom ZTRA postupka.

Slika 4. ZTRA postupak za izradu Cu spremnika i ilustracija postupka [6]

Zavarivanje trenjem je uključeno u mnoštvo proizvoda prikazanih na slici 5 poput klipnjača, propelera, spremnika zračnih jastuka i raznih alata.



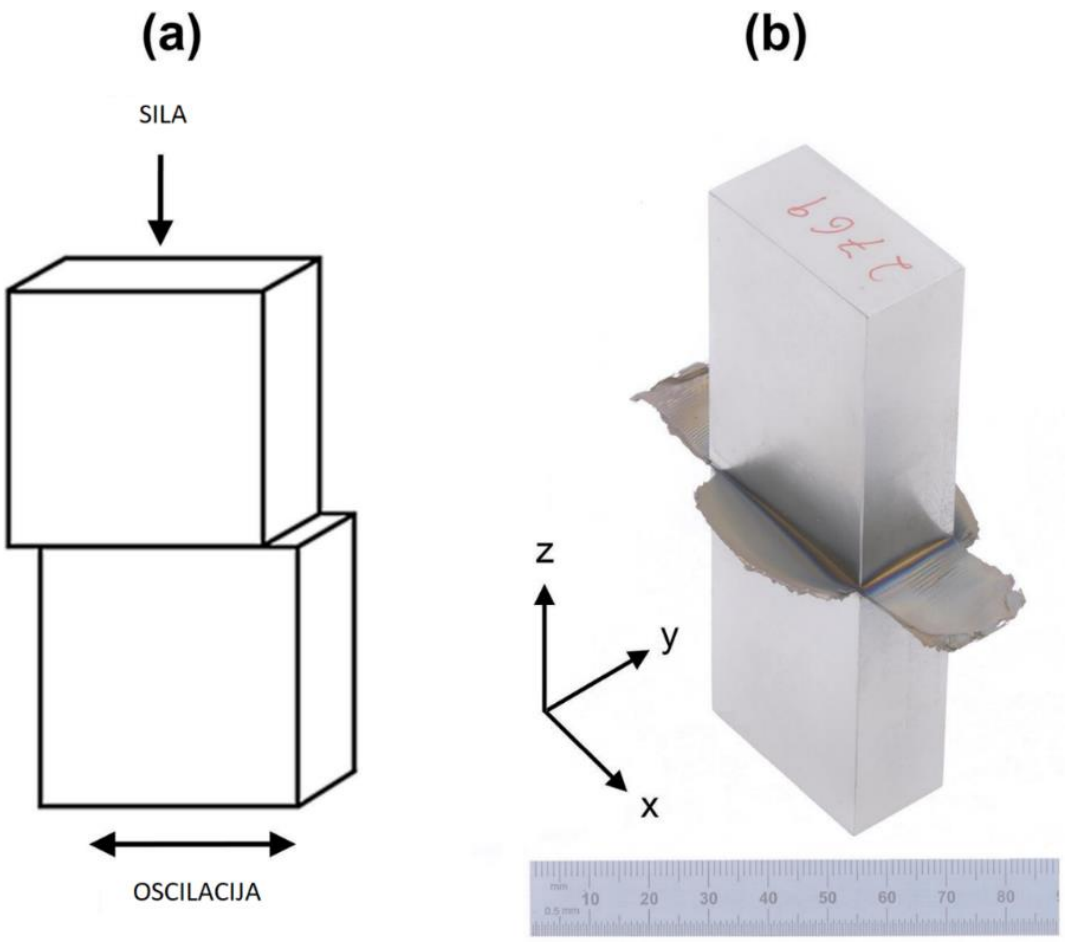
Slika 5. Skupine proizvoda napravljenih zavarivanjem trenjem [7]

3. POSTUPCI ZAVARIVANJA TRENJEM

Zavarivanje trenjem u različitim varijacijama je postupak zavarivanja u krutom agregacijskom stanju u kojem je unos topline između materijala uzrokovan trenjem koje nastaje kao rezultat međugibanja dijelova u kontaktu. Za razliku od ostalih načina zavarivanja, kod zavarivanja trenjem se materijali koji se spajaju ne tale, već je njihovo međusobno spajanje uzrokovano međusobnim trljanjem pri povišenim uvjetima temperature i tlaka. Ovaj način zavarivanja ne zahtijeva dodavanje dodatnih materijala ili zaštitu inertnim plinovima te za njega nije potrebna velika količina električne energije (ona se koristi samo za pokretanje dijelova odnosno strojeva koji uzrokuju tlak i međugibanje) što ga čini ekonomski i energetski učinkovitim postupkom za spajanje sličnih i različitih materijala. Zavarivanje trenjem se najčešće koristi za spajanje polimera, kompozita i metala različitih svojstava kao što su titan u kombinaciji s različitim vrstama čelika ili aluminija i bakra [2].

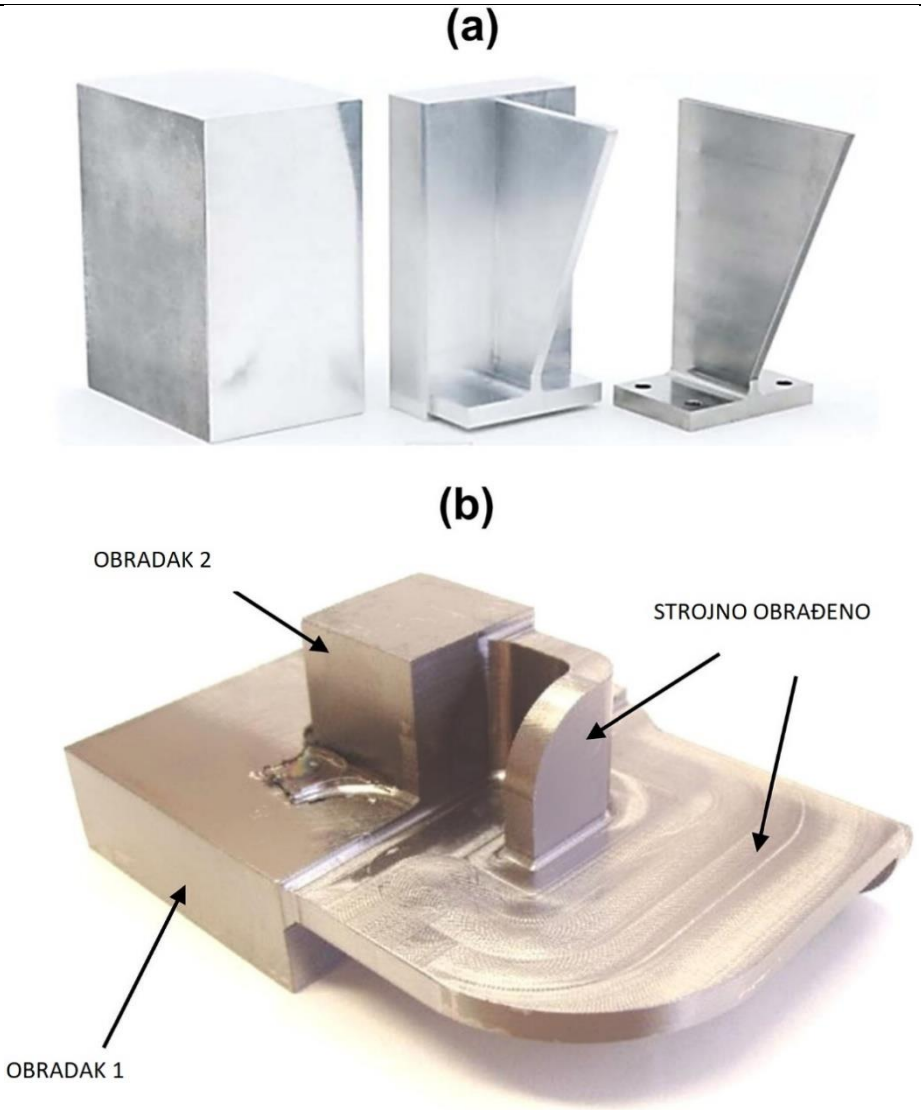
3.1. Linearno zavarivanje trenjem

Linearno zavarivanje trenjem (LZT) je postupak spajanja dijelova materijala u krutom agregacijskom stanju korištenjem topline proizvedene trenjem između oscilirajuće gibajućih površina uz konstantno vršenje sile odnosno tlaka između njih. LZT postupak ima česte primjene u aeronautici gdje se koristi za izradu diskova s lopaticama koji se postavljaju na turbine kako bi omogućili kompresiju zraka koji u stanju povišenog tlaka omogućava zapaljenje i izgaranje goriva. Diskovi i lopatice na turbini se izrađuju od titanovih legura, konkretno od legure Ti-6Al-4V. Razlog korištenja tehnologije LZT-a za spajanje diskova i lopatica leži u ekonomici proizvodnje. Tipično su se dijelovi turbine izrađivali od jednog prekomjerno velikog obratka u obliku ingota te bi se konačan dizajn diska s lopaticama dobio strojnom obradom. Ovakvim postupkom omjer materijala koji se kupio sa materijalom koji se iskoristio za disk s lopaticama može biti 20:1, a u najboljem slučaju on iznosi 5:1. Kod LZT-a taj isti omjer iznosi u najgorem slučaju 2:1, a u najboljem 1,6:1. Razlika u gore navedenim omjerima donosi ogromne uštede ukoliko se koristi LZT. Uštede se očitavaju u podatku o cijeni titanovih legura koje iznose > 70 £ kg^{-1} i za strojnu obradu troše > 500 $MJ \cdot kg^{-1}$ te stvaraju emisije CO_2 od > 40 $kg \cdot kg^{-1}$. Samim time LZT nije samo ekonomičnije isplativiji postupak za proizvodnju diskova s lopaticama, već i ekološki prihvatljiviji postupak što u današnjem svijetu postaje sve važnija stavka proizvodnje. Na slici 1 prikazan je zavar postignut LZT postupkom [5].



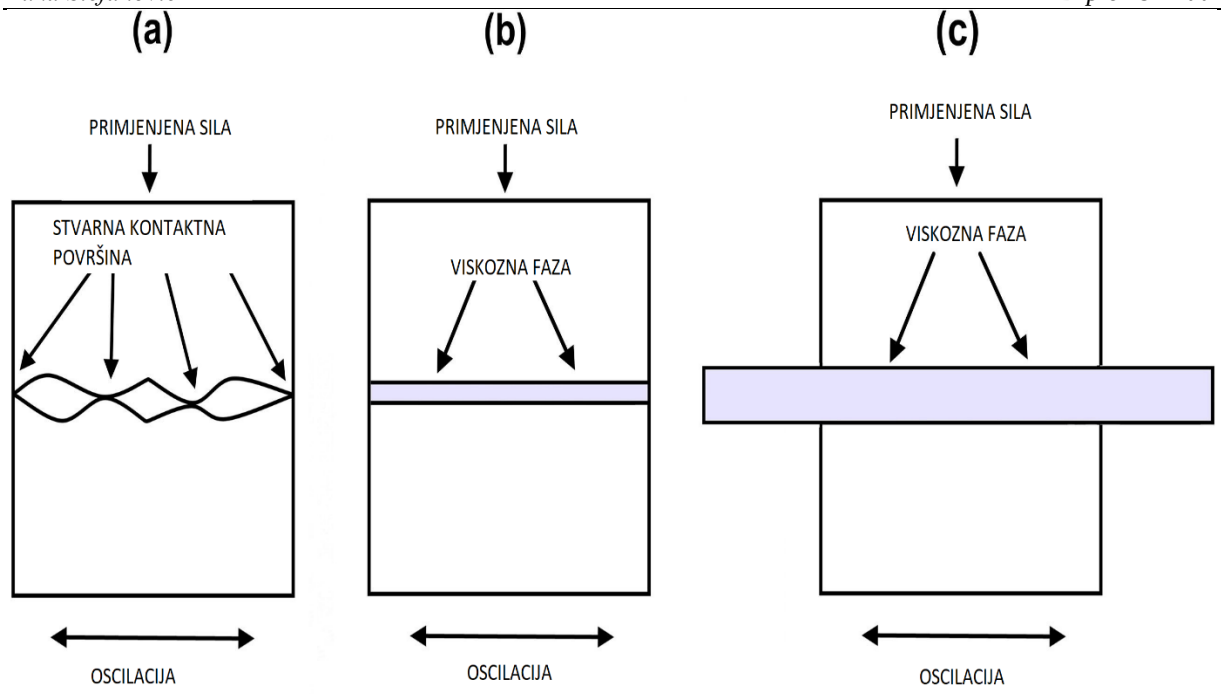
Slika 6. (a) Shematski prikaz LZT-a, (b) Zavar legure Ti-6Al-4V na kojem je vidljiv istisnut materijal [5]

Na slici 6 je prikazana karakteristika LZT-a koja po opsegu spojene površine dvaju dijelova stvara istisnut materijal. Istisnut materijal je duži po onoj osi po kojoj je vršeno oscilirajuće gibanje što znači da je u slučaju sa slike 6 gibanje bilo u x smjeru. Do pojave istisnutog materijala dolazi jer pri povišenim temperaturama materijali postaju izrazito duktilni te uslijed djelovanja sile, dijelovi materijala do kojih još nije došla dovoljna količina topline da omekšaju istišću zagrijani duktilni dio u ravninu koja je okomita na smjer djelovanja sile i to ponajviše u smjeru vektora oscilirajućeg gibanja. Na slici 7 je prikazana usporedba količine odbačenog materijala korištenog u zrakoplovstvu uporabom isključivo strojne obrade i kombinacijom strojne obrade i LZT-a [5].



Slika 7. (a) Komponenta iz zrakoplovne industrije obrađena isključivo strojnom obradom, (b) Komponenta titanove legure izrađena kombinacijom strojne obrade i LZT-a [5]

Na slici 7 je vidljivo kako je u slučaju (a) za proizvodnju dijela potreban ingot prekomjerne veličine dok je u slučaju (b) gubitak materijala puno manji. Naravno nakon zavarivanja trenjem obradak je potrebno strojno obraditi kako bi se postigla visoka preciznost dimenzija i omogućila izrada dijelova koji sadrže složenije matematičke krivulje u svom dizajnu. Na slici 8 je ilustriran shematski prikaz LZT-a raspodijeljen na faze.



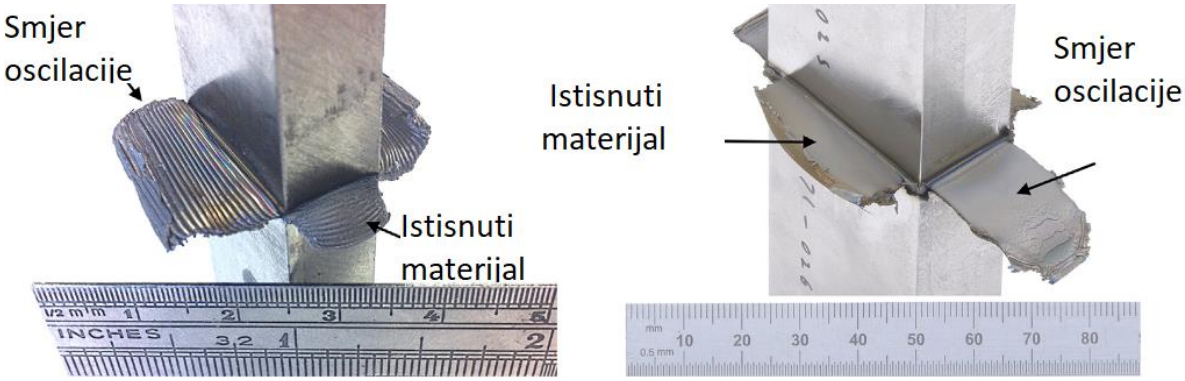
Slika 8. Shematski prikaz LZT postupka [5]

Kao što je već prethodno navedeno, LZT postupkom se spajaju dijelovi u krutom agregacijskom stanju te se on može podijeliti na 4 faze [5]:

1) Faza 1 – Inicijalna faza. Mikroskopski kontakti postoje između izbočina dviju površina u dodiru. Pod utjecajem sile i topline, izbočine omekšavaju i postepeno se izravnavaju, povećavajući pritom kontaktnu površinu između dijelova. Također je prisutno neznatno aksijalno smanjenje dimenzije u smjeru primjenjene sile.
2) Faza 2 – Tranzicijska faza. Toplina izazvana trenjem uzrokuje plastificiranje međusloja materijala koji postaje viskozan. Toplina kondukcijom odlazi iz međusloja i omekšava udaljeniji materijal koji pod utjecajem sile istiskuje viskozan međusloj. Za leguru Ti-6Al-4V ova faza počinje kada temperatura međusloja dostigne temperaturu pretvorbe mikrostrukture u β zrna koja iznosi 980 °C
3) Faza 3 – Faza ekvilibrijuma. U ovoj fazi se gubitak visine odnosno skraćenje po aksijalnoj osi odvija konstantnom brzinom te se ubrzano počinje formirati istisnut materijal po opsegu spojenih površina.
4) Faza 4 – Faza deakceleracije i kovanja. Relativno gibanje između dvaju dijelova prestaje i obratci su poravnati. U nekim primjenama je potrebno kovati zavar kako bi se dodatno učvrstio.

3.1.1. Morfologija istisnutog materijala

Kao što je prikazano na slici 6, tokom LZT-a se istisne materijal po opsegu spojenih površina i to ponajviše u smjeru vektora oscilirajućeg gibanja te nešto manje u smjeru okomitom na smjer vektora oscilirajućeg gibanja. Mehanizam na koji materijal biva istisnut iz zavara je izuzetno osjetljiv na uvjete odnosno parametre zavarivanja. Moguće su dvije različite morfologije istisnutog materijala u postupku LZT-a koje su prikazane na slici 9.



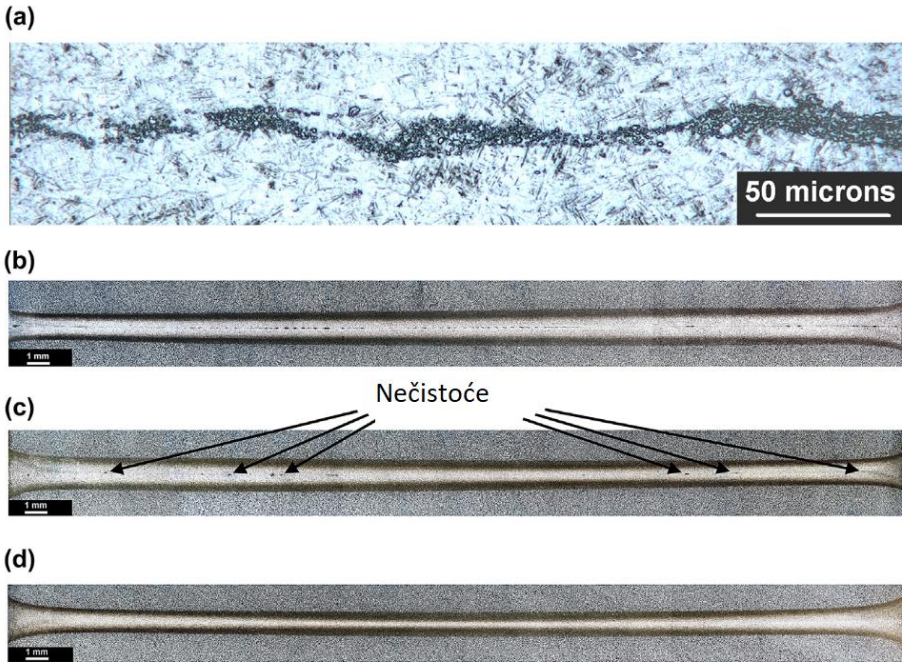
Slika 9. Naborana i glatka morfologija istisnutog materijala LZT postupka [5]

Naborana morfologija istisnutog materijala nastaje kad se frekvencija oscilirajućeg gibanja približava ili prelazi 1500 Hz. Nabori nastaju zbog iznimno brzih promjena smjera gibanja te istisnut materijal biva podlegnut smičnim silama koje stvaraju tangencijalno naprezanje na zavar. Svaki nabor odgovara jednoj promjeni smjera gibanja od trenutka kada je materijal postao dovoljno ugrijan da se može plastično deformirati. Glatka morfologija nastaje pri nižim frekvencijama i istisnut materijal se ne želi odsjeći od obratka već se on ekstrudira u ravninu u kojoj se odvija oscilirajuće gibanje [5].

3.1.2. Uklanjanje nečistoća iz međusloja

Nečistoće u međusloju, poput oksida i stranih čestica, utječu na mehanička svojstva i životni vijek zavara odnosno konačnog proizvoda. Zbog toga je postupak LZT-a za proizvodnju dijelova u zrakoplovnoj industriji izuzetno podoban proces. Oksidi nastaju u prvoj fazi linearnog zavarivanja kada viskozni materijal međusloja reagira s kisikom iz atmosfere uslijed povišenih temperatura kada se lakše odvijaju kemijske reakcije. Također je moguće da su oksidi prisutni i prije zavarivanja ukoliko materijal nije temeljito prethodno očišćen. Strane čestice mogu biti ulja ili maziva koja su dospjela u materijal tokom strojne obrade. Čak i da je materijal pažljivo očišćen prije zavarivanja, stranih čestice će uvijek biti prisutne. U drugoj fazi LZT-a nečistoće postaju zarobljene u međusloju zavara. Razlog zbog visoke podobnosti LZT postupka je efekt samočišćenja koji on posjeduje. Naime u trećoj fazi LZT-a se ekstrudira istisnuti

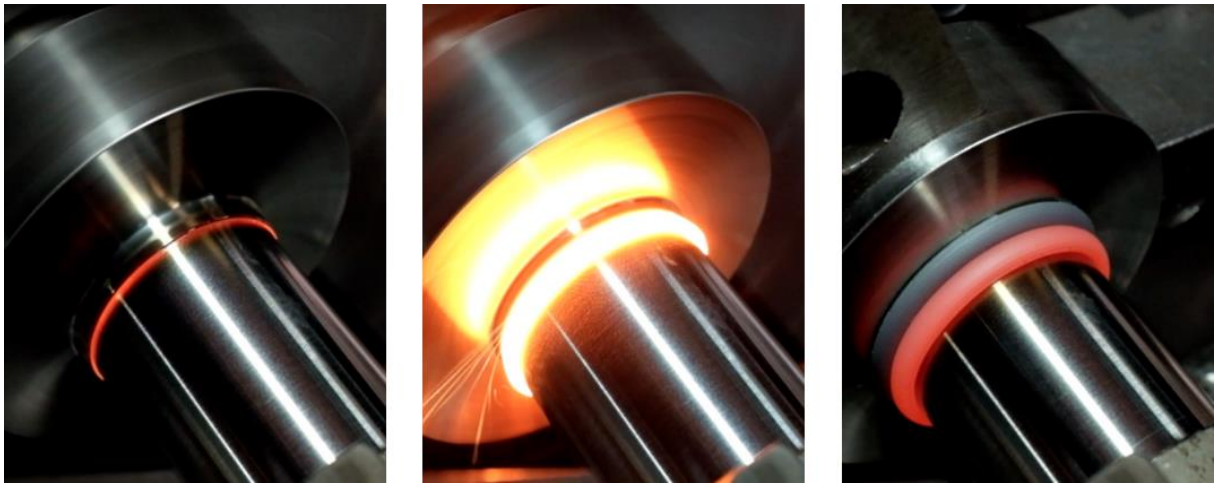
materijal iz međusloja zajedno sa svim zarobljenim nečistoćama koje se nalaze u međusloju. Što je šira zona utjecaja topline odnosno u slučaju zavarivanja trenjem zona utjecaja plastične deformacije to je i veći volumni protok nečistoća koje izlaze iz područja zavara. Zona utjecaja plastične deformacije biti će veća ukoliko je veća i frekvencija oscilirajućeg gibanja LZT-a. Tlak je također bitan parametar koji utječe na nečistoće. Uslijed većih tlakova između dvaju dijelova, potrebno je manje trošenje dijelova da bi se ostvarila jednaka površina istisnutog materijala. To je tako zbog visokih tlačnih sila koje djeluju na viskozni materijal te je on stoga podvrgnut većim silama koje su dovoljne da ekstrudiraju materijal dalje od centra međusloja. U slučaju manjeg tlaka, sile su posljedično također manje te nisu dovoljno snažne da izbace viskozni materijal izvan međusloja te je stoga potrebno više potrošenog materijala koji se pretvara u viskozni međusloj tijekom tarenja dviju površina da bi se ostvarila jednaka površina istisnutog materijala kao što je slučaj pri višim tlakovima. Ti podaci su važni jer to znači da je pogodnije koristiti više tlakove za LZT postupak, jer će trošenje i gubitak materijala biti manje a nečistoće će svejedno biti izbačene iz međusloja zavara. Također je važan i smjer oscilirajućeg gibanja za uklanjanje nečistoća. Budući da istisnutog materijala ima najviše u smjeru vektora oscilirajućeg gibanja pogodnije je gibanje vršiti u onom smjeru u kojem je manji put do izlaza iz međusloja. Primjerice na slici 6 bi bilo pogodnije oscilirajuće gibanje vršiti po y-osi jer je je u tom smjeru kraći put do izlaska iz međusloja pa će na taj način i više nečistoća lakše pronaći svoj put ka izlazu iz zavara 5. Na slici 10 je prikazano kretanje nečistoća uslijed različitih faza zavarivanja LZT postupkom (b) – 0,5 mm trošenja, c) – 1 mm trošenja i d) – 3 mm trošenja).



Slika 10. Kretanje nečistoća izvan zavara uslijed LZT postupka [5]

3.2. Rotacijsko zavarivanje trenjem

Rotacijsko zavarivanje trenjem (RZT) je najstariji oblik zavarivanja trenjem. Ovaj postupak je prvi put korišten u Sovjetskom Savezu kad je tehnolog A.J. Chidkov 1956. godine slučajno otkrio ovu metodu. Prilikom rada na tokarskom stroju na kojeg je montirana glava bušilice zaboravio je podmazati glavu bušilice te je prilikom obrade zavario obradak i bušilicu. Ovaj postupak se prvotno koristio za spajanje osovina i vratila cilindričnih oblika. Postupak RZT-a je moguće izvesti na dvije varijante. U prvoj varijanti je prvi dio stegnut dok je drugi dio pričvršćen na steznu glavu tokarilice. Drugi dio se zajedno sa steznom glavom zavrti na visoke okretne brzine te se aksijalno vrši sila u smjeru prvog dijela. Time se stvara trenje i oslobađa toplina koja omekšava međusloj koji se po opsegu spoja istiskuje radijalno prema van slično kao što je to slučaj kod LZT-a samo što istisnuti materijal nema preferirani smjer istiskivanja budući da je gibanje dijelova kružno. U drugoj varijanti su oba obratka pričvršćena na steznu glavu te se vrte u suprotnim smjerovima. Na taj način je moguće smanjiti okretne brzine jer će njihova relativna brzina rotacijskog gibanja ostati visoka. Na slici 11 je prikazan postupak rotacijskog zavarivanja trenjem [4].

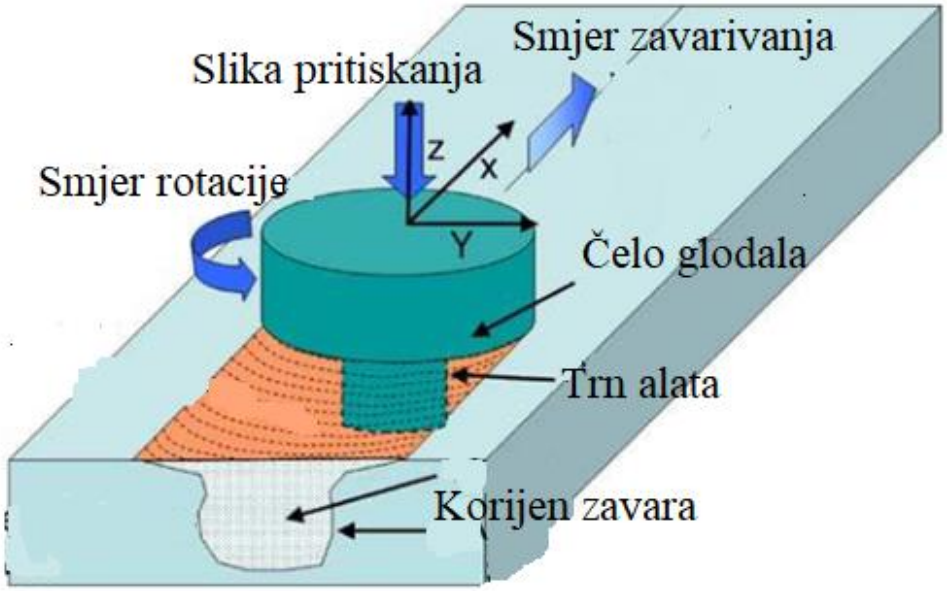


Slika 11. Postupak rotacijskog zavarivanja trenjem [8]

Na slici 11. su prikazane 3 faze RZT-a. U prvoj fazi se jedan dio počinje rotirati i pritiskati o drugi dio. Stvara se trenje koje oslobađa toplinu koja stvara omekšani viskozni međusloj. U drugoj fazi se toplina kondukcijom prenosi na ostatak materijala te viskozni međusloj postaje sve deblji te on pod utjecajem sile biva istisnut radijalno prema van. U trećoj fazi se zaustavlja gibanje glavnog vretena i vrši se konačan pritisak silom kako bi zavar očvrsnuo te on svojim hlađenjem dobiva svoj konačan oblik. Ukoliko je potrebno, nakon zavarivanja moguće je odstraniti višak istisnutog materijala koji se nalazi oko spojenih površina [8].

3.3. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (ZTRA) je izumljeno 1991. g. na Institutu za zavarivanje Ujedinjenog Kraljevstva kao tehnologija spajanja materijala u krutom agregacijskom stanju. Inicijalno je ovaj postupak služio za spajanje aluminijskih legura. Koncept ZTRA-a je iznimno jednostavan. Rotirajući alat nalik na glodalo sa posebno izrađenim trnom i čelom se umeće posred rubova metalnih ploča sučeljenog spoja te se translatira uzduž istog nakon čega nastaje zavar. Alat odnosno glodalo ima dvije svrhe. Stvara toplinu izazvanu trenjem rotiranja koja omekšava obratke te im omogućava prijelaz u druge faze i svojim gibanjem određuje duljinu zavarenog spoja. Lokalizirano zagrijavanje omekšava materijal oko trna alata i kombinacijom rotacije i translacije alata prebacuje trajno plastično deformirani materijal ispred trna alata prema stražnjoj strani odnosno u smjeru rotacije alata. Na slici 12 je prikazan shematski crtež koji ilustrira postupak ZTRA dok je na slici 13 prikazan postupak u svojoj realnosti usred proizvodnje [9].



Slika 12. Shematski prikaz zavarivanja trenjem rotirajućim alatom [9]

Na slici 12 je sila na alat primjenjena prema dolje okomito na ravninu metalnih ploča te se alat rotira na način da je vektor rotacije usmjeren uzduž osi z u pozitivnom smjeru. Unutar ploča je uronjen samo trn glodala dok se čelo glodala naslanja na ploče i vrši pritisak. Zavarena regija nastaje iza glodala odnosno stvara se u smjeru translatiranog gibanja glodala.

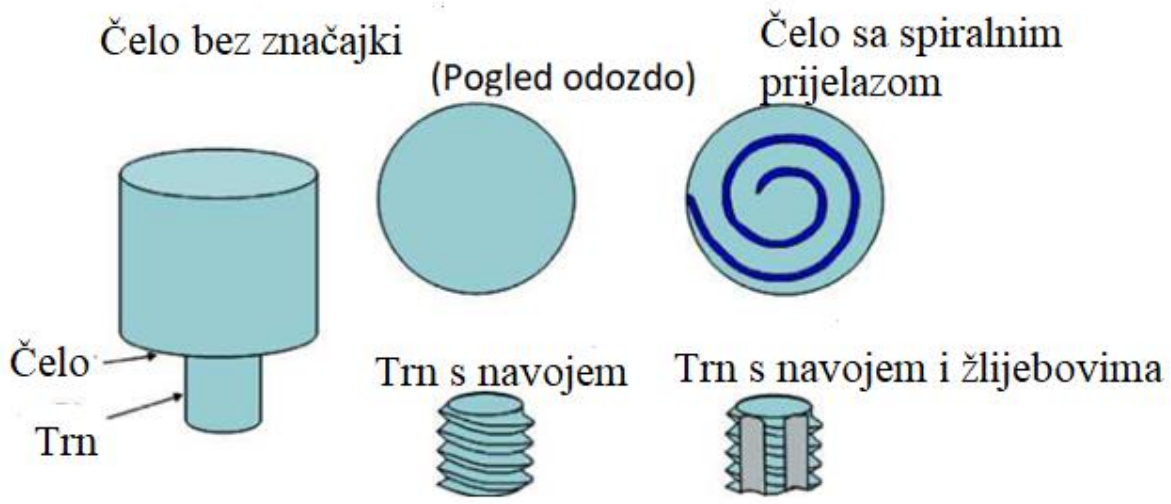
Slika 13. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [10]

Zbog raznovrsnih tipova alata, kretanje materijala oko trna alata može biti kompleksno. Tokom procesa ZTRA, materijal podliježe intenzivnoj plastičnoj deformaciji uslijed povišenih temperatura što rezultira stvaranjem finih i rekristaliziranih zrna usmjerenih jednoliko u svim smjerovima. Takva fina mikrostruktura daje zavarima dobra mehanička svojstva [9].

3.3.1. Geometrija alata

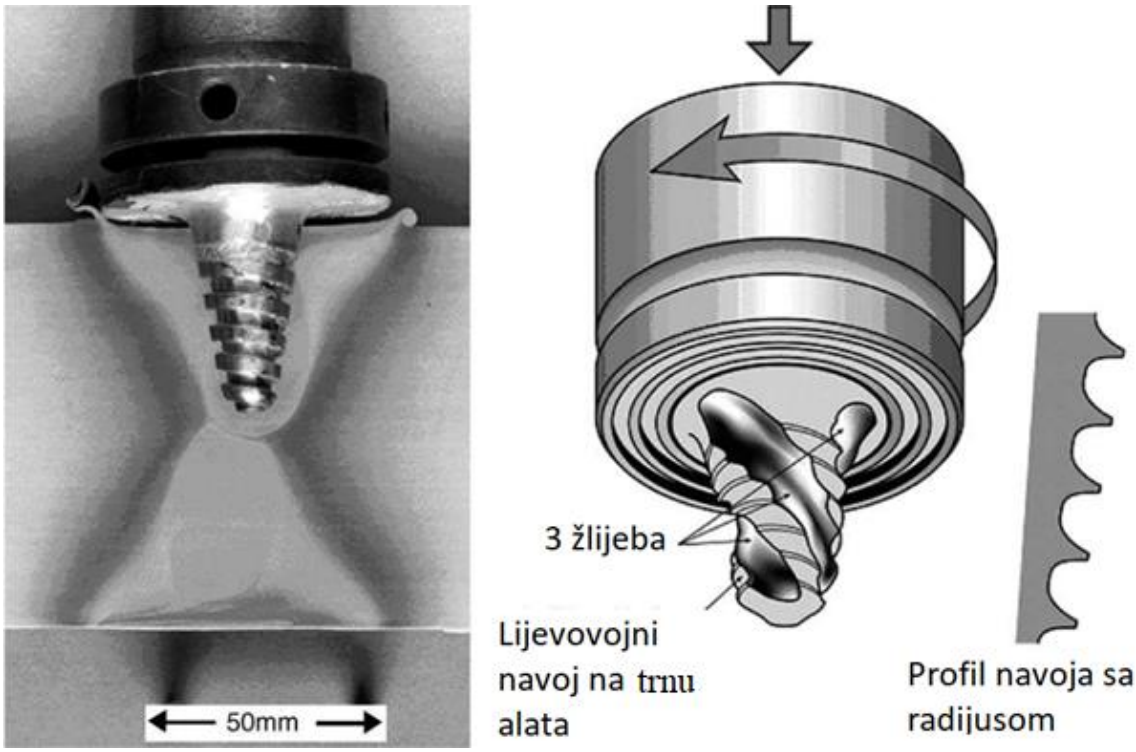
Geometrija alata jest najutjecajniji parametar zaslužan za razvoj postupka ZTRA. Geometrija alata uvelike određuje karakteristike gibanja plastificirane mase materijala oko trna alata pa na taj način također određuje i maksimalnu brzinu zavarivanja odnosno kretanja glodala translacijski kroz materijal. U početnoj fazi zavarivanja, trn alata se uranja u materijal sve dok čelo glodala ne dotakne površinu sučeljenog spoja. U prvoj fazi, toplina je ponajviše stvorena trenjem između trna alata i obratka. Nakon toga počinje prevladavati trenje između čela glodala i površine obratka. S gledišta nastajanja topline, relativna veličina između trna alata i čela glodala je važna dok ostali parametri nisu utjecajni za stvaranje topline. Čelo glodala također ima ulogu ograničavanja prostora za kretanje plastično deformiranog dijela zavara te je materijal prisiljen prekriti površinu sučeljenog spoja. Druga funkcija alata je miješanje plastično deformirane smjese obratka što naposljetku daje uniformnu mikrostrukturu zavara. Način na koji će se plastično deformirana smjesa kretati i finoću mikrostrukture zavara koja će se ovim postupkom proizvesti određuje dizajn alata odnosno njegova egzaktna tehnička

dokumentacija. Općenito se alat izrađuje na način da mu čelo bude konkavnog oblika sa trnom alata s vanjskim navojem. Na slici 14 je prikazan shematski crtež alata za postupak ZTRA.



Slika 14. Shematski crtež alata za postupak ZTRA [9]

Na slici 15 je prikazan alat za ZTRA postupak razvijen na Institutu za zavarivanje Ujedinjenog Kraljevstva.



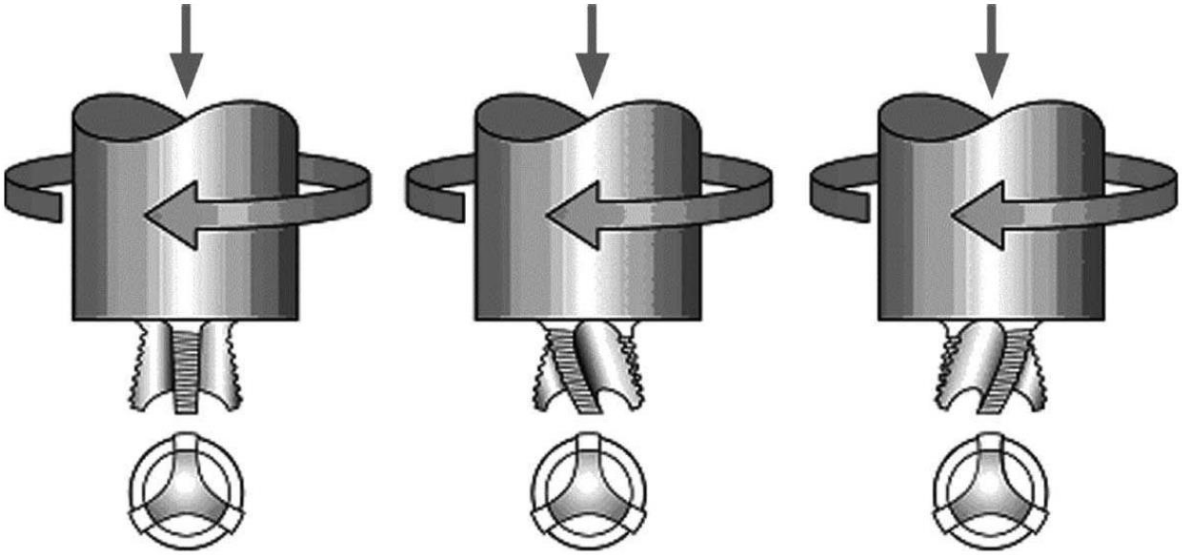
Slika 15. Alat Whorl^{TM} za ZTRA razvijen na Institutu za zavarivanje, UK [9]

Na slici 15 se može vidjeti da alat ima trn sa lijevovojnim navojem koji može biti izveden u varijanti sa žlijebovima ili bez njih. Trn alata je konstruiran u obliku krnjeg stošca što mu omogućava da istisne manje volumena materijala od alata s jednolikim promjerom trna. Alat sa slike 15 je u mogućnosti istisnuti 60 % manje volumena od bazičnog jednostavnog alata s cilindričnim trnom jednakog promjera. Ukoliko se koristi varijanta sa triju žlijebova istišće se i do 75 % manje volumena. Istiskivanje manje volumena znači da su sile na alat tokom zavarivanja manje te je omogućen lakši protok plastično deformiranog materijala oko trna alata. Navoj na trnu povećava dodirnu površinu alata s obratkom što znači više topline koja je nužna za plastčnu deformaciju. Navoj također usmjerava protok materijala i zajedno s oblikom krnjeg stošca olakšava početnu fazu zavarivanja u kojoj je potrebno probušiti materijal u sučeljenom spoju. Napredni alati za ZTRA kao što je Whorl^{TM} mogu zavariti aluminijske ploče debljine 50 mm u jednom prolazu. Ključ uspjeha alata u obliku krnjih stožaca naspram konvencionalnih cilindričnih alata jest u omjeru volumena pometenog materijala (dinamičkog volumena) tokom zavarivanja i volumena trna alata (statičkog volumena). Kod konvencionalnih alata taj omjer iznosi 1,8:1 dok je isti omjer za Whorl^{TM} alate 2,6:1. Konvencionalni cilindrični alati su problematični kada se koriste za zavarivanje aluminijskih ploča u preklopnom položaju jer često uzrokuju pretjerano stanjivanje gornje ploče. Kontinuiranim razvojem ZTRA postupka i alata koji se za njega koriste, dizajnirane su dvije nove vrste alata. Flared-Triflute^{TM} ima znatno izraženije žlijebove i A-skew^{TM} čija je os trna alata pomalo nagnuta u odnosu na os glavnog pogonskog vretena glodala. Ovi alati znatno poboljšavaju kvalitetu zavara u preklopnim položajima. Svojim poboljšanim dizajnom ovi alati [9]:

a) Povećavaju omjer dinamičkog i statičkog volumena tokom zavarivanja odnosno volumena pometenog materijala i volumena trna alata.
b) Olakšavaju tok materijala ispod i oko trna alata.
c) Proširuju zavareno područje zbog geometrije trna alata.
d) Pružaju unaprijeđenu radnju miješanja koja omogućava bolju fragmentaciju i raspršenje oksida i nečistoća unutar zavara.
e) Pružaju pojavu orbitalnog kovanja pri kojoj zbog svoje nagnute geometrijske prirode tokom vrtnje visokim brzinama udaraju korijen zavara što poboljšava kvalitetu zavara.

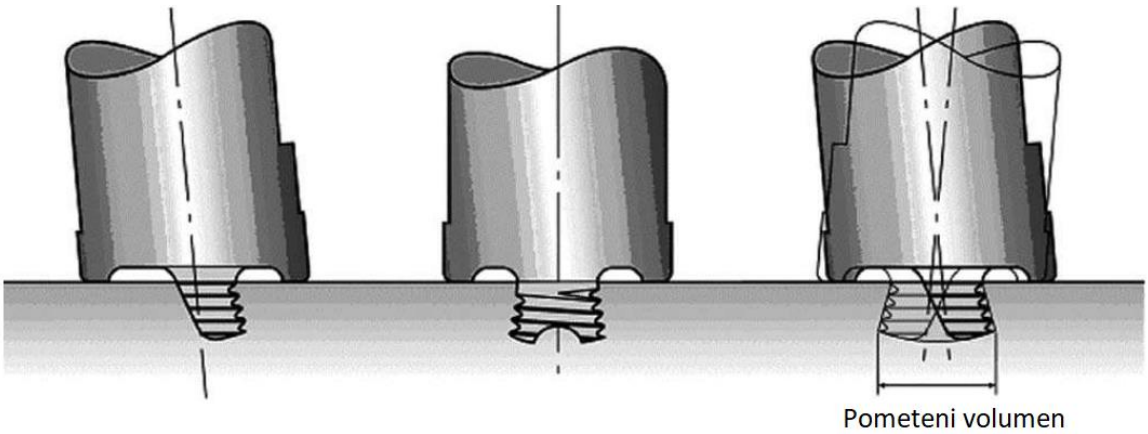
U usporedbi s konvencionalnim alatima za postupak ZTRA, Flared-triflute^{TM} i A-skew^{TM} trnovi omogućavaju 100 % veće brzine zavarivanja i samnjenje aksijalne sile koja gura trn u metalne ploče za 20 %. Zavareno područje je korištejem ovih alata šire za 190 % korištenjem Flared-Triflute^{TM} i 110 % šire korištenjem A-skew^{TM} u odnosu na konvencionalne cilindrične

alate. Na slikama 16 i 17 su prikazani alati Flaret-Triflute™ i A-skew™ gdje se mogu konkretno vidjeti obilježja opisana u ovom poglavlju.



Slika 16. Flared-Triflute™ alat s proširenim vrhom i izraženijim žlijebovima [9]

Na slici 16 se jasno mogu uočiti znatno izraženiji žlijebovi na trnu alata u odnosu na Whorl™ alat. Također je teže uočiti konturu krnjeg stošca jer je u slučaju Flared-Triflute™ alata ona okrenuta naopačke te posjeduje puno manje kuteve između bočnih stranica i baze.



Slika 17. A-skew™ alat s nagnutom osi trna alata u odnosu na os glavnog pogonskog vretena glodala [9]

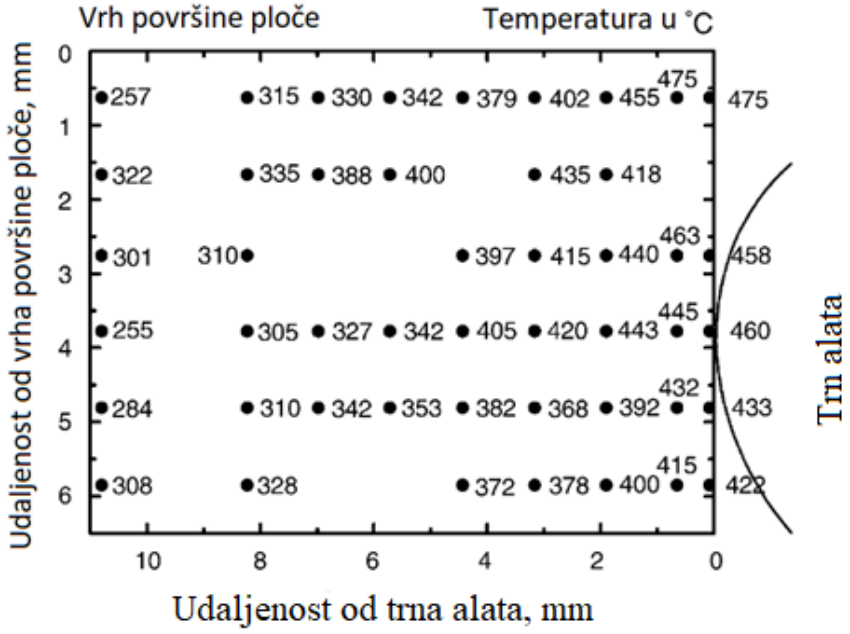
Na slici 17 se može vidjeti A-skew™ alat iz više različitih pogleda te je jasno prikazana nagnutost osi trna alata i osi glavnog vretena odnosno čela alata. Na slici je također prikazan pometeni volumen gdje se jasno vidi da je on širi u odnosu na Whorl™ alat zbog geometrije tj. nagnutosti trna alata. A-skew™ alat također ima poboljšani dizajn čela alata te se na slici 17 može vidjeti da ona ne prijanja cijelom svojom površinom uz metalnu ploču, već samo dijelom površine koja zatvara prazan prostor između površine metalne ploče i čela alata što donosi dvije

prednosti, prva očita prednost je da zbog smanjene površine čela alata u kontaktu s obratkom dolazi do manje stanjivanja gornje ploče koje iznosi i preko 4 puta u odnosu na druge alate i druga prednost se očitava u praznom prostoru između čela i gornje metalne ploče zbog kojeg se plastificirani materijal bolje miješa. Dizajn geometrije alata je izrazito važan jer postoji očita korelacija između toka materijala i rezultirajuće mikrostrukture zavara sa različitim geometrijama alata. Daljnja poboljšanja u dizajnu alata su moguća uz računalne simulacije i metode konačnih elemenata, no nažalost se postignuta unaprijeđenja čuvaju kao poslovne tajne te ih se ne može pronaći u otvorenoj literaturi.

3.3.2. Temperaturna distribucija

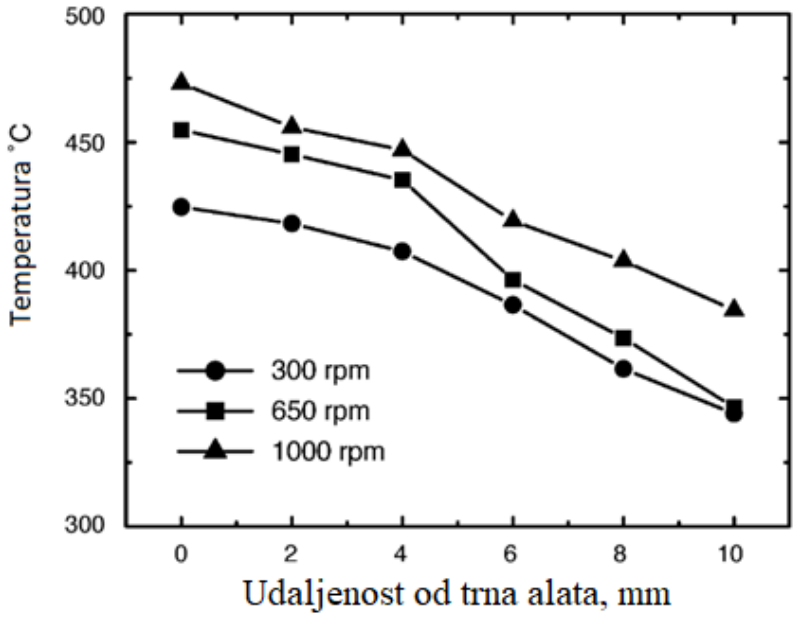
Temperaturna distribucija vrlo je važan aspekt zavarivanja trenjem rotirajućim alatom. Budući da je zavarivanje trenjem postupak zavarivanja u krutom agregacijskom stanju, materijal koji se zavaruje ne smije postići temperaturu taljenja. Također je važno da temperatura ne bude preniska jer u tom slučaju nije moguće postići plastičnu deformaciju i spojiti materijale. Kako temperatura utječe na mikrostrukturu zavara, specifičnije na veličinu zrna i formiranje granice zrna, proces precipitacije koja otežava gibanje dislokacija, ona direktno utječe na mehanička svojstva zavara jer svi gore navedeni faktori određuju glavna mehanička svojstva. Ipak vrlo je teško mjeriti temperaturu unutar zone miješanja ZTRA postupka. Temperatura se procijenjuje iz dobivene mikrostrukture zavara ili se mjeri pomoću termočlanaka u području blizu zavara. Istraživanjem razvoja mikrostrukture materijala 7075Al-T651 utvrđeno je otapanje većih precipitata u korijenu zavara što ukazuje na temperature između 400 i 480 °C u korijenu zavara. Korištenjem transmisijske elektronske mikroskopije u kojoj se snop elektrona prenosi kroz uzorak kako bi se stvorila slika znanstvenici su proučili evoluciju mikrostrukture materijala 6063Al tokom ZTRA postupka. Iz rezultata je utvrđeno kako su svi precipitati otopljeni unutar sredine zavara (0-8,5 mm od matrice zavara) [9].

Analizom mikrostrukture na udaljenostima od centra zavara u iznosu od: 0-8,5, 10, 12,5, i 15 mm određene su temperature od: 402, 353, 302 i 201 °C. Na temelju tih rezultata je izveden eksperiment u kojem se zavarivala ploča materijala 7075Al-T651 debljine 6,35 mm, a tokom zavarivanja se mjerila temperatura oko zone miješanja kao funkcija duljine od centra trna alata i kroz debljinu metalne ploče. Rezultati mjerenja su prikazani na slici 18.



Slika 18. Temperaturna distribucija unutar 7075Al-T651 tokom ZTRA postupka [9]

Na slici 18 se može vidjeti da je maksimalna zabilježena temperatura u iznosu od 475 °C i ona se javila odmah uz područje vanjske oštrice trna alata pri vrhu ploče odnosno u području ploče koji je u zahvatu sa čelom alata i sa vanjskom oštricom trna alata. Točka taljenja materijala Al 775-T651 iznosi 480 °C, no nema dokaza da je ta temperatura postignuta budući da nema znakova taljenja tokom zavarivanja. Temperatura također ovisi o brzini vrtnje glodala što je prikazano na dijagramu sa slike 19 koji je dobiven istim istraživanjem.



Slika 19. Ovisnost temperature i brzine vrtnje glodala na različitim duljinama od trna alata [9]

Na slici 19 je vidljivo kako temperatura raste s povećanjem brzine vrtnje glodala što ima smisla jer glodalo s većom brzinom vrtnje posjeduje više kinetičke energije koja se u doticaju s materijalom gubi odnosno pretvara u toplinu. Također je važno voditi računa o brzini vrtnje glodala jer je talište materijala Al7075-T651 na 480 °C što znači da ukoliko se koristi brzina vrtnje od 1000 min^{-1} može se postići temperatura veća od tog iznosa u neposrednoj blizini glodala što će onda nepobitno dovesti do rastaljivanja legure. Iz temperaturnih distribucija tokom miješanja trna alata i ovisnosti temperature i brzine vrtnje glodala proizašla je formula koja opisuje unos topline po jedinici površine i ona glasi [9]:

$$q_o = \frac{4}{3}\pi^2 \mu P \omega R^3 \tag{1}$$

Gdje je:

q_0, W/m^2 – Unešena toplina po jedinici površine

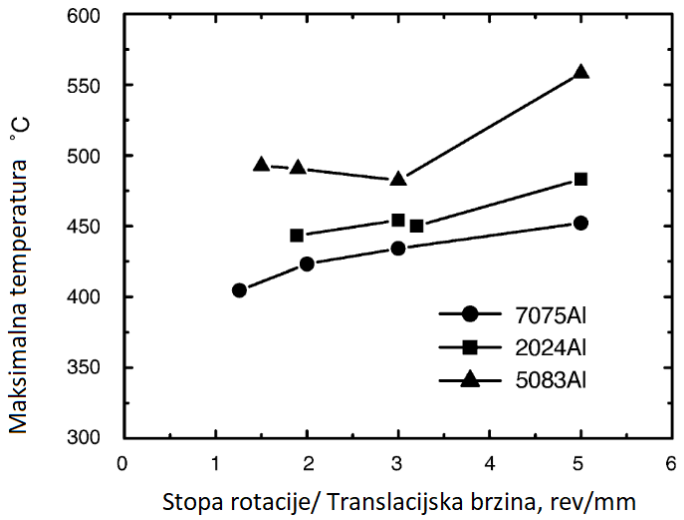
μ – Faktor trenja između trna alata i obrađenog metala

R, m – Radijus dijela čela alata u dodiru s obrađivanom površinom

P, N/m^2 – Tlak koji glodalo vrši na metalnu ploču

ω, rad/s – Kutna brzina glodala

Nadalje, uočen je visok stupanj korelacije između maksimalne temperature koja se javlja unutar zavara i brzine vrtnje glodala te između translacijske brzine glodala i stope zagrijavanja odnosno unosa topline. Također je zabilježena viša temperatura na bočnoj strani sučeljenog spoja jer se tamo poklapaju vektor translacijskog gibanja glodala i vektor tangencijalne brzine glodala. Na slici 20 je prikazan efekt omjera rotacijske i translacijske brzine na maksimalnu temperaturu unutar zavarenog spoja.



Slika 20. Efekt omjera brzine vrtnje i translacijske brzine na temperaturu zavara [9]

Kroz ovisnosti prikazanih na slikama 19 i 20 demonstrirana je veza između maksimalne temperature postignute tokom zavarivanja trenjem i brzine vrtnje i translacijske brzine, a koja vrijedi za većinu aluminijskih legura. Veza između navedenih parametara je prikazana u slijedećoj formuli [9]:

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

Gdje je:

T, °C – Maksimalna temperatura postignuta tokom zavarivanja trenjem

T_m, °C – Temperatura taljenja aluminijske legure

K – Konstanta između 0,65 i 0,75

α – Konstanta između 0,04 i 0,06

ω, rad/s – Brzina vrtnje glodala

v, m/s – Translacijska brzina glodala

Maksimalna temperatura postignuta tokom zavarivanja trenjem rotirajućim alatom za različite aluminijske legure generalno se kreće u rasponu između $0{,}6T_m$ i $0{,}9T_m$. Taj raspon temperatura odgovara rasponu temperatura za toplinsku obradu precipitacijski ojačanih aluminijskih legura što pogoduje mehaničkim svojstvima zavara. U formulama (3a, 3b i 3c) prikazan je analitički model ukupnog unosa topline u kojem su uzete u obzir pojave trenja klizanja materijala preko svrdla glodala i trenja adhezije radne površine za čelo glodala [9].

$$Q_{adhz} = \frac{2}{3}\pi\frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}}\omega\left(\left(R_{čelo}^3 - R_{trn}^3\right)(1 + tan\alpha) + R_{trn}^3 + 3R_{trn}^2 H_{trn}\right) \tag{3a}$$

$$Q_{klizanja} = \frac{2}{3}\pi\mu p\omega\left(\left(R_{čelo}^3 - R_{trn}^3\right)(1 + tan\alpha) + R_{trn}^3 + 3R_{trn}^2 H_{trn}\right) \tag{3b}$$

$$Q_{uk} = \frac{2}{3}\pi\left(\delta\frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} + (1-\delta)\mu p\right)\omega\left(\left(R_{čelo}^3 - R_{trn}^3\right)(1 + tan\alpha) + R_{trn}^3 + \right.$$
$$\left. + 3R_{trn}^2 H_{trn}\right) \tag{3c}$$

Gdje su [9]:

Q_{adhz}, W – Toplina proizvedena adhezijom između čela alata i površine ploče

$Q_{klizanja}$, W – Toplina proizvedena klizanjem plastificiranog materijala preko trna i čela alata

Q_{uk}, W – Ukupna unešena toplina ZTRA postupka

$R_{čelo}$, m – Radijus čela alata

R_{trn}, m – Radijus trna alata

α, ° – Kut konusa čela alata

p, Pa – Tlak kontakta čela alata i površine aluminijske ploče

σ_{yield}, N/mm^2 – Granica razvlačenja aluminijske legure

H_{trn}, m – visina trna alata

ω, rad/s – Brzina vrtnje glodala

μ – Faktor trenja između materijala i glodala

δ – Varijabla koja ovisi o odabranom alatu

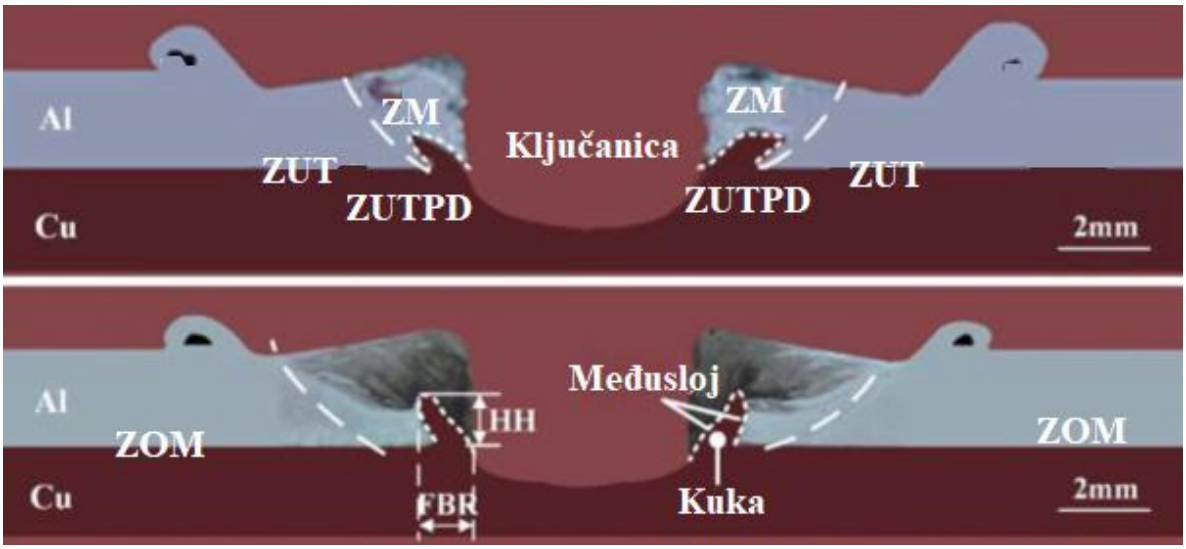
Rezultati dobiveni zavarivanjem legure 2024Al-T3 se podudaraju s analitičkim modelom unosa topline, ali se eksperiment provodio samo pri brzinama vrtnje od 400 s^{-1} i sa brzinama zavarivanja od 120 mm/min [9].

U konačnici, mnogo faktora utječe na temperaturni profil ZTRA postupka. Iz brojnih eksperimentalnih istraživanja i analitičkih modela se zaključuje da je maksimalna temperatura postignuta tokom ZTRA postupka uvijek manja od temperature taljenja obrađivane legure, trenje izazvano pritiskom čela glodala o radnu površinu proizvodi više topline nego trn alata, maksimalna temperatura raste s porastom brzine vrtnje glodala pri konstantnoj brzini zavarivanja i opada s porastom brzine zavarivanja pri konstantnoj brzini vrtnje. Konačno, maksimalna temperatura se postiže kod vanjske površine aluminijske ploče u neposrednoj blizini oboda čela alata sa strane zavara u sučeljenom spoju gdje vektori translacije glodala i rotacije imaju jednak smjer [9].

3.3.3. Struktura zavara proizvedenog ZTRA postupkom

Promatranje makroskopskih karakteristika zavara je metoda ispitivanja kojom se najlakše može analizirati zavareni spoj i njegova kvaliteta. Kod točkastog zavarivanja trenjem rotirajućim alatom aluminija i bakra, geometrija alata, parametri zavarivanja i čistoća materijala određuju izgled površine i poprečni presjek zavara te samim time i na njegovu kvalitetu. Poprečni presjek zavara ZTRA postupka se može podijeliti na 4 glavna područja: zonu miješanja (ZM), zona utjecaja topline i plastične deformacije (ZUTPD), zona utjecaja plastične deformacije (ZUPD) i zona osnovnog materijala (ZOM). U korijenu samog zavara se nalazi ZM i ona okružuje područje praznog prostora u kojeg se prvotno umetnuo trn alata. Zbog oblika praznog prostora, on je nazvan „ključanica“. ZM uključuje uzak prostor materijala u neposrednoj blizini miješanja trna alata. U slučaju zavarivanja preklopnog spoja, ZUTPD se nalazi u području donje ploče odmah uz ZM dok se ZUPD nalazi na granici dvaju materijala i u području oko ZM. ZOM obuhvaća sav materijal koji nije nimalo izmjenio svoju mikrostrukturu pod utjecajem

zavarivanja trenjem. Na slici 21 je prikazan poprečni presjek preklopnog spoja Al i Cu koji je zavaren točkasto trenjem miješanja rotirajućim alatom.



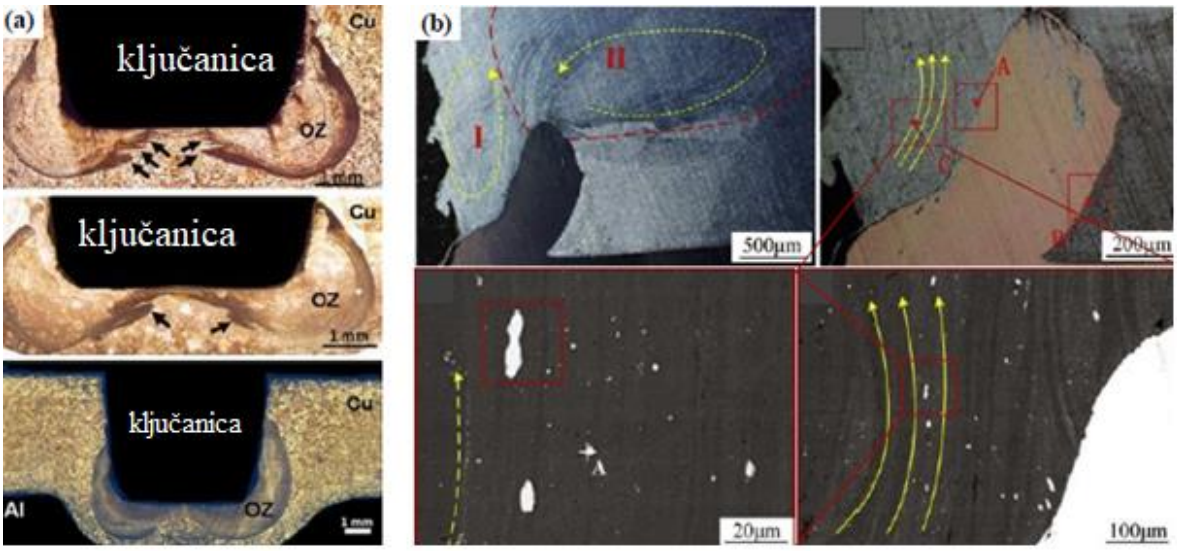
Slika 21. Tipično formiranje različitih zona na poprečnom presjeku zavarenog spoja [11]

Na slici 21 je prikazan preklopni spoj u kojem je aluminijska ploča na vrhu, a bakrena ploča ispod nje. Na slici se također vidi česta pojava formiranja kuke koja dodatno učvršćuje spoj a pojavljuje se jer se tokom plastične deformacije bakar brže skrućuje dok je aluminij još u svom stanju povišene duktilnosti te uslijed miješanja glodala bakar zahvaća aluminij i formira se „kuka“. Kuka povećava vlačnu čvrstoću zavara a njena geometrija ima pozitivnu korelaciju s vlačnom čvrstoćom spoja. Pokazalo se kako je veći omjer visine kuke (HH) naspram širine kuke (FBR) povećava čvrstoću spoja.

Osim makrostrukture zavarenog spoja, priroda mikrostrukture određuje mehanička svojstva. Vrsta kristalne rešetke, radijus atoma i razlika u rasporedu vanjskih elektrona utječu na metaluršku kompatibilnost različitih materijala poput Al i Cu. Osim već navedenih stavki, metaluršku kompatibilnost dvaju metala određuje i mogućnost odnosno nemogućnost stvaranja novih faza ili intermetalnih spojeva tokom postupka zavarivanja. Za materijale Al i Cu metalurška kompatibilnost je loša pa ih je gotovo nemoguće zavariti elektrolučnim postupcima zavarivanja, ali s obzirom da se tokom zavarivanja trenjem stvara velik broj intermetalnih spojeva oni se mogu spajati ovim postupkom [11].

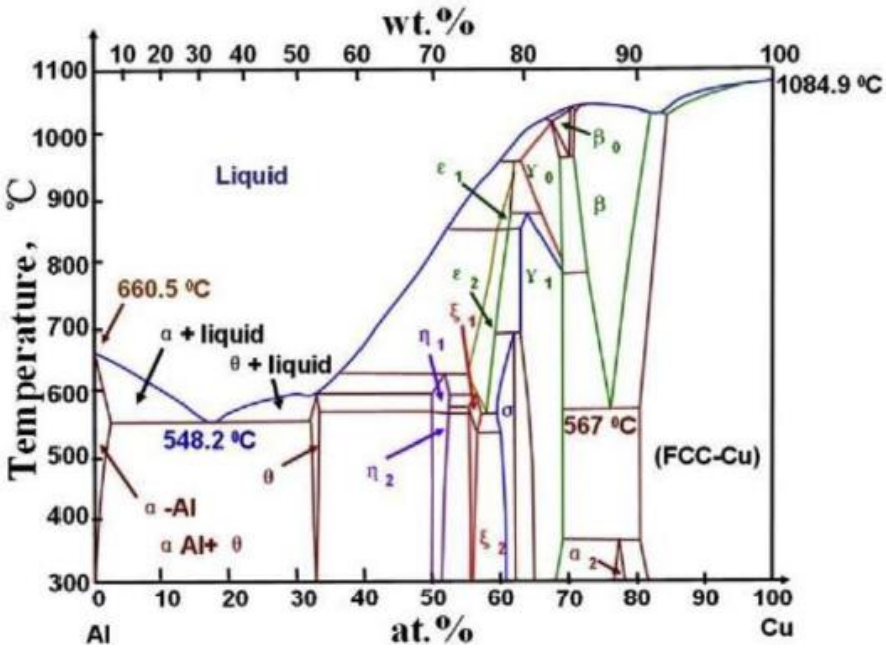
Tok materijala ZTRA postupka je važna stavka koja određuje mehanička svojstva zavara. U ZTRA postupku, materijal ispod čela alata tone prema dolje pritom prateći vrtnju alata. Kad materijal dosegne vrh trna alata, smjer toka alata biva ometan pa se tok materijala udaljava od vrha trna alata i preusmjerava prema gore. Tok materijala koji se giba prema gornjem sloju deakcelerira pod utjecajem sila koje su uzrokovane tokom materijala koji se giba uz alat prema

dolje. Ukoliko se pri ZTRA postupku bakrena ploča stavi preko aluminijske, budući da je aluminij mekan te ima visoku duktilnost, tvrdi bakreni materijal tlači Al i uzrokuje konkavnost aluminijske ploče u području zavara. Stoga, čak i da je duljina trna alata veća od debljine bakrene ploče, trn ne može doseći Al te međusloj ne može biti penetriran. Zbog kretanja materijala prilikom zavarivanja, zabilježena je karakteristična zona zavara „onion zone“ (OZ) koja je dobila ime po glavici luka zbog svog karakterističnog oblika [11]. Tok materijala, konkavnost aluminijske ploče i (OZ) oko ključanice zavara prikazane su na slici 22.



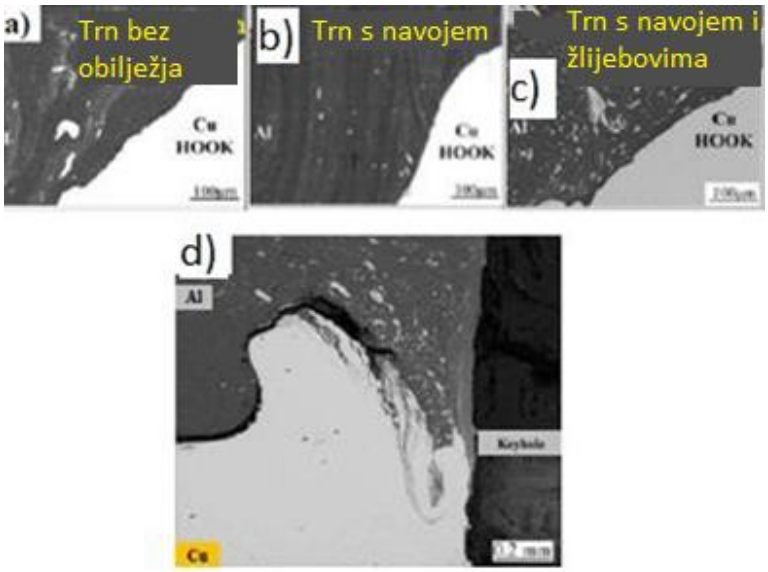
Slika 22. Tok materijala i karakteristična zona (OZ) ZTRA postupka [11]

Prema Al-Cu binarnom faznom dijagramu prikazanom na slici 23, postoje 6 različitih stabilnih faza na temperaturama ispod 500 °C. Od tih faza tipične faze koje se javljaju prilikom zavarivanja trenjem su (Al_2Cu, AlCu i Al_4Cu_9). Zbog termalnog ciklusa zavarivanja ZTRA postupka i žestokog plastičnog toka materijala u međusloju spoja dolazi do različitih stupnjeva topljivosti i difuzije Al i Cu, što utječe na formiranje i razvoj intermetalnih spojeva u korijenu zavara odnosno na nehomogenost zavara. Prilikom formiranja intermetalnih spojeva, malena količina intermetalnih spojeva se odvaja i raspršuje te pod utjecajem tlaka i smičnih sila uzrokovanih plastičnim tokom materijala formira diskontinuirani izmiješani intermetalni sloj. Ovaj fenomen je posebice izražen prilikom zavarivanja s izrazito niskim unosom topline što i jest slučaj kod ZTRA postupka. Pod optimalnim parametrima zavarivanja moguće je stvoriti homogeni kontinuirani intermetalni sloj značajne debljine što bi dodatno poboljšalo mehanička svojstva zavara [11].



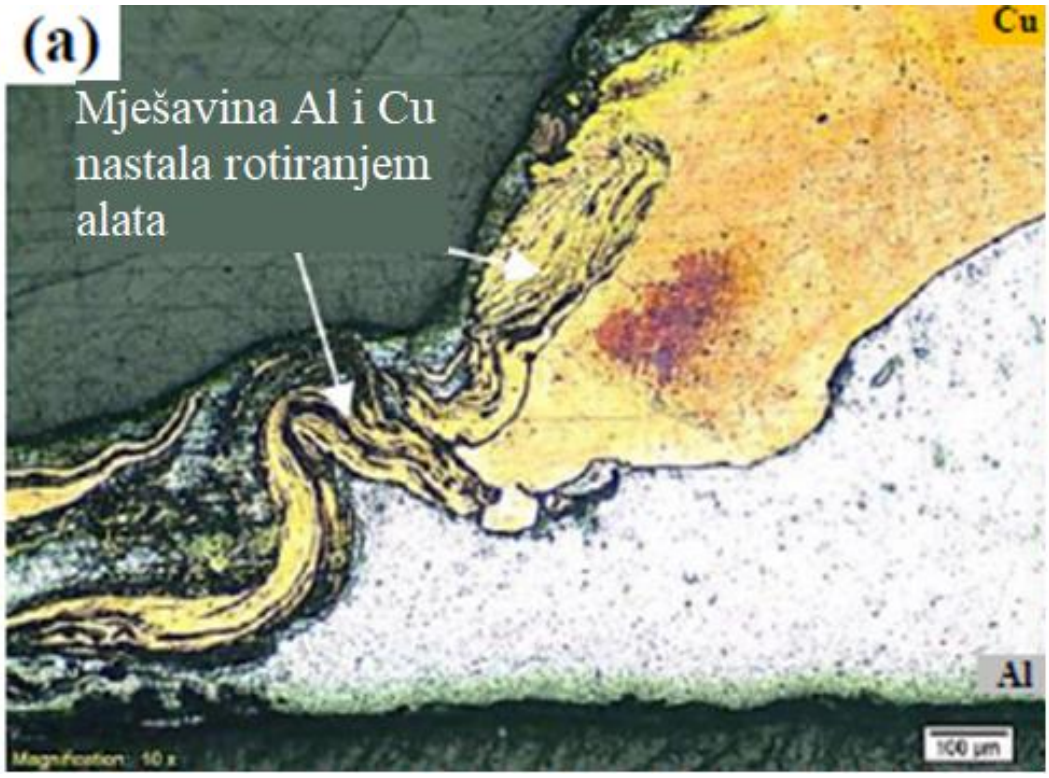
Slika 23. Al-Cu binarni fazni dijagram [11]

Mikrostruktura aluminijske strane spoja se uglavnom sastoji od matrice Al i ekstrudiranih čestica Cu i Al-Cu intermetalnih spojeva. Prisutnost ovih čestica čini mikrostrukturu aluminijske strane kompleksnom i nepravilnom. Plastični tok materijala uzrokovan geometrijskim karakteristikama alata ima direktan utjecaj na mikrostrukturu Al strane. Na slici 24 su prikazane različite mikrostrukture zavara Al i Cu postignute korištenjem alata različite geometrije.



Slika 24. Mikrostruktura Al strane postignuta različitim geometrijama alata: a) - Alat bez obilježja, b) – Trn s navojem, c) – Trn s navojem i žlijebovima, d) – Mikrostruktura u neposrednoj blizini „ključanice“ zavara [11]

Što je veća izmiješanost čestica bakra unutar aluminijske matrice to će čvrstoća zavarenog spoja biti veća. Kao što je prikazano na slici 24, najveća izmiješanost se postiže s trnom koji ima navoj i žlijebove. Takvi alati su slični Whorl™ alatima prikazanim na slici 15. Kod spojeva Al i Cu zbog mekanijih karakteristika Al naspram Cu, Cu lako prodire u unutrašnjost Al ploče i teško je postići prodiranje Al u Cu matricu. Iz tog razloga je Cu strana materijala relativno čista, bez očitih promjena u mikrostrukturi. Uz granični sloj Cu matrice u neposrednoj blizini zavarenog spoja se nalazi intermetalni sloj u vrtložnom obliku koji je prikazan na slici 25.

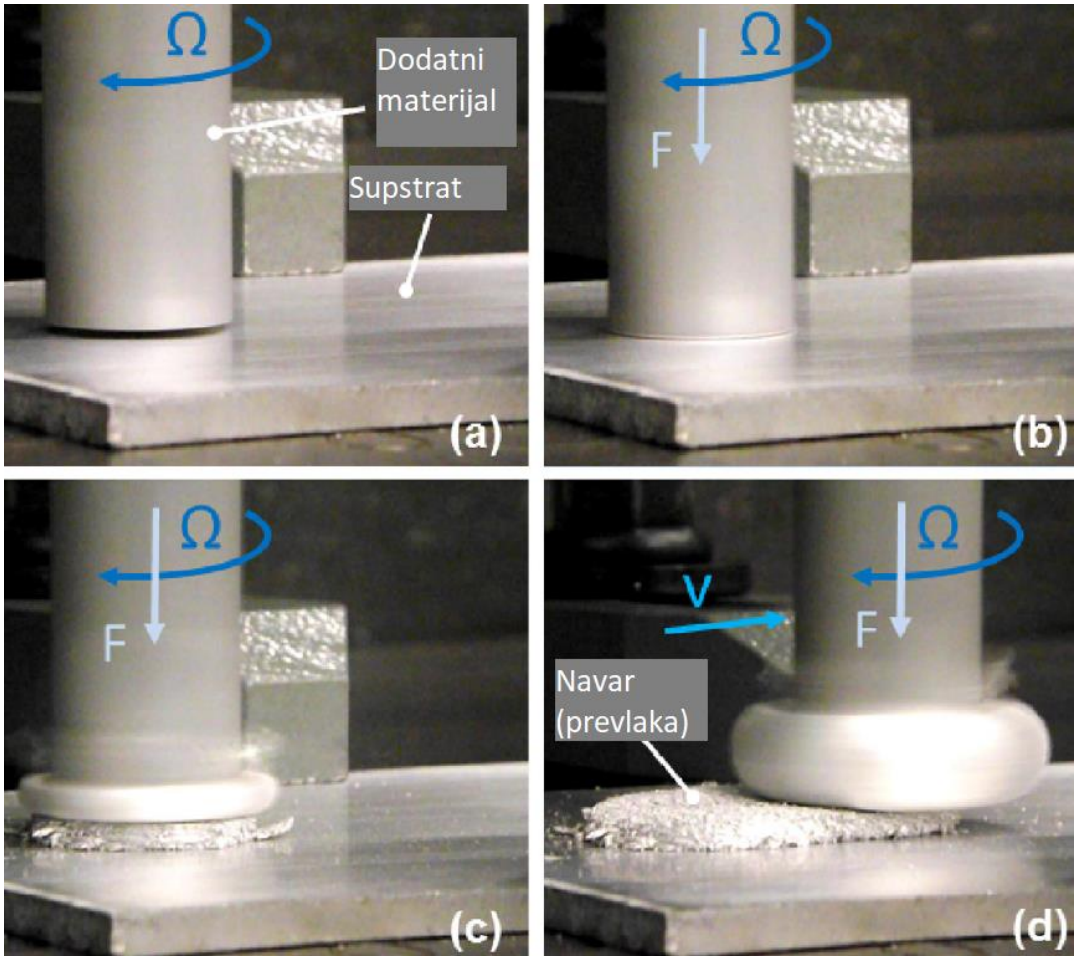


Slika 25. Mikrostruktura Al i Cu spoja s prikazanim vrtložnim slojem intermetalnih spojeva [11]

3.4. Navarivanje trenjem

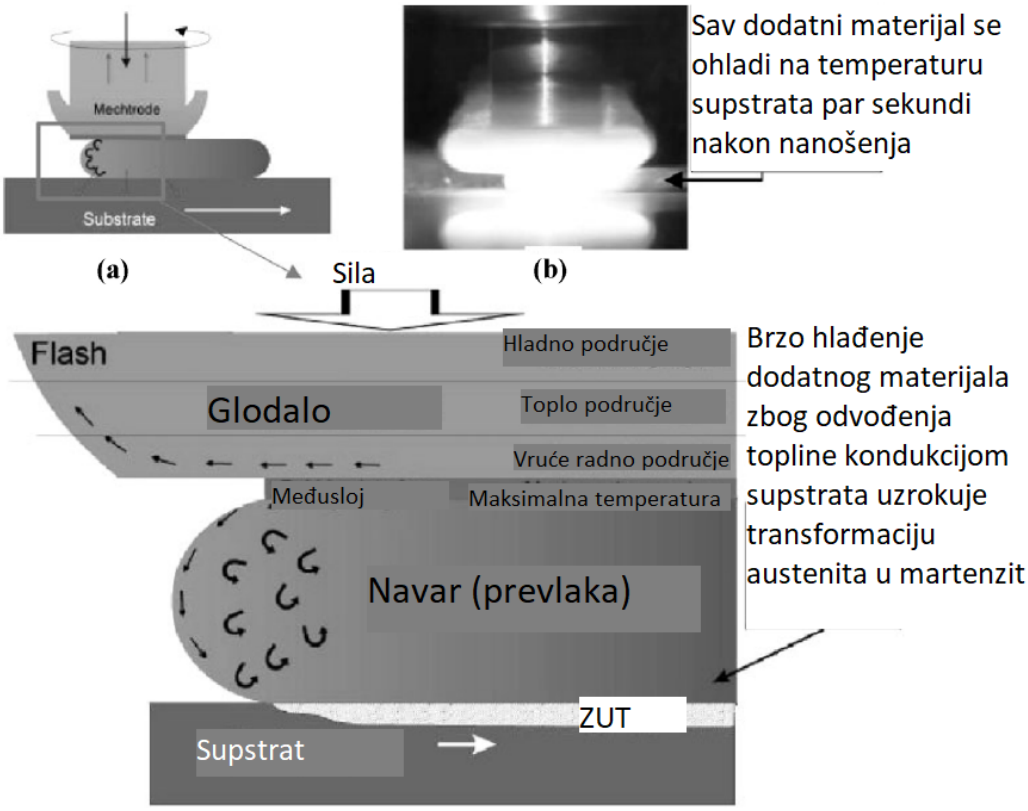
Navarivanje je postupak zavarivanja pri kojem se taljenjem dodatnog materijala u elektrodama nanosi sloj na površinu osnovnog materijala. Sloj uglavnom ima ulogu prevlake te on daje osnovnom materijalu veću otpornost na koroziju i trošenje jer upravo naneseni dodatni materijal ima svojstva visoke tvrdoće i korozijske postojanosti. Česti primjer materijala koji se koristi kao zaštitni sloj kod navarivanja jest nikal (Ni) koji može podnijeti visoke temperature te sporo oksidira što ga čini kemijski stabilnim elementom otpornim na koroziju. Međutim cijena nikla je relativno visoka u odnosu na sve vrste čelika te se on stoga ne primjenjuje za konstrukcijske svrhe već se ekonomičnije koristi u smislu legiranja s čelikom i ukoliko je to potrebno navaruje se na površinu čelika kako bi mu dao zaštitu i poboljšana svojstva površine. Navarivanje

trenjem je postupak navarivanja u kojem se ne koriste elektrode i dodatni i osnovni materijal se ne tale već se spajaju u krutom agregacijskom stanju. U ovom postupku toplina se dobiva trenjem između rotirajućeg dodatnog materijala i osnovnog materijala. Pri povišenim temperaturama koje su i dalje niže od tališta dvaju materijala dolazi do prelaska u stanje izrazite duktilnosti te je pri takvim uvjetima pod utjecajem tlaka moguće oformiti metalne veze između molekula u krutom agregacijskom stanju. U postupku se na glodalicu montira glodalo od dodatnog materijala cilindričnog oblika koje je namijenjeno za trošenje. Tokom postupka se preko dodatnog materijala vrši aksijalna sila na površinu osnovnog materijala i uslijed vrtnje glodala se generira toplina zbog trenja. Toplina kondukcijskim mehanizmom prelazi na osnovni materijal te se stvara viskozno-plastični granični sloj na vrhu glodala. Uvjeti visokog tlaka i temperature omogućuju difuziju te se formiraju metalne veze između graničnog sloja i osnovnog materijala. Translacijskim kretanjem glodala uzduž površine osnovnog materijala stvara se navar. Tokom procesa dolazi do ubrzanog trošenja glodala te se ono zamjenjuje po potrebi. Zbog trošenja alata cilindričnog oblika glodalo uslijed uporabe dobiva karakterističnu geometriju klobuka gljive. Postupak navarivanja trenjem prikazan je na slici 26.



Slika 26. Postupak navarivanja trenjem aluminijske legure [12]

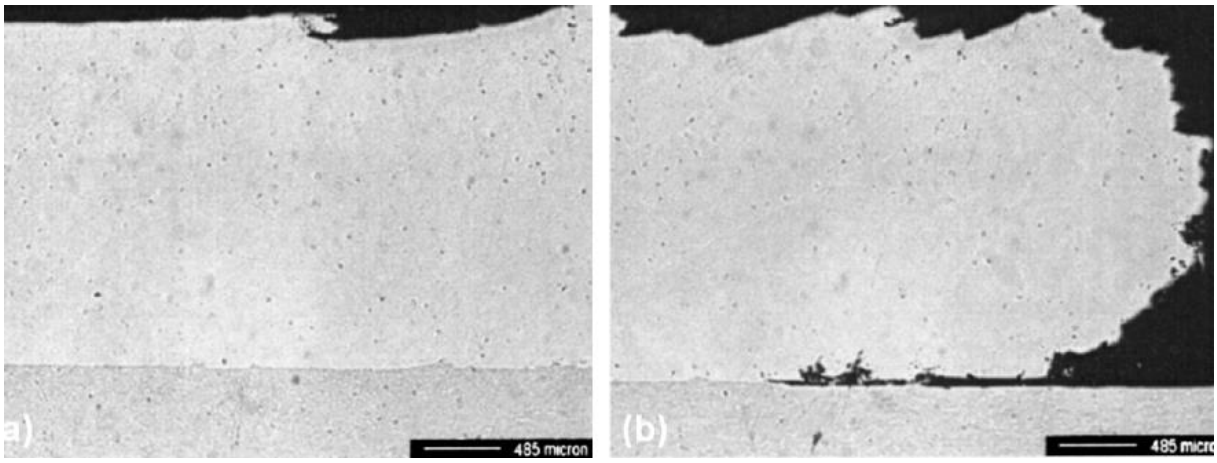
Prilikom navarivanja trenjem na glodalo dodatnog potrošnog materijala djeluju 3 opterećenja. Tlačna sila glodalice djeluje aksijalno kroz os vrtnje glodala te ona uzrokuje tlačna naprezanja na omekšanom i odstranjenom sloju dodatnog materijala. Na glodalo također djeluje i okretni moment elektromotora koji pogoni glodalo te se reaktivno uslijed kontakta glodala sa osnovnim materijalom javlja moment trenja koji ima jednak iznos i suprotan smjer okretnom momentu. Uslijed djelovanja dvaju momenata suprotnih smjerova javlja se torzijsko naprezanje zbog kojeg se dodatni materijal odvaja upravo tamo gdje mu je vlačna čvrstoća najmanja. Toplina uzrokovana trenjem stvara temperaturni gradijent uzduž aksijalne osi glodala. Temperaturni gradijent određuje razinu omekšanja materijala odnosno gubitka vlačne čvrstoće, a budući da je temperatura najviša na kontaktnim točkama između glodala i osnovnog materijala na tim mjestima materijal najviše omekšava te gubi na vlačnoj čvrstoći i pod utjecajem torzijskog naprezanja dodatni materijal se plastično deformira i odvaja i pod utjecajem tlaka formira metalne veze sa osnovnim materijalom. Na slici 27 je ilustriran mehanizam navarivanja trenjem zajedno sa različitim slojevima koji se javljaju tijekom ovog procesa.



Slika 27. Ilustracija nanošenja dodatnog materijala navarivanjem trenjem na osnovni materijal [12]

Tokom navarivanja trenjem dolazi do međusobnog klizanja slojeva dodatnog materijala koje je omogućeno zbog razlike u brzinama vrtnje glodala i nanešenog viskozno-plastično deformiranog sloja [12].

Navari izvedeni postupkom trenja obično imaju superiorna mehanička svojstva naspram navara proizvedenih elektrolučnim postupcima jer se u postupku navarivanja trenjem stvara fina zrnata struktura i viskozno-plastični granični sloj može popuniti i prekriti eventualne mikropukotine na površini osnovnog materijala pod utjecajem visokih tlačnih sila. Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja to često nije moguće zbog napetosti površine rastaljenih kapljica metala koja održava oblik kapljice i sprječava njeno razlijevanje i popunjavanje spomenutih pukotina. Na slici 28 je prikazan poprečni presjek navara sačinjenog od austenitnog nehrđajućeg čelika EN 1.4401 nanešenog na osnovni materijal od feritnog čelika [12].



Slika 28. Poprečni presjek navara austenitnog nehrđajućeg čelika EN 1.4401 nanešenog preko osnovnog materijala feritnog čelika [12]

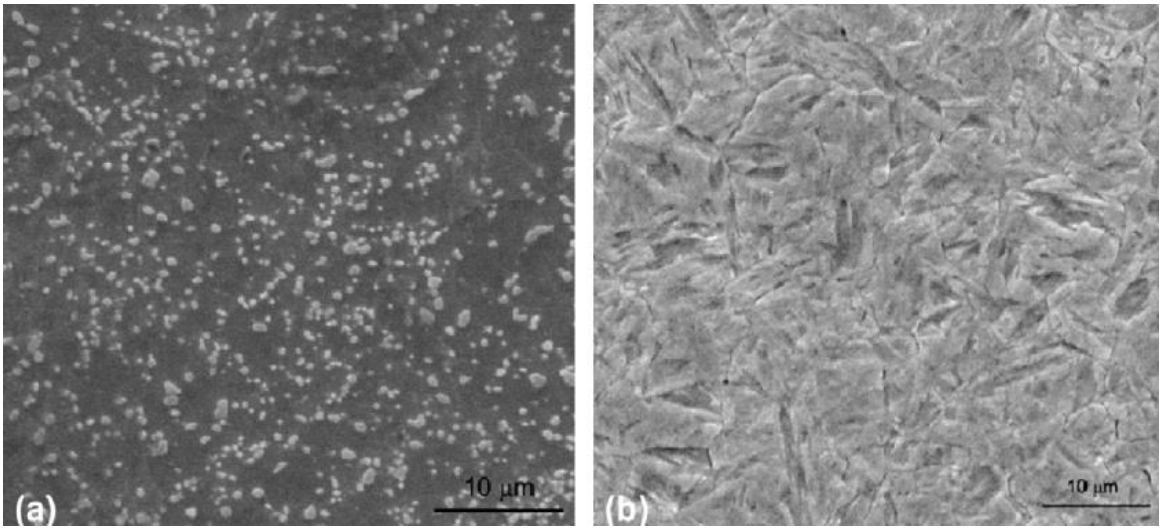
Na slici 28 se jedva može vidjeti granica između dvaju materijala dok je na b) dijelu slike prikazan krajnji dio navara koji se uslijed toplinske deformacije i prestanka dijelovanja tlačne sile nadigao te nije u potpunosti spojen sa osnovnim materijalom. Tokom navarivanja trenjem važno je uzeti u obzir fenomen nepotpunog prijanjanja dodatnog materijala na osnovni materijal. Naime, tokom navarivanja trenjem širina navara jednaka je promjeru glodala dodatnog materijala. Međutim, širina stvarnog spoja dodatnog materijala sa osnovnim materijalom je nešto manja od promjera glodala zato što kretanje viskozno-plastičnog graničnog sloja nije bočno ograničeno zbog čega on putuje prema van. Glodalo koje uslijed trošenja poprima geometrijski oblik klobuka gljive ne pritišće materijal jednako po svom promjeru upravo zbog svojeg oblika što znači da su tlačne sile slabije na točkama koje su radijalno udaljenije od centra osi rotacije alata. Zbog manjih tlačnih sila nanešeni materijal nije

u potpunosti spojen sa osnovnim materijalom kao što je to slučaj sa centrom navara. Ukoliko se proračunava čvrstoća nanešenog navara potrebno je uzeti u proračun površinu koja je nešto manja od realne površine navara [12].

3.4.1. Mikrostruktura u postupku navarivanja trenjem

Kao što je već prethodno opisano, navarivanje trenjem se postiže preko prelaska materijala u viskozno-plastično stanje što podrazumijeva dinamičnu rekristalizaciju zrna. Tijekom nanošenja dodatnog materijala na osnovni materijal, hlađenje se odvija preko radijacije topline na okolinu, konvekcijskog prijenosa topline na okolni zrak i kondukcije odnosno povlačenja topline preko osnovnog materijala. Takav mehanizam hlađenja se može odvijati u vremenskom rasponu od nekoliko sekundi što uzrokuje stvaranje veoma finih zrna i homogene prevlake. Ovisno o vrsti dodatnog materijala glodala i njegovoj kemijskoj kompoziciji, i druge transformacije se mogu odvijati uslijed toplinskih efekata navarivanja trenjem poput transformacije faza ili modifikacije kristalne rešetke [12].

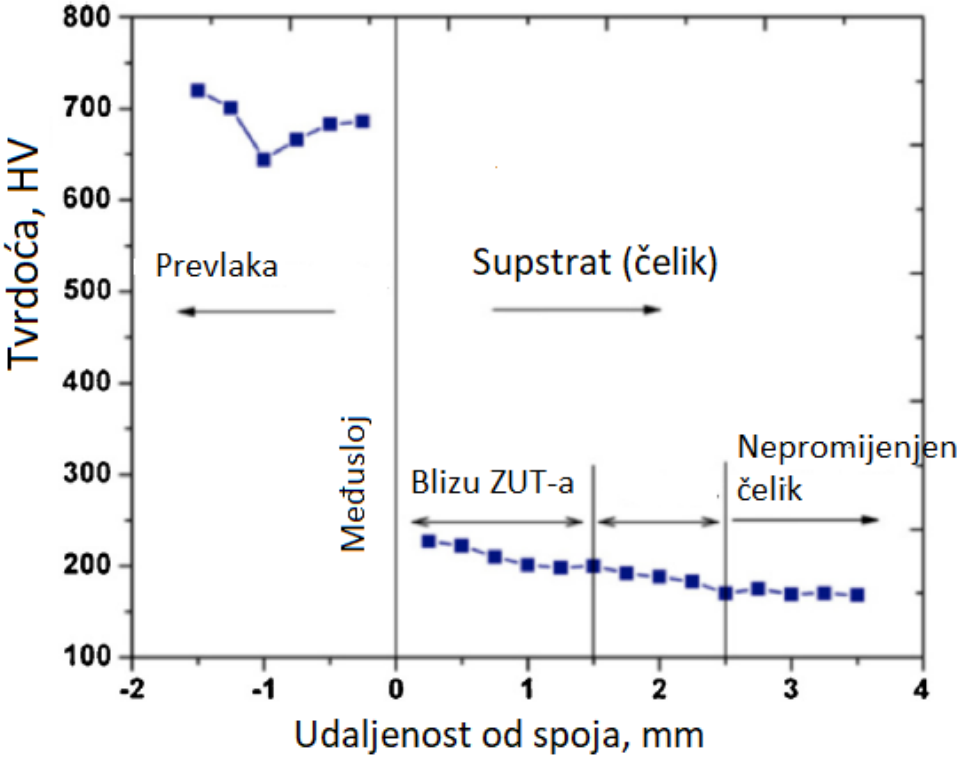
Kod korištenja čelika za navarivanje, događa se potpuna austenitizacija mikrostrukture jer je za prijelaz u viskozno-plastično stanje potrebno preći iz prostorno centrirane kristalne rešetke (BCC) u plošno centriranu kristalnu rešetku (FCC) kakvu ima austenit. Kod navarivanja čelika postižu se temperature od 1020 °C što omogućuje potpunu austenitizaciju i otapanje karbida. Stopa hlađenja nakon što glodalo prođe mjerno mjesto iznosi 400 °C/s što uzrokuje transformaciju austenitnih zrna u martenzitna. Tokom procesa je zabilježena 0,5 mm duboka zona utjecaja topline (ZUT). Transformacija faza čelika tokom navarivanja trenjem prikazana je na slici 29.



Slika 29. Razlika u mikrostrukturi navarenog čelika prije (a) i poslije (b) navarivanja [12]

Izmjerena tvrdoća nanešenih prevlaka čelika iznosila je 740 HV što je povećanje tvrdoće od 190 % naspram tvrdoće koju je čelik imao na glodalu prije navarivanja. Povišenje tvrdoće se objašnjava transformacijom mikrostrukture iz austenita u martenzit. Veličina zrna se također smanjila sa 50-60 μm na 2-10 μm [12].

Slika 30 prikazuje profil tvrdoće od vrha navara sve do nepromijenjenog dijela osnovnog materijala.



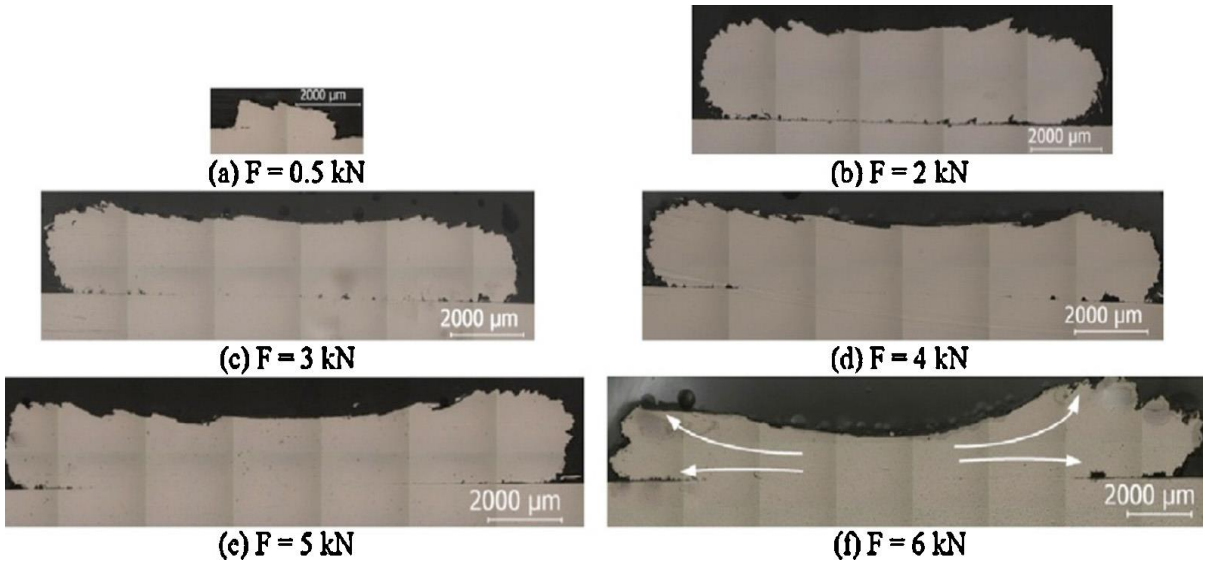
Slika 30. Profil tvrdoće nakon navarivanja trenjem [12]

Kao što se može vidjeti, tvrdoća je najviša upravo na samoj površini navara gdje iznosi oko 750 HV dok je tvrdoća osnovnog materijala ispod međusloja bitno manja te iznosi svega 250 HV.

3.4.2. Parametri navarivanja trenjem

Procjena prevlake temelji se na njenoj debljini, širini i čvrstoći veze sa osnovnim materijalom. Svi navedeni čimbenici su blisko povezani sa parametrima navarivanja trenjem. Faktori poput debljine osnovnog materijala, promjer glodala i vrsta dodatnog materijala, brzina vrtnje i translacije glodala i aksijalna sila kroz glodalo imaju direktan utjecaj na ishode odnosno kvalitetu navara. U praksi postoje dva načina za definiranje brzine trošenja glodala i vršenog tlaka na osnovni materijal. To je moguće izvršiti na način da se kontrolira aksijalna sila glodala ili da se kontrolira posmična brzina glodala (brzina usmjerena okomito na osnovni materijal). Prvi način je mnogo skuplji jer su za njega potrebni precizni senzori sile koji se moraju

implementirati u glodalo. Alternativno rješenje tog problema je da glodalo bude statično u prostoru te da se vrši konstantna sila preko radnog stola na kojem je osnovni materijal, no međutim to je također skupo rješenje. Stoga se metode mjerenja sile koriste samo u istraživačke svrhe te im nije mjesto u industrijskoj primjeni. Kontroliranjem posmične brzine, što je u načelu lagano postizljivo na modernim CNC strojevima, postignuta sila je posljedica tog gibanja, a ne kontrolirani parametar. Takav način određivanja sile preko brzine posmičnog gibanja smanjuje troškove i pogodan je za industrijsku primjenu. Sila je važan parametar jer ona određuje kvalitetu odnosno čvrstoću navara na osnovni materijal. Na slici 31 je prikazan presjek navara čelik/čelik napravljen pod različitim silama.

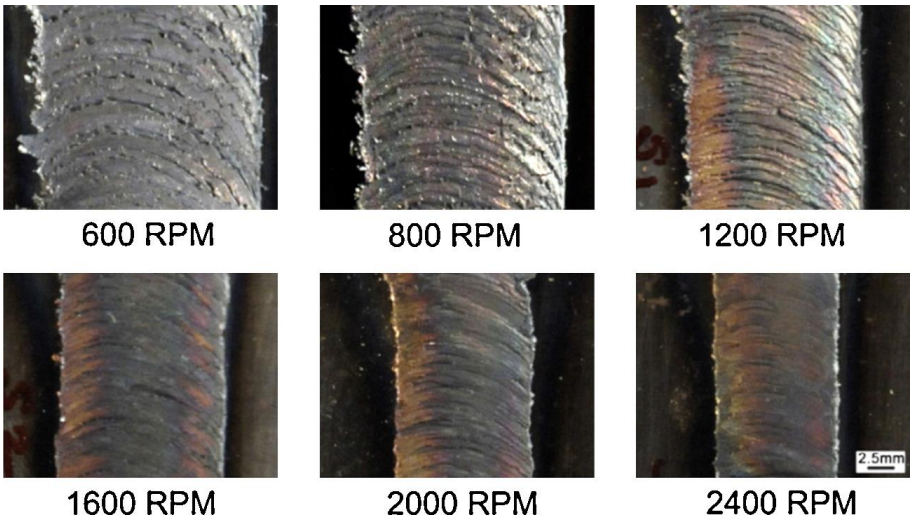


Slika 31. Efekt aksijalne sile na kvalitetu spoja navarenog čelika korištenjem glodala promjera 10 mm [12]

Prikazani uzorci napravljeni su s glodalom promjera 10 mm od niskougljičnog čelika. Brzina vrtnje glodala iznosila je 2500 min^{-1} dok je translacijska brzina glodala odnosno brzina navarivanja iznosila 4,2 mm/s. Pri manjim aksijalnim silama navar nije u potpunosti spojen sa osnovnim materijalom, tek u rasponu sila od 3 kN započinje lokalizirano prijanjanje na osnovni materijal. Kod većih sila spojena površina je sve veća, no kod sila većih od 5 kN dolazi do savijanja navara zbog toga što je donji sloj navara ohlađen i ima nižu temperaturu. Zbog niže temperature donji sloj ima veću čvrstoću dok je gornji sloj i dalje u viskozno-plastičnom stanju i pod utjecajem tlačnih sila glodala on se deformira. Kod prekomjernih sila također dolazi do neujednačenog nanošenja materijala [12].

Brzina vrtnje glodala utječe na kvalitetu spoja, efektivnu širinu navara i njegovu hrapavost. Niže i srednje brzine vrtnje poboljšavaju kvalitetu spoja, dok pretjerane brzine vrtnje mogu dovesti do smanjenja efektivne širine navara i povećati ZUT na osnovnom materijalu. Povećane

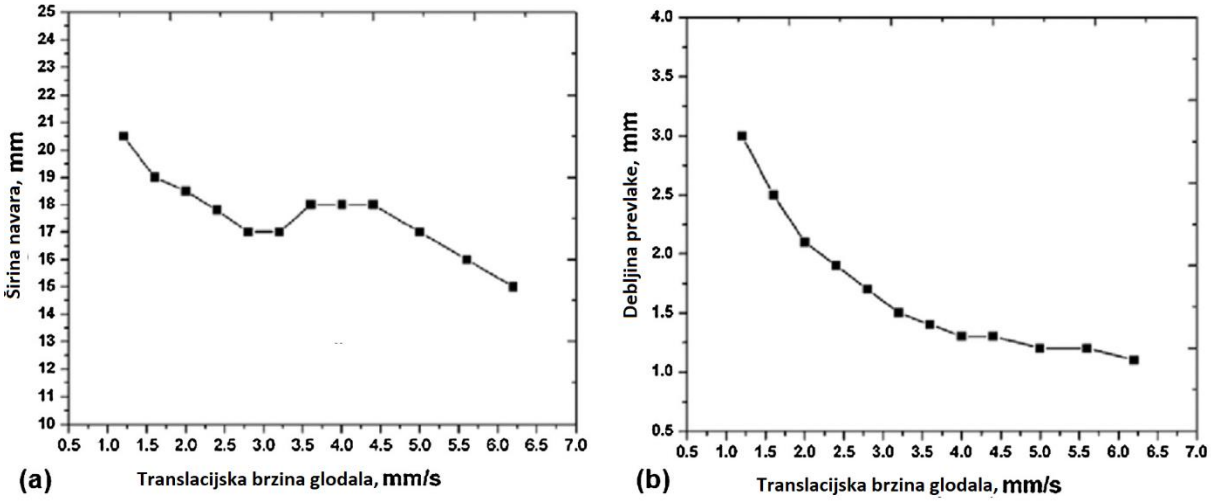
brzine također uzrokuju manju hrapavost površine. Na slici 32 su prikazani uzorci navara napravljeni sa glodalom promjera 18 mm koje se kretalo brzinom od 4 mm/s. Na glodalo je vršena aksijalna sila u iznosu od 10 kN. Uzorci su napravljeni pri brzinama vrtnje od 600, 800, 1200, 1600, 2000 i 2400 min^{-1}.



Slika 32. Efekt brzine vrtnje na hrapavost i širinu navara [12]

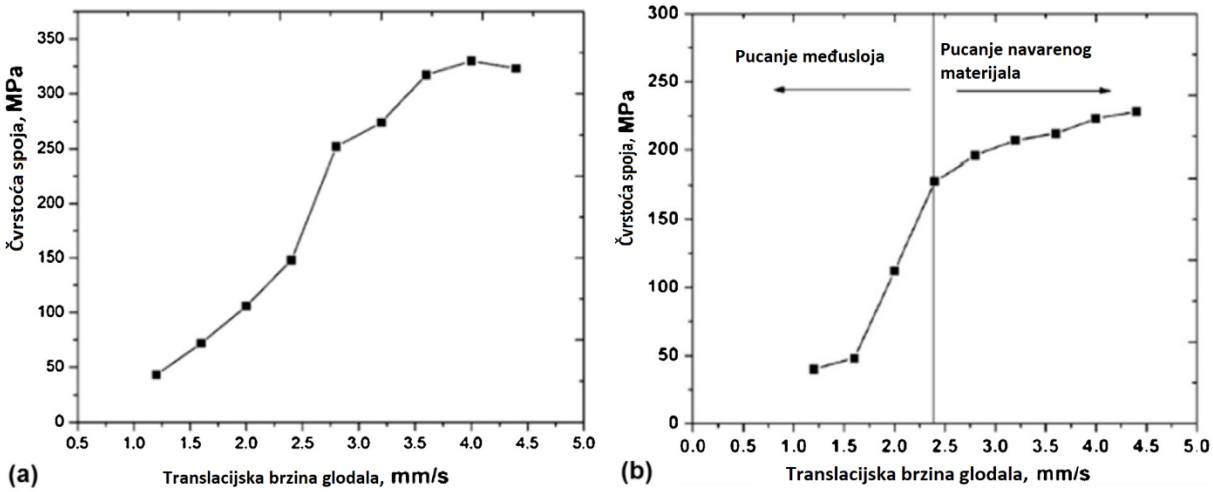
Slika 32 jasno pokazuje smanjenje širine navara s porastom brzine vrtnje. Hrapavost površine opada s porastom brzine vrtnje jer pri većim brzinama vrtnje dolazi do efekta poliranja navara.

Posljednji parametar koji određuje kvalitetu navara je translacijska brzina glodala. Ona iznimno utječe na debljinu i širinu prevlake budući da je brzinom kretanja glodala određena stopa nanošenja dodatnog materijala na osnovni materijal. Stoga, povišene brzine kretanja glodala uzrokuju smanjenje debljine prevlake i manju širinu navara. Povećanje brzine kretanja do određene mjere dovodi do porasta u čvrstoći spoja. Veza između debljine i širine navara s brzinom navarivanja je prikazana na slici 33.



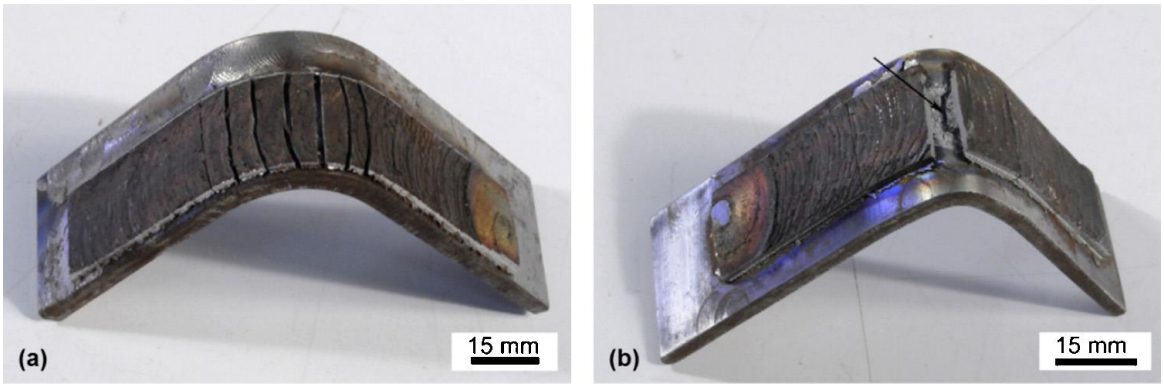
Slika 33. Ovisnost širine i debljine navara s brzinom navarivanja [12]

Na slici 34 je prikazana veza između čvrstoće spoja i brzine navarivanja. Porastom brzine navarivanja do vrijednosti od 3,7 mm/s dolazi do rasta čvrstoće spoja te ona poprima svoj maksimum na brzini od 4 mm/s nakon čega kreće blago opadati. Graf sa slike 34 također pokazuje dva područja brzine navarivanja u kojima se razlikuju dva načina pucanja navara. Pri brzinama manjim od 2,5 mm/s će navar najprije puknuti u području međusloja odnosno području spoja sa osnovnim materijalom dok će pri većim brzinama navarivanja navar najprije puknuti na svojoj vanjskoj površini [12].



Slika 34. Veza između brzine navarivanja i čvrstoće spoja alatni čelik 1.2344/niskougljični čelik [12]

Na slici 35 su prikazana dva moguća načina pucanja navara. Navarivanje se vršilo pri različitim brzinama. Za dodatni materijal koristio se alatni čelik 1.2344 koji se nanosio na niskougljični čelik. Brzina vrtnje glodala iznosila je 800 min^{-1} te je ono imalo promjer od 18 mm. Vršena aksijalna sila iznosila je 10 kN. Na a) dijelu slike 35 se vidi da je do pucanja došlo na površini navara dok je na b) dijelu slike došlo do pucanja veze navara sa osnovnim materijalom [12].



Slika 35. Načini pucanja na testu savijanja depozita alatnog čelika 1.2344 nanešenog preko niskougljičnog čelika: a) pucanje navara i b) pucanje spoja [12]

4. ZAVARIVANJE TRENJEM AL-CU SPOJEVA

Omjer električne vodljivosti sa gustoćom je dva puta veći za Al u odnosu na Cu. Kad se uzima u obzir cijena i težina dijelova, iako Al ima manju vodljivost, on je primamljiva alternativa za zamjenu nekih Cu dijelova u sustavu za prijenos električne energije. Al i Cu su nekompatibilni metali jer imaju visok uzajamni afinitet pri temperaturama većim od 120 °C i stvaraju nekoliko različitih zajedničkih faza u njihovom spoju. Te krhke intermetalne faze imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva, proizvodljivost i pouzdanost Al-Cu spojeva. Velika prednost zavarivanja trenjem je što traje relativno kratko i konzumira malo energije, no spajanje metala se postiže u uskom rasponu parametara zavarivanja pa je stoga lako preuveličati vrijednosti parametara što može dovesti do pojave intermetalnih faza koje utječu na električnu vodljivost i mehanička svojstva [13].

4.1. Parametri zavarivanja RZT postupka

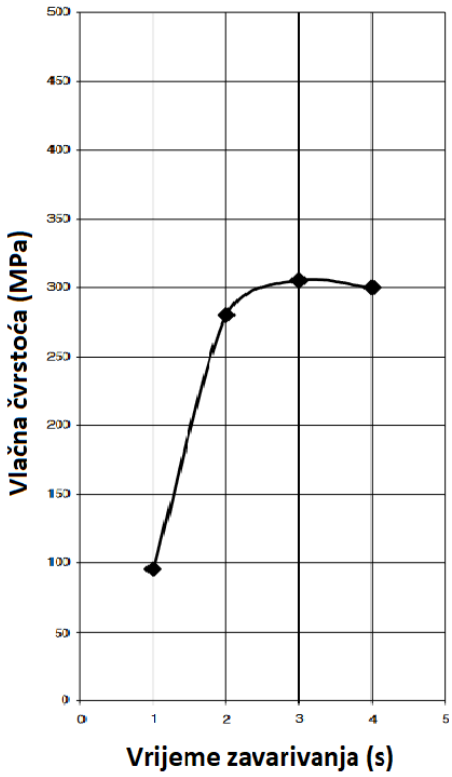
RZT postupak se provodi u nekoliko faza. Postoji nekoliko različitih izvedba tog postupka, no uobičajen način je da se obratci montiraju na tokarski CNC stroj gdje je jedan obradak statičan te mu je omogućeno aksijalno gibanje, dok je drugi dio pomičan odnosno omogućena mu je rotacija oko aksijalne osi. Postupak započinje vrtnjom pomičnog obratka i aksijalnim primicanjem statičnog obratka pri čemu dva dijela ulaze u kontakt i između njih nastaje radni tlak uslijed trenja. Uslijed dijelovanja radnog tlaka dijelovi formiraju zavareni spoj te nakon toga vrtnja prestaje te se naposlijetku primjenjuje tlak sabijanja pri kojem se statični obradak dodatno gura aksijalno te osigurava čvrstoću spoja. U postupku se razlikuju 4 parametara: vrijeme zavarivanja, radni tlak ili tlak trenja, tlak sabijanja i brzina vrtnje [13].

4.1.1. Vrijeme zavarivanja

Vrijeme zavarivanja je iznimno bitan parametar jer ga je potrebno odrediti što točnije za postizanje kvalitetnog zavara. Premalo vrijeme zavarivanja dovodi do preniskog unosa topline zbog kojeg ne dolazi do plastičnog tečenja metala te se spoj ili ne formira ili ima prenisku čvrstoću. Preveliko vrijeme zavarivanja dovodi do pretjeranog trošenja materijala i prevelikog unosa topline zbog kojeg može doći do stvaranja intermetalnih faza u zoni zavara koje mijenjaju električnu vodljivost i uzrokuju krhkost u području zavara. Vrijeme zavarivanja također ujteče na količinu intermetalnih spojeva koji sami po sebi utječna na mehanička svojstva zavara. Na slici 36 su prikazani uzorci Al i Cu zavareni pri različitim vremenima postupka te se na slici vidi kako količina istisnutog materijala raste s vremenom zavarivanja i kako je gotovo sav istisnut materijal Al zbog veće duktilnosti i nižeg modula elastičnosti [13].

Slika 36. Uzorci Al i Cu pod različitim vremenom zavarivanja [13]

Na slici 37 je utjecaj vremena zavarivanja na vlačnu čvrstoću 5083 Al gdje se vidi da ona počinje opadati pri vremenima zavarivanja većim od 3 s.

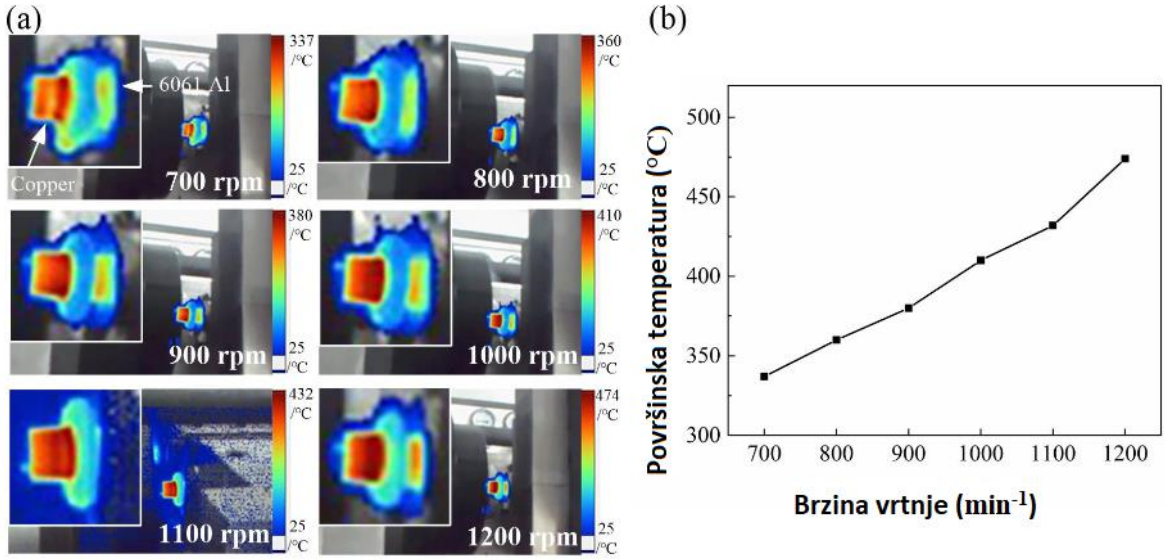


Slika 37. Utjecaj vremena zavarivanja na vlačnu čvrstoću 5083 Al [14]

Idealno vrijeme zavarivanja je veoma teško odrediti jer ono ovisi o materijalu, te u slučaju spajanja dva različita materijala ono može biti drugačije za svaki materijal. Nadalje, vrijeme zavarivanja se dijeli na vrijeme djelovanja radnog tlaka i vrijeme dijelovanja tlaka sabijanja i idealne vrijednosti također mogu biti drugačije za svaki materijal te one ovise i o ostalim parametrima stoga se ovaj parametar najčešće bira iskustveno [14].

4.1.2. Brzina vrtnje

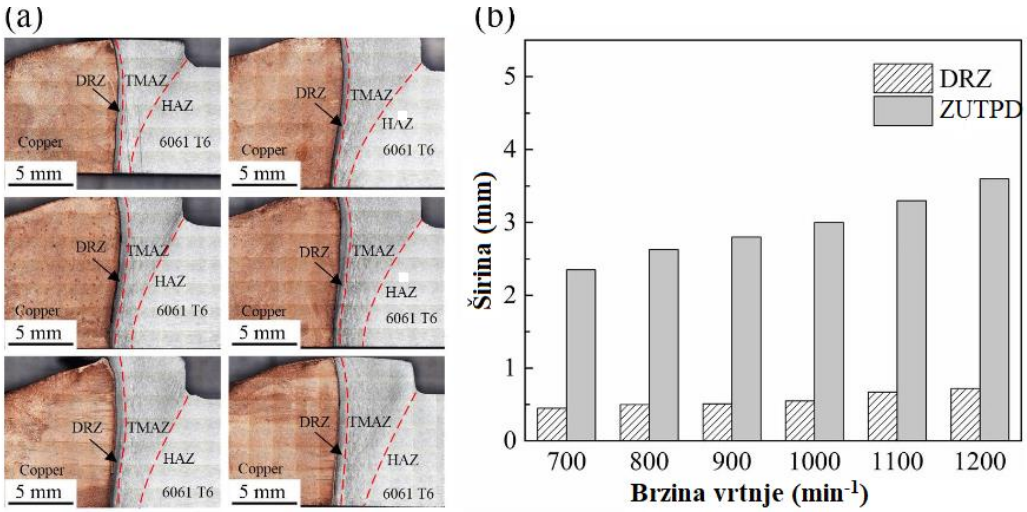
Brzina vrtnje ponajviše utječe na temperaturu obradaka jer se unos topline kod zavarivanja trenjem bazira na pretvorbi kinetičke energije u toplinsku energiju. Budući da veće temperature omogućavaju plastično tečenje materijala i lakšu difuziju, brzina vrtnje određuje mehanička svojstva zavara i njegov kemijski sastav. Na slici 38 je grafički prikazana ovisnost temperature o brzini vrtnje 6061 Al i Cu spoja te termalna slika koja prikazuje raspodjelu temperature pri zavarivanju.



Slika 38. (a) – termalna slika temperaturnog polja; (b) – ovisnost temperature o brzini vrtnje 6061 Al – Cu spoja [15]

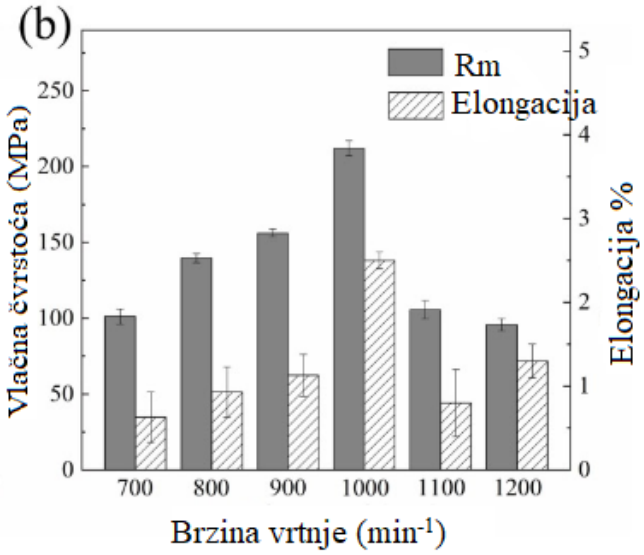
Na grafu sa slike 38 se vidi kako temperatura gotovo linearno raste s porastom brzine vrtnje, a na termalnoj slici valja zapaziti kako je Cu strana zagrijanija jer Cu ima veću toplinsku vodljivost od Al. Brzina vrtnje direktno utječe na žilavost spoja jer se njenim promjenama utječe na veličinu zrna. Prosječna veličina zrna kod Al iznosi 60 μm te se ona smanjuje na 10 μm pri 700 min^{-1} i nastavlja se smanjivati do 1000 min^{-1} do vrijednosti od 4,78 μm. Pri brzinama od 1200 min^{-1} zrna rastu na veličinu od 8,12 μm. Porast zrna se događa zbog prekomjernih plastičnih deformacija zrna koja dovode do njihovih pucanja te dolazi do rekristalizacije na veće promjere. S obzirom na veličinu i oblik zrna, područje zavara se može podijeliti na 3 zone: Zona dinamičke rekristalizacije zrna (DRZ), ZUTPD i ZUT. Na slici 39 je prikazan histogram

širine spomenutih zona i brzine vrtnje. Budući da širina spomenutih zona zapravo ovisi o radijalnim brzinama koje rastu sa porastom promjera, širina zona se mjerila na udaljenosti R/2. Nadalje, optičkim mikroskopom je snimljena širina različitih zona Al-Cu spoja te se jasno vidi da porastom brzine vrtnje dolazi do povećanja širine istih [15].



Slika 39. (a) – Slika snimljena optičkim mikroskopom Al-Cu spoja napravljenih pri različitim brzinama vrtnje; (b) – histogram ovisnosti brzine vtnje i širine toplinskih zona Al strane spoja na udaljenosti od R/2 [15]

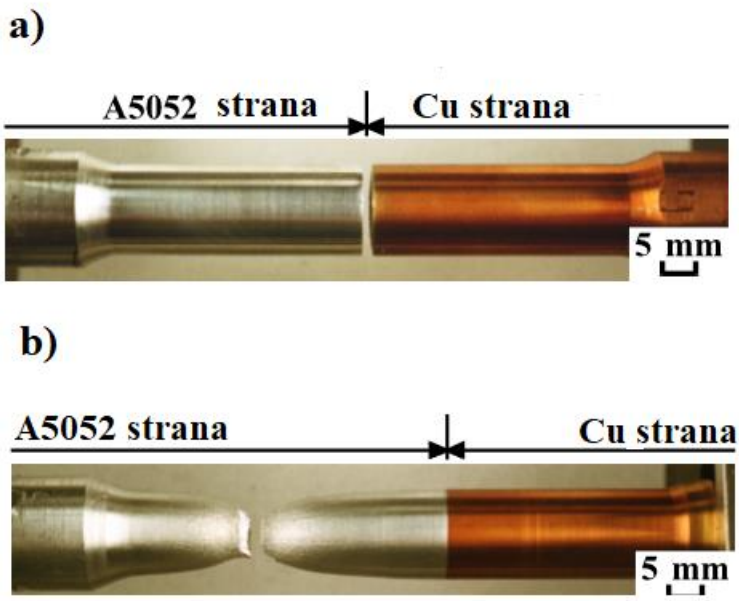
R_m zavara raste s porastom brzine vrtnje sve do 1000 min^{-1} kada dostiže 212 Mpa što je prikazano na slici 40. Nakon toga s daljnjim porastom brzine kreće opadati jer pri tim vrijednostima dolazi do porasta veličine zrna što negativno utječe na mehanička svojstva. Pri porastu brzine vrtnje, unos topline je znatno veći što dovodi do visoke debljine intermetalnih spojeva koji donose krhkost spoja [15].



Slika 40. Ovisnost brzine vrtnje o vlačnoj čvrstoći Al-Cu spoja [15]

4.1.3. Tlak

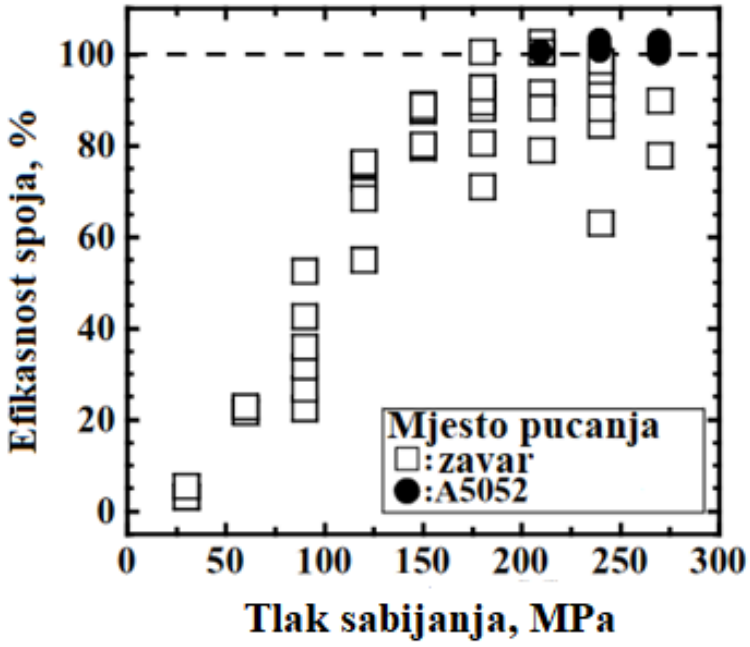
Tlak se u RZT postupku dijeli na tlak trenja koji je obično manji i nastaje uslijed djelovanja aksijalne sile tokom vrtnje obradaka pri zavarivanju i na tlak sabijanja koji se primjenjuje nakon vrtnje kako bi se zavar konsolidirao te je taj tlak puno većeg iznosa. Tlak trenja utječe na stopu trošenja materijala i na unos topline dok tlak sabijanja utječe na konačna mehanička svojstva zavara. Kod zavarivanja trenjem Al i Cu izuzetno je važno postići efikasnost spoja od 100 % koja se definira kao omjer R_m zavara sa R_m od Al. To znači da postignuta R_m zavara mora biti veća od R_m Al i u slučaju visokih naprezanja će doći do pucanja osnovnog materijala legure Al. Ukoliko je efikasnost spoja manja od 100 % dolazi do pucanja zavara. Ukoliko tlak sabijanja nije dovoljno velik, efikasnost spoja će biti manja od 100 %. Na slici 41 su prikazna dva puknuća prilikom testiranja R_m za spoj legure A5052 i Cu. Pod a) je došlo do pucanja zavara koji je napravljen pod tlakom sabijanja u iznosu od 30 MPa dok je pod b) tlak sabijanja iznosio 210 MPa i puknuće se dogodilo na strani A5052 osnovnog materijala. Oba zavara su načinjena pod tlakom trenja od 10 MPa [16].



Slika 41. Razlika u mjestu pucanja zbog primjene različitih tlakova sabijanja za spoj A5052-Cu; a) – 210 MPa; b) – 30 MPa [16]

Na slici 42 je prikazan graf koji pokazuje rezultate testiranja R_m za spojeve A5052 i Cu. Na ordinati je prikazana efikasnost spoja u ovisnosti o primjenjenom tlaku sabijanja. Kvadratima su označeni nezadovoljavajući uzorci odnosno uzorci s efikasnošću spoja manjom od 100 %,

dok su s točkama označeni zadovoljavajući uzorci na kojima je došlo do puknuća osnovnog materijala [16].



Slika 42. Veza između efikasnosti spoja i tlaka sabijanja [16]

Minimalan tlak sabijanja kod kojeg se javlja efikasnost spoja od 100 % iznosi 210 MPa.

4.2. Difuzija intermetalnih spojeva u Al-Cu spojevima nastala RZT postupkom

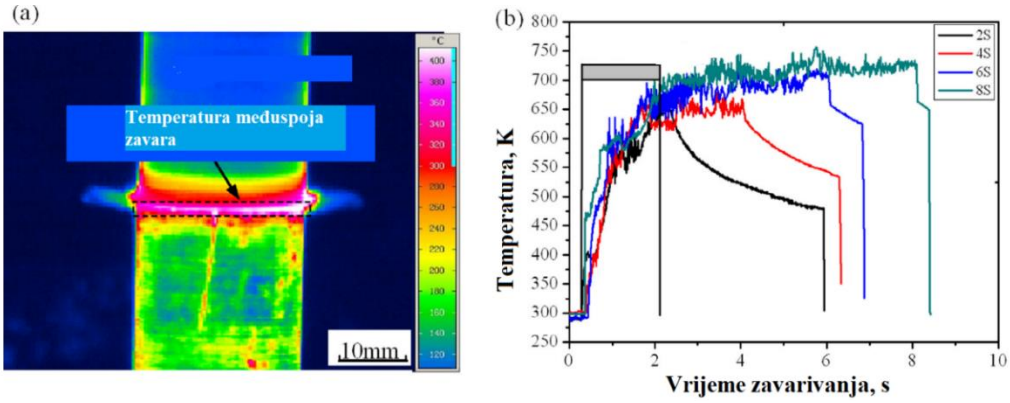
Tokom RZT postupka, ovisno o odabranim parametrima zavarivanja javljaju se temperature između 648 i 723 K. Difuzija se pri tim temperaturama odvija izuzetno brzo što ne čudi s obzirom na difuzijski koeficijent od 7,8 x 10^{-12} m^2/s između Al i Cu atoma. Pomoću XRD i EDS analiza identificirane su intermetalne faze Al_2Cu i Al_4Cu_9 nastale tokom zavarivanja trenjem [13].

4.2.1. Opis pokusa

Za potrebe istraživanja formiranja intermetalnih spojeva tijekom RZT postupka osmišljen je eksperiment u kojem su korišteni Cu sirovci čistoće 99,9 % i Al sirovci čistoće 99,1 %. Uzorci su strojno obrađeni na promjere 20 mm za zavarivanje i 14 mm za stegnuće. Prije zavarivanja, uzorcima je odstranjena tarna ploha kako bi se uklonili oksidi te su uzorci odmašćeni acetonom. RZT postupak je vršen sa konstantnim operativnim tlakom od 19,1 MPa, tlakom sabijanja od 31,8 MPa, brzinom vrtnje od 1900 min^{-1} i različitim vremenima zavarivanja od 2, 4, 6 i 8 s. Površinska temperatura zavarenog spoja je bilježena korištenjem infracrvene termografske kamere (InfraTec VarioCAM®hr head-HS). Zavareni spojevi su naposlijetku snimljeni pomoću SEM-a i XRD tehnologije [13].

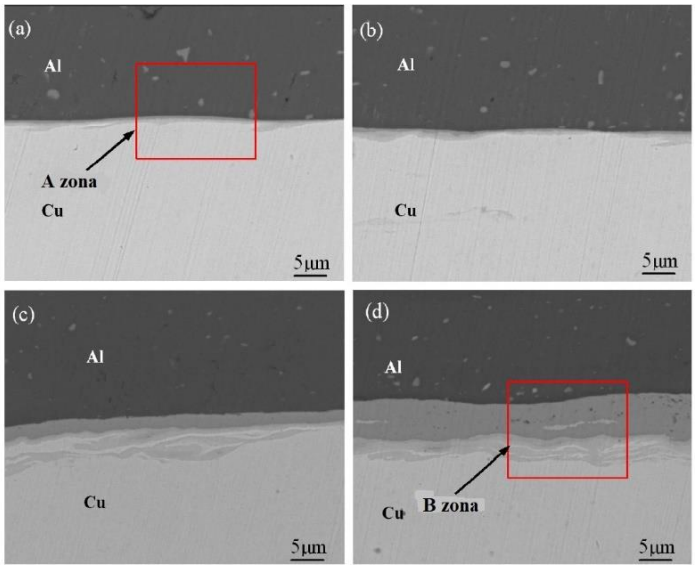
4.2.2. Rezultati i analiza

Budući da Al ima nižu čvrstoću od Cu, Al uzorci imaju veći stupanj plastične deformacije u obliku izbačenog materijala po opsegu uz sam spoj dvaju uzoraka. Temperatura plastično defomirane regije spoja je važan parametar za analizu mikrostrukture, difuzije i formiranje intermetalnih faza. U ovom istraživanju se temperatura zavara mjerila pomoću infracrvene termografske kamere što je prikazano na slici 43. Na slici 43 je također prikazana varijacija maksimalne temperature koja se javlja tokom zavarivanja u ovisnosti o vremenu zavarivanja.



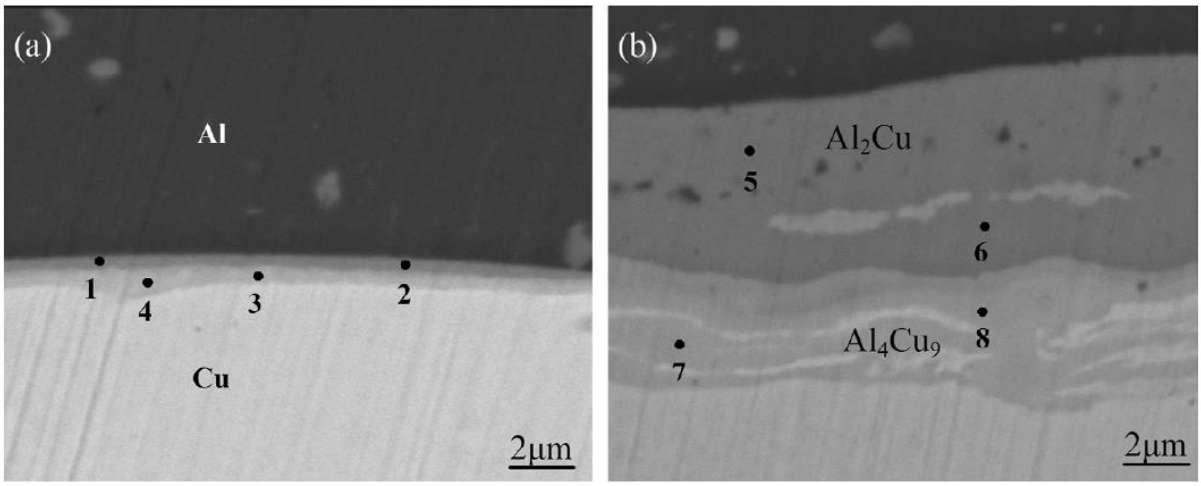
Slika 43. Ovisnost temperature zavara o vremenu zavarivanja [13]

Iz slike se može zaključiti da temperatura zavara ima nepravilnu fazu nakon koje se postiže stabilno stanje temperature. Prosječne temperature u stabilnoj fazi za navedena vremena zavarivanja sa slike su 648±15 K, 665±15 K, 693±15 K i 713±10 K. U provedenom eksperimentu se pokazalo da debljina intermetalnog međusloja eksponencijalno raste s porastom vremena zavarivanja što je prikazano na slici 44.



Slika 44. SEM slika međusloja sa različitim vremenima zavarivanja: a) 2s, b) 4s, c) 6s i d) 8s [13]

Kontinuirani intermetalni međusloj se formira tokom zavarivanja te mu je izmjerena debljina između 0,7 i 10 μm ovisno o vremenu zavarivanja. Na slici 45 su prikazane regije A i B iz slike 44 u uvećanom prikazu te su na njoj naznačene točke od 1 do 8 na kojima se mjerio kemijski sastav intermetalnih spojeva [13].



Slika 45. SEM slika regija A i B sa odabranim točkama od 1 do 8 za mjerenje kemijskog sastava [13]

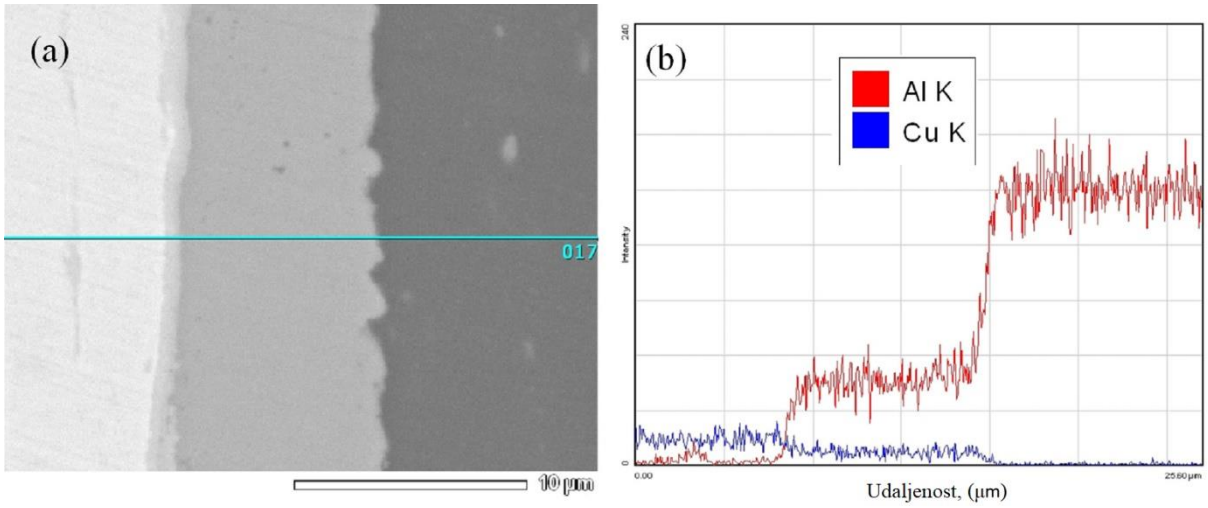
EDS metodom je utvrđena pojava spojeva Al_2Cu i Al_4Cu_9 na točkama 1-8 nastalih u međusloju kao posljedica povećanog unosa topline. U tablici 1 su prikazani kemijski sastavi u spomenutim točkama [13].

Tablica 1. Kemijski sastav točaka 1-8 međusloja zavara [13]

točka	x(Al)/%	x(Cu)/%	n(Al):n(Cu)
1	65.65	34.35	~2:1
2	66.29	33.71	
3	31.87	68.13	~4:9
4	29.71	70.29	
5	67.12	32.88	~2:1
6	64.67	35.33	
7	29.76	70.24	~4:9
8	26.98	73.02	

Iz tablice se da zaključiti da je sloj na Al strani spoja gdje se nalaze točke 1, 2, 5 i 6 sastavljen od Al_2Cu budući da je množinski omjer (n(Al):n(Cu)) približno jednak 2:1 dok je sloj na Cu strani spoja gdje se nalaze točke 3, 4, 7 i 8 sastavljen od Al_4Cu_9 jer je izmjeren množinski omjer (n(Al):n(Cu)) približno jednak 4:9. Tokom zavarivanja trenjem Al i Cu, temperature u međusloju su iznosile između 648 i 723 K. U tom temperaturnom rasponu, Al-Cu fazni dijagram ukazuje na 5 mogućih stabilnih faza, a to su: Al_2Cu, AlCu, Al_3Cu, Al_2Cu_3 i Al_4Cu_9.

Međutim jedine pronađene faze su Al_2Cu i Al_4Cu_9 od kojih se Al_2Cu formira prva. Smatra se da se upravo te dvije faze pojavljuju jer imaju najnižu apsolutnu vrijednost Gibbsove energije koja za temperaturu od 723K za Al_2Cu iznosi -14,16 kJ/mol dok za Al_4Cu_9 iznosi -18,55 kJ/mol. Sve druge moguće faze koje se ne pojavljuju imaju veće apsolutne vrijednosti gibbsove energije. Analitički model predviđa formiranje treće faze AlCu, no ona se ne pojavljuje zbog prekratkog vremena zavarivanja. Na slici 46 je prikazan difuzijski sloj nastao pri odabranom parametru vremena zavarivanja od 8 s [13].



Slika 46. Intenzitet difuzijskog sloja nastalog pri zavarivanju trenjem od 8 s [13]

Nastali difuzijski sloj ima debljinu od 7,9 µm. Na b) dijelu slike su prikazane količine bakra i aluminija raspoređenih po poprečnom presjeku zavara, a koje se nalaze na crti označenoj brojem 017. Iz slike 46 se također vidi da je na Cu strani (lijevo) puno veći postotak Cu što je u korelaciji s pronađenim spojevima Al_4Cu_9 koji nastaju na Cu strani. Na sredini međusloja se vidi povećana količina Al u odnosu na Cu što je u korelaciji s pronađenim spojevima Al_2Cu na Al strani i sredini međusloja. Pošto je Al duktilniji materijal te pri nižim temperaturama postiže stanje trajne plastične deformacije, on se ranije kreće odvajati i miješati što ima za posljedice veće debljine sloja Al_2Cu. Interdifuzijski koeficijent se može izračunati jednostavnom formulom x^2/t gdje je x debljina difuzijskog sloja. Interdifuzijski koeficijent za vrijeme zavarivanja od 8 s i temperaturu od 713 K iznosi $7{,}8 \times 10{-}12 m^2/s$ što je tri reda veličine veće u usporedbi sa difuzijskim koeficijentom pronađenim u literaturi [17] za koje u podacima piše: ($T = 7\ 13$ K, $D_0 = 6{,}5 \times 10{-}5 m^2/s$, Q = 136,1 kJ/mol i $D = 6{,}9 \times 10{-}15 m^2/s$) [13, 17].

5. EKSPERIMENTALNI RAD

Ispitivanje eksperimentalnog rada provedeno je u laboratoriju Katedre za zavarene konstrukcije na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uzorci za ispitivanje od Al i Cu zavarenih spojeva napravljeni su u tvrtci Metal Product d.o.o.

5.1. Izrada uzoraka

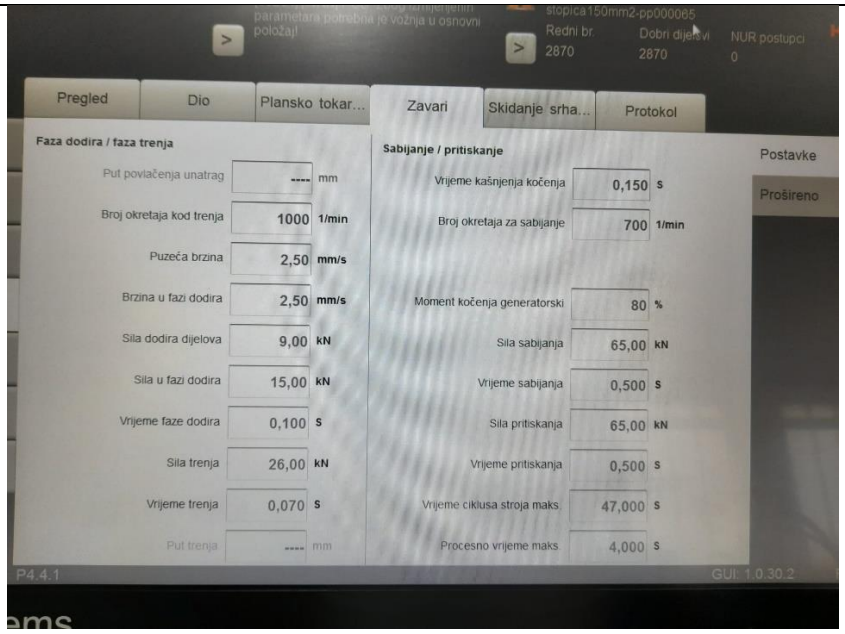
Tvrtka Metal Product d.o.o. proizvodi kabelsku spojnu opremu izrađenu od zavarenih Al-Cu obradaka prikazanih na slici 47.

Slika 47. Cu i Al sirovci namijenjeni za zavarivanje trenjem

Nakon zavarivanja trenjem potrebno je odstraniti nastali srh izbačenog materijala. Zavareni sirovci su prikazani na slici 48.

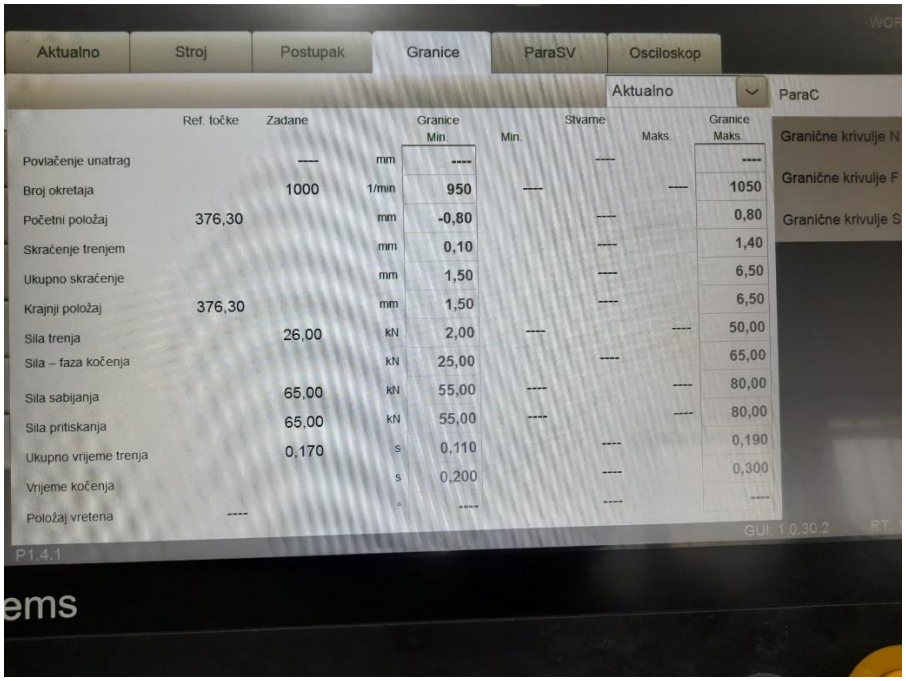
Slika 48. Zavareni Al-Cu sirovci sa srhom izbačenog materijala

Na slikama 49 i 53 su prikazani podešeni parametri na stroju te režimi rada cijelokupnog postupka zavarivanja trenjem.



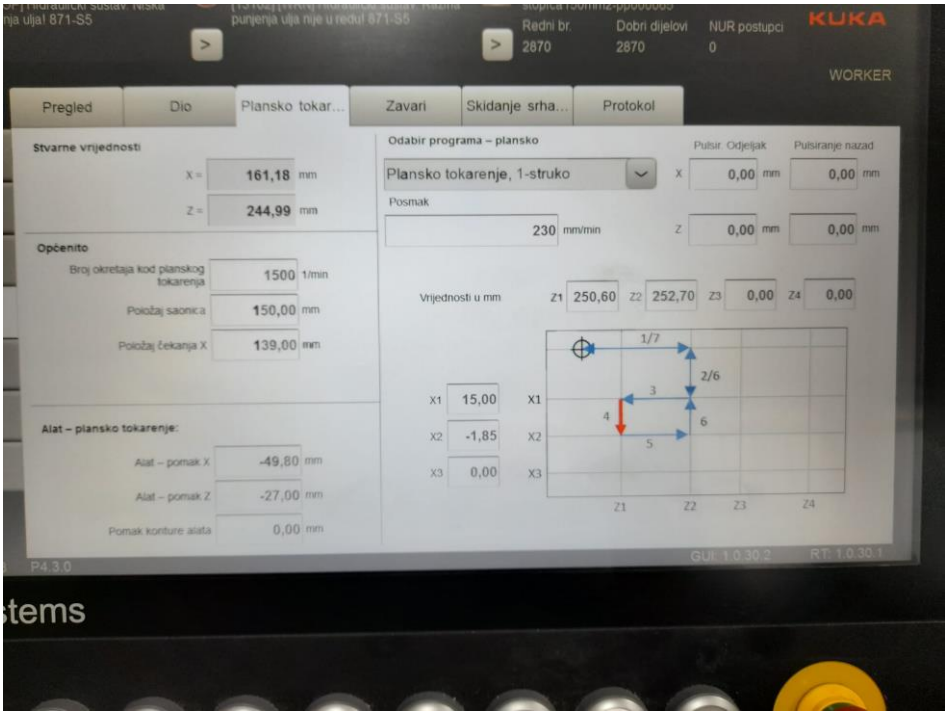
Slika 49. Prikaz uobičajenih iskustveno dobivenih parametara zavarivanja trenjem

Na slici 49 su prikazani svi parametri zavarivanja koji se mogu mijenjati te su oni odabrani iskustveno jer dosljedno daju zavare dobre kvalitete. Prikazani parametri vrijede za obratke promjera 25 mm. Budući da se odabrani parametri postižu reakcijom mnoštva senzora koji konstantno mjere prikazane vrijednosti, potrebno je odabrati dopuštene granice odnosno maksimalne devijacije od odabranih vrijednosti kod kojih će senzori reagirati te proslijediti informacije stroju za reguliranje i povratak unutar granica. Na slici 50 su prikazane spomenute granice parametara.

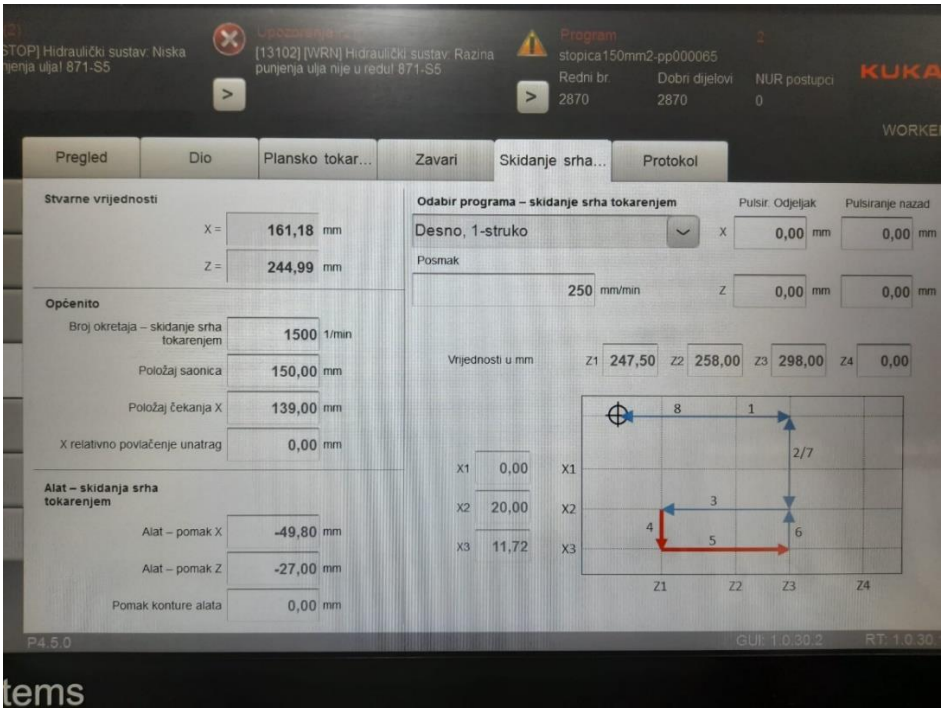


Slika 50. Granice parametara zavarivanja trenjem

Prije samog zavarivanja potrebno je odmašćivanje i plansko tokarenje dijelova radi uklanjanja nečistoća i postizanja povoljnije hrapavosti površina koje se zavaruju. Na slici 51 su prikazani parametri na stroju za plansko tokarenje. Nakon zavarivanja je potrebno ukloniti srh izbačenog materijala koji se uglavnom sastoji od Al jer je to materijal manjeg modula elastičnosti od Cu, a koji nastaje na obodu spojenih površina. Parametri za uklanjanje srha prikazani na slici 52.



Slika 51. Parametri za plansko tokarenje sirovaca prije zavarivanja



Slika 52. Parametri za uklanjanje srha nakon zavarivanja

Na slici 53 su grafički prikazani prijeđeni put, brzina vrtnje i sila u odnosu na vrijeme zavarivanja na osciloskopu.

Slika 53. Grafički prikaz kretanja sile, brzine vrtnje i aksijalnog pomaka u odnosu na vrijeme tokom postupka zavarivanja trenjem

Na slici 53 se može vidjeti da je sila, prikazana plavom bojom, najveća u kasnijem dijelu postupka jer tad dolazi do smanjenja brzine vrtnje i procesa sabijanja sirovaca kako bi se postigla veća čvrstoća zavara. Prijeđeni aksijalni pomak, prikazan zelenom bojom, kontinuirano raste jer se materijal kroz trenje konstantno troši te on samo raste različitim brzinama. Brzina vrtnje, prikazana ružičastom bojom, naglo raste do operativne brzine vrtnje u fazi kada djeluje sila zavarivanja, te pada na niže vrijednosti kada djeluje sila sabijanja nakon čega vrtnja potpuno prestaje dok i dalje djeluje sila sabijanja koja učvršćuje spoj.

5.2. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad je proveden sa svrhom optimizacije parametra tlaka sabijanja zavarivanja trenjem Al i Cu spojeva. Na napravljenim uzorcima se ispitivala vlačna čvrstoća i analizirala mikrostruktura zavara koji su napravljeni pri različitim tlakovima sabijanja. Napravljeni uzorci podijeljeni su u 3 grupe. Svaka grupa posjeduje 3 uzorka te su uzorci u svakoj grupi napravljeni pod utjecajem različitog tlaka sabijanja. Svi uzorci su napravljeni sa: brzinom vrtnje $n = 1450\ min^{-1}$, vremenom zavarivanja $t = 5$ s i početnim tlakom trenja $p_t = 10$ bar. Svi uzorci su načinjeni od sirovaca promjera $d = 14$ mm. Cu polovice uzoraka imaju duljinu od 80 mm, a

Al polovice imaju duljinu od 85 mm kako bi ukupna duljina izrađene epruvete iznosila 160 mm prema normi DIN 50 125. Al polovice moraju imati nešto veću duljinu jer se Al strana najviše troši tokom zavarivanja trenjem. Nakon spajanja sirovaca, uzorci se tokare na okrugle epruvete s ravnom glavom prema DIN 50 125, a odabrani promjer za vlačni test iznosi 12 mm. U tablici 2 su prikazane grupe uzoraka i odabrani tlakovi sabijanja p_s za njihovu izradu.

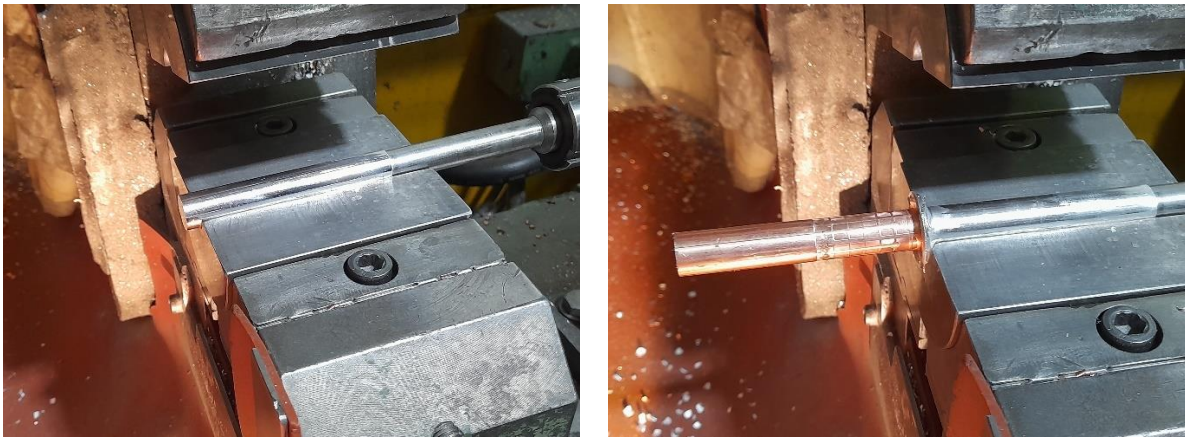
Tablica 2. Grupe uzoraka i odabrani tlakovi sabijanja

Uzorak	Tlak sabijanja p_s, bar
1	25
2	25
3	25
4	50
5	50
6	50
7	8
8	8
9	8

Nakon procesa spajanja, od uzoraka 2, 3, 4, 6, 8 i 9 izrađene su okrugle epruvete s ravnom glavom namijenjene za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala na kidalici VEB WPM/ EUmod/ 400 kN, a uzorci 1, 5 i 7 su uzdužno prerezani i ispolirani kako bi se analizirala njihova mikrostruktura.

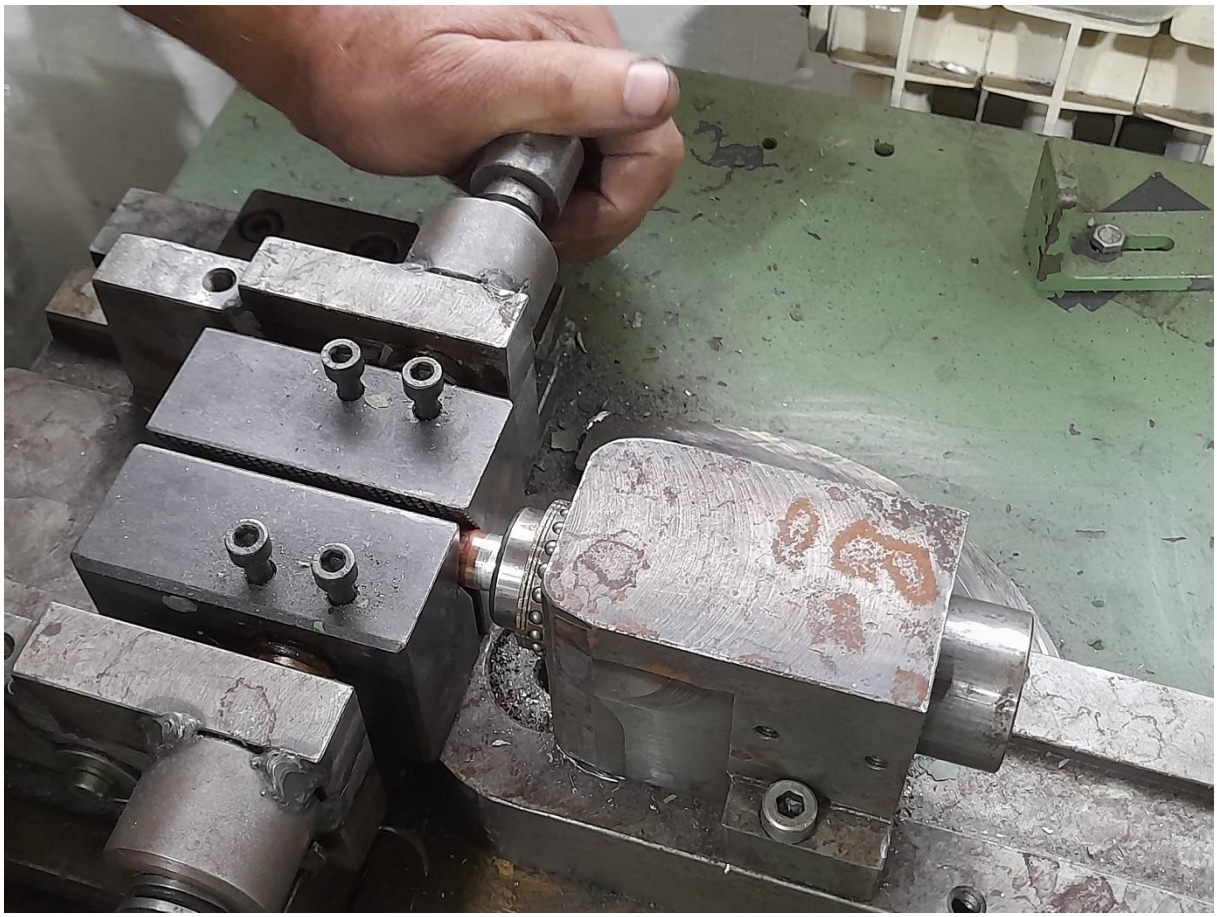
5.3. Izrada uzoraka

Na slici 54 je prikazano umetanje sirovaca u tokarski stroj i njihovo spajanje uslijed trenja.



Slika 54. Montiranje sirovca – lijevo, izrada spoja - desno

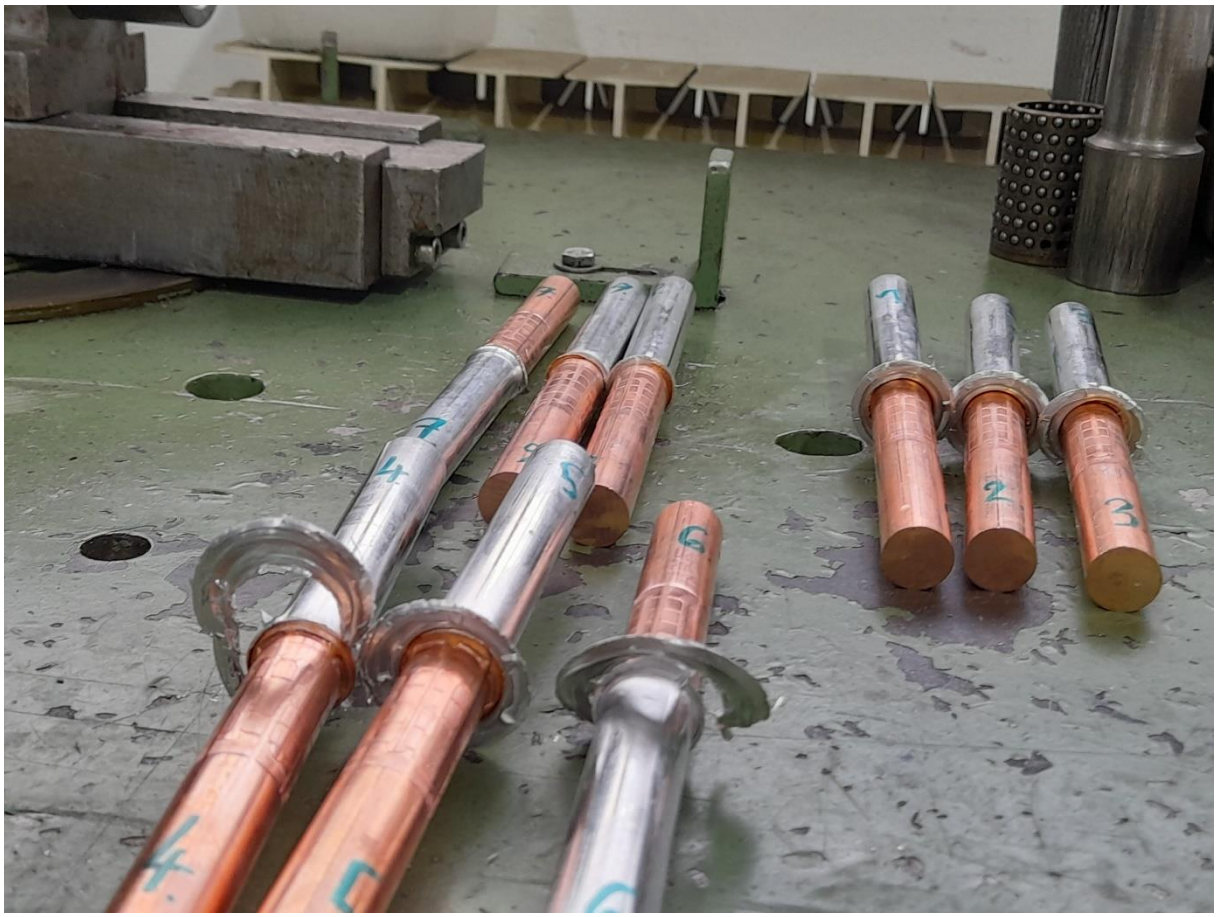
Prilikom izrade velikih serija uzoraka, zavareni Al-Cu spojevi se nasumično odabiru za ispitivanje na stolnoj kidalici. Svrha ispitivanja je provjeravanje ispravnosti spojeva. Ukoliko je spoj napravljen s optimalnim parametrima, doći će do pucanja aluminija, a ukoliko parametri nisu bili idealni dolazi do pucanja na samom Al-Cu spoju što se nikako ne smije dogoditi jer to znači da zavareni spoj nema dovoljno dobra mehanička svojstva i ukoliko kabelska spojna oprema ima nosivu ulogu, može doći do naglog odljepljivanja i iznenadnog pucanja spoja. Ispitivanje se na stolnoj kidalici provodi i zato što ponekad dolazi do pucanja zavara iako su parametri bili ispravno podešeni. To se događa ukoliko sirovci nisu dobro očišćeni ili imaju mnoštvo nečistoća u svom kemijskom sastavu ili poneki Cu komadi mogu imati prekomjernu tvrdoću koja narušava čvrstoću zavara napravljenog s istim parametrima kao i s mekšim Cu komadima. U tom slučaju se na stolnoj kidalici ranije detektira problem i ukoliko je problem u prevelikoj tvrdoći bakra, serije komada koje su pretvrde se odvode na toplinsku obradu žarenja. Ispitivanje komada na stolnoj kidalici je prikazano na slici 55, a neispravno puknuće koje se nalazi na samom Al-Cu spoju je prikazano na slici 56.



Slika 55. Ispitivanje spoja na stolnoj kidalici

Slika 56. Neispravno puknuće spoja

Na slici 56 se vidi kako je došlo do pucanja na samom zavaru što znači da je komad zavaren sa krivim parametrima. Međutim također se vidi da je Al dio iznimno iskrivljen što znači da je skoro došlo do pucanja na aluminiju što pak znači da su u slučaju sa slike 56 odabrani parametri skoro unutar granica ispravnih. Pucanje sa slike 56 je pomoglo u potrazi za graničnim tlakom sabijanja kod kojeg 50 % uzoraka puca na zavaru, a 50 % na Al dijelu spoja. Prikazani uzorak sa slike 56 je napravljen sa tlakom sabijanja p_s = 10 bar. Na slici 57 su prikazane sve tri grupe uzoraka nakon zavarivanja trenjem. Svi uzorci na svom spoju po obodu imaju istisnut materijal odnosno srh koji se uglavnom sastoji isključivo od aluminija. Uzorci proizvedeni s većim tlakom sabijanja imaju srh znatno većeg promjera i veću duljinsku potrošenost Al dijela spoja. Na slici 58 se nalazi uzdužno prerezani uzorak koji se onda nakon poliranja sprema za ispitivanje mikrostrukture.

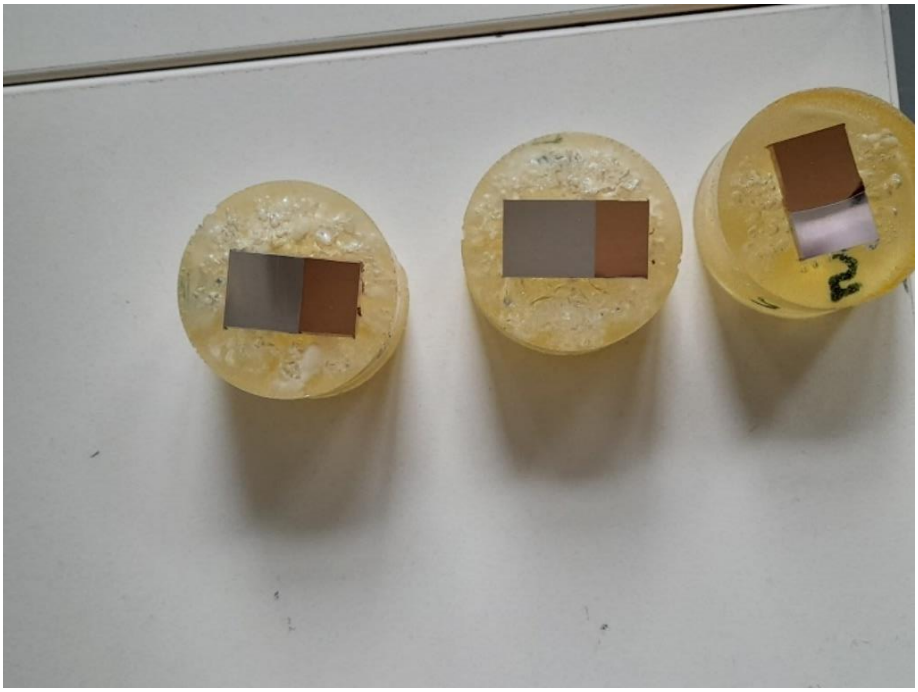


Slika 57. 3 grupe uzoraka sa različitim tlakom sabijanja i posljedično većim promjerom izbačenog materijala (srha)

Slika 58. Primjer uzdužno izglodanog uzorka u svrhu ispitivanja mikrostrukture na Al-Cu spoju

Na slikama 59, 60 su prikazani uzorci spremni za ispitivanje na vlačnom testu i mikrostrukture.

Slika 59. Pripremljeni uzorci podijeljeni u grupe i spremni za ispitivanje na vlačni test



Slika 60. Uzorci pripremljeni na ispitivanje mikrostrukture

5.4. Rezultati ispitivanja

Prije tumačenja rezultata potrebno je znati mehanička svojstva aluminija i bakra koja su prikazana u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva aluminija i bakra [18]

Materijal	Al	Cu
Gustoća, g/cm^3	2,7	8,92
Vlačna čvrstoća, MPa	90	210
Modul elastičnosti, GPa	70	120
Vodljivost topline, W/mK	237	401
Mohsova ljestvica tvrdoće	2,8	3

Tablica 3 potvrđuje sva zapažanja tokom provođenja eksperimenta. Al dijelovi jednakih volumena su puno lakši te su puno osjetljiviji na ogrebotine i trošenje. Tokom zavarivanja je također potvrđeno da veći dio topline odlazi na Cu stranu spoja. Izrađene Al-Cu epruvete se ispituju na kidalici VEB WPM/ EUmod/ 400 kN i uzorak se smatra ispravnim ukoliko dođe do pucanja na aluminiju odnosno kad se naprezanje u epruveti izjednači sa vlačnom čvrstoćom aluminija koja iznosi 90 MPa kao što piše u tablici 3. Montiranje epruvete u čeljusti kidalice je prikazano na slici 61.

Slika 61. Montirana ispitna epruveta spremna na vlačni test

Slike 62 i 63 prikazuju pucanje epruvete na kidalici uslijed vlačnog testa.

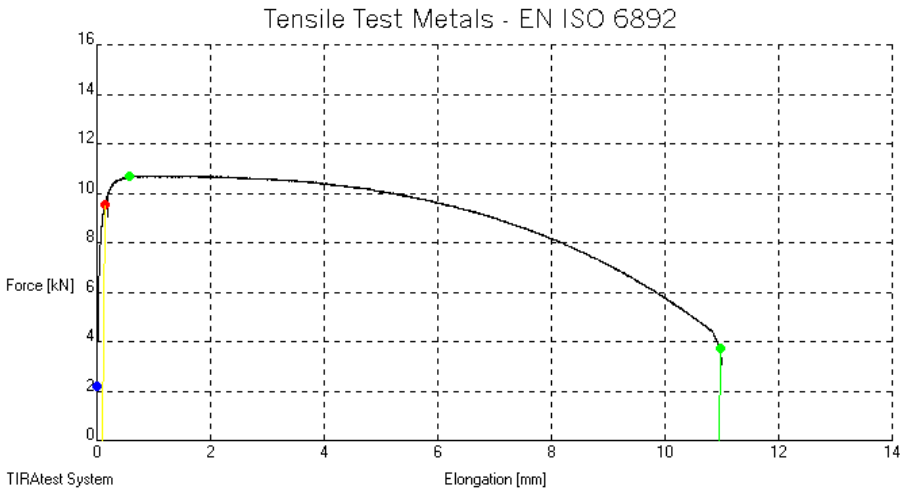
Slika 62. Uzorak 2 - odvajanje spoja na Al dijelu epruvete (p_s = 25 bar)

Slika 63. Uzorak 8 - odvajanje spoja na zavaru (p_s = 8 bar)

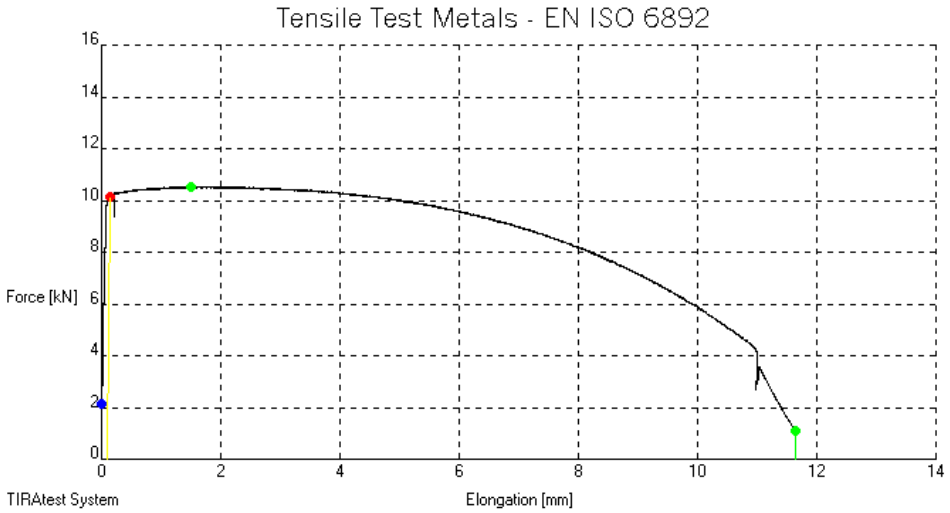
Na slici 64 su prikazani uzorci 2, 3, 4, 6, 8 i 9 redoslijedom s lijeva na desno nakon ispitivanja vlačnim testom.

Slika 64. Uzorci 2, 3, 4, 6, 8 i 9 nakon vlačnog testa

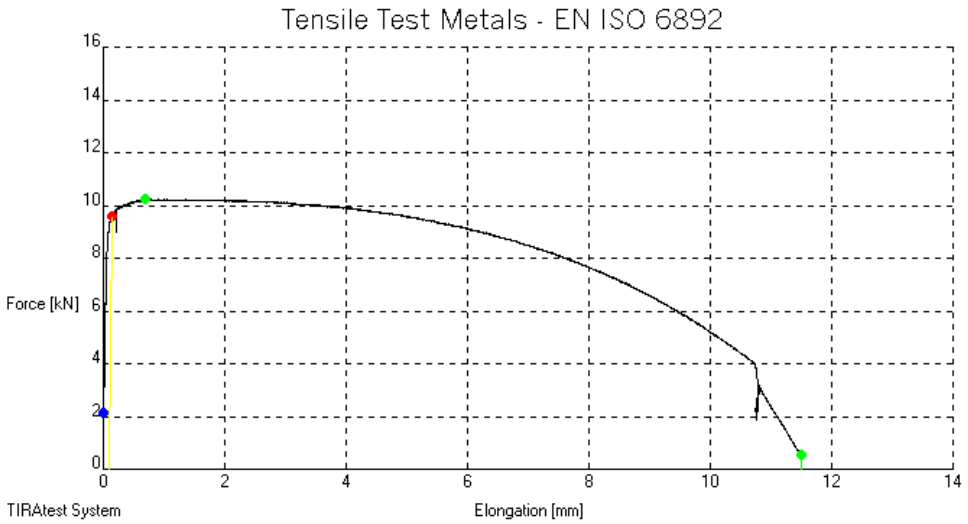
Prvo što se može primijetiti sa slike 64 jest da su epruvete 8 i 9 puknule na zavaru, a budući da je za njihovu izradu djelovao najmanji tlak sabijanja (p_s = 8 bar) može se zaključiti da se za izradu Al-Cu spojeva ne bi smio koristiti tlak sabijanja manji od 10 bar. Ono što je zanimljivo jest da su epruvete 2 i 3 izrađene pod tlakom sabijanja (p_s = 25 bar) puknule gotovo na istom mjestu koje se bitno razlikuje od mjesta pucanja epruveta 4 i 6 izrađenih pod tlakom sabijanja (p_s = 50 bar). Kod epruveta 2 i 3 je mjesto pucanja bliže Cu strani dok je za epruvete 4 i 6 mjesto pucanja pomaknuto prema sredini. Pri izradi epruveta u tvrtci Metal Product d.o.o. ustanovljen je granični tlak sabijanja od 10 bar pri kojem 50 % epruveta pukne na zavaru, a 50 % epruveta pukne na Al strani spoja, ali je mjesto pucanja izrazito blizu Cu strane spoja što znači da tlak sabijanja osim što utječe na čvrstoću i izdržljivost samog spoja također utječe i na mjesto pucanja Al-Cu zavara. Grafički prikazi vlačnog ispitivanja svakog uzorka u obliku dijagrama sile i istezanja su prikazani na slikama 65, 66, 67, 68, 69 i 70.



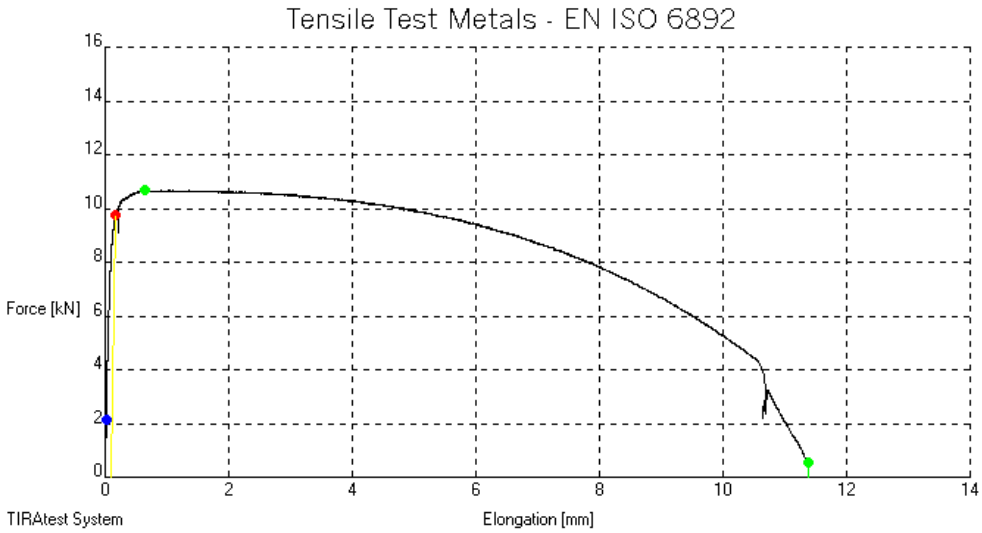
Slika 65. Vlačno ispitivanje – uzorak 2



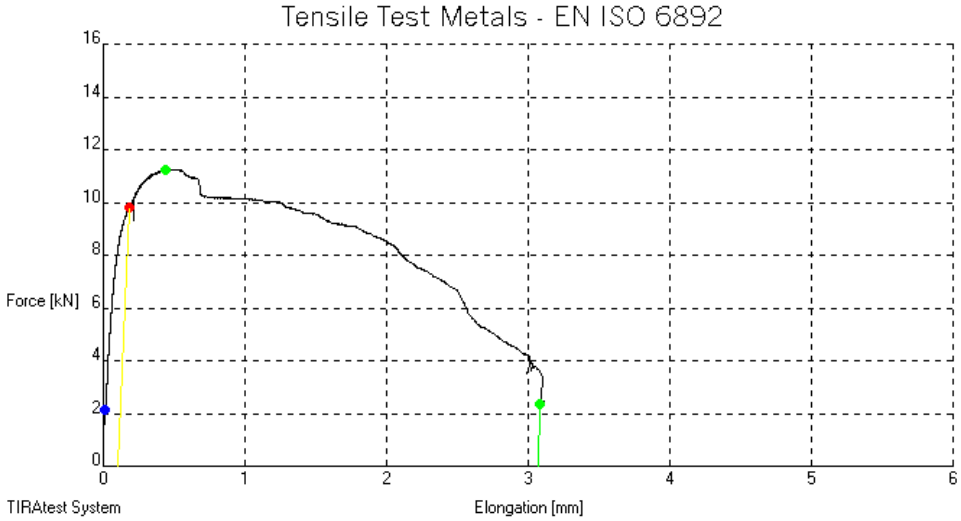
Slika 66. Vlačno ispitivanje – uzorak 3



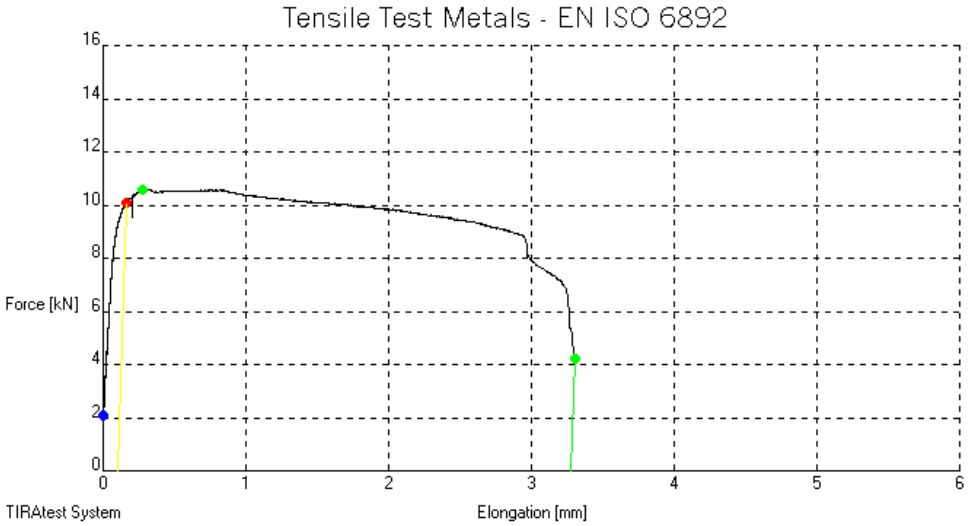
Slika 67. Vlačno ispitivanje – uzorak 4



Slika 68. Vlačno ispitivanje – uzorak 6



Slika 69. Vlačno ispitivanje – uzorak 8



Slika 70. Vlačno ispitivanje – uzorak 9

Uzorci napravljeni sa tlakovima sabijanja 25 i 50 bar ne pokazuju bitne razlike u dijagramu naprezanja – istezanja. Svi uzorci dostižu sličnu maksimalnu silu iznosa oko 11 kN što ukazuje da na svim uzorcima dolazi do postizanja naprezanja približno jednakog vlačnoj čvrstoći Al materijala što se jasno vidi u tablici 4. Nadalje, svi uzorci pokazuju jednake iznose elongacije od skoro 12 mm izuzev uzoraka 8 i 9 koji su puknuli na zavaru puno ranije i njihova elongacija iznosi samo nešto više od 3 mm. Rezultati vlačnog testa na kidalici sumirani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja vlačnim testom uzoraka 2, 3, 4, 6, 8 i 9

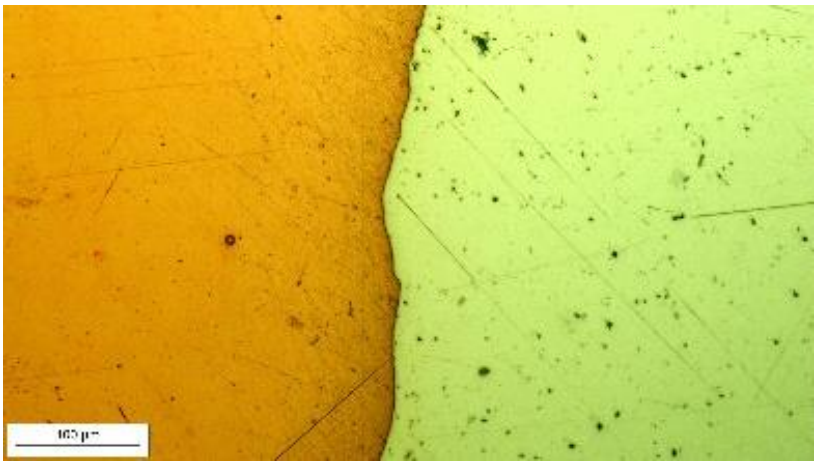
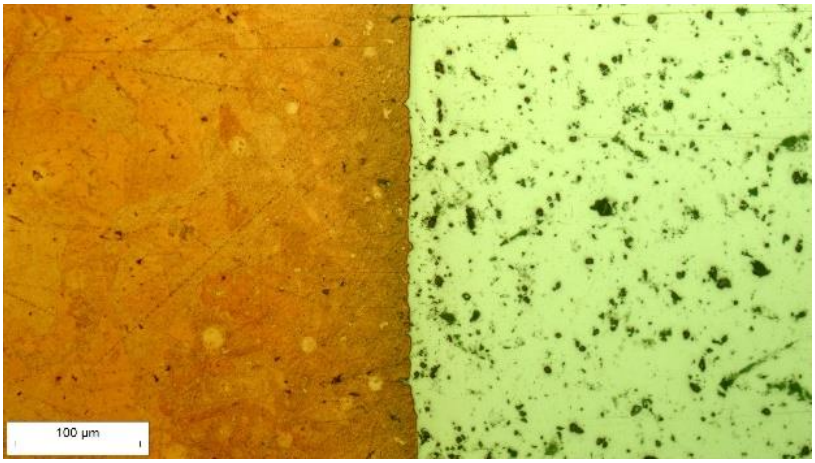
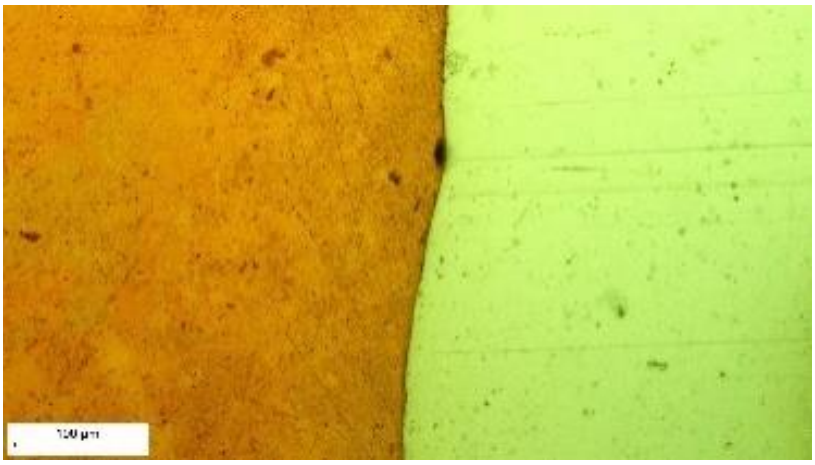
Uzorak	***Rp*0,2, N/mm²**	***Rm*, N/mm²**	***Fm*, kN**	***Fb*, kN**	***d*, mm**	***S0*, mm²**
2	84,92	94,98	10,69	3,73	11,97	112,53
3	91,05	94,30	10,52	1,07	11,92	111,59
4	84,08	89,54	10,23	0,53	12,06	114,23
6	84,01	92,03	10,67	0,56	12,15	115,94
8	87,35	100,30	11,25	2,35	11,95	112,16
9	89,19	93,42	10,58	4,22	12,01	113,29

Postignuta vlačna čvrstoća svih uzoraka iznosi između 90 i 95 MPa izuzev uzorka 8 koji je postigao maksimalno naprezanje u iznosu od 100 MPa, no ono se može pripisati statističkom iznimkom. Ovakva naprezanja se u potpunosti slažu sa podacima o Al iz tablice 3 koja pokazuje da maksimalno naprezanje Al materijala iznosi 90 MPa. Čak su i uzorci 8 i 9 koji su puknuli na zavaru dostigli te vrijednosti naprezanja, a smatra se da je razlog tomu što su te epruvete napravljene tlakom sabijanja u iznosu od 8 bar što je veoma blizu granične vrijednosti tlaka sabijanja od 10 bar. To je minimalni tlak sabijanja s kojim neće doći do pucanja zavara, a pošto su epruvete 8 i 9 napravljene blizu tih vrijednosti, do pucanja dolazi približavanjem naprezanja vlačnoj čvrstoći aluminija i pucanje se odvija netom prije postizanja maksimalne vlačne čvrstoće uzorka.

Svi uzorci su ispitani na kidalici VEB WPM / Eumod /400 kN prema normi HRN EN ISO 6892-1, brzina ispitivanja iznosila je 5 mm/min, a temperatura pri ispitivanju iznosila je 20,3 °C.

U tablici 5 su prikazani uzorci 1, 5 i 7 sa slike 60 uvećani na svjetlosnom mikroskopu 200 puta. U tablici se može vidjeti kako je u području spoja veći broj nečistoća na spojevima napravljenim pod većim tlakovima sabijanja jer veći tlak sabijanja više komprimira Al i Cu osnovni materijal te samim time povećava gustoću raspoređenosti nečistoća. Također se može vidjeti da uzorak 7 napravljen s najmanjim tlakom sabijanja od 8 bar nije ostvario čvrste veze između Al i Cu dijela što se očituje u veoma tankoj liniji na spoju između materijala.

Tablica 5. Prikaz uzoraka 1, 5 i 7 uvećanih na svjetlosnom mikroskopu 200 puta

Uzorak i p_s	**Uvećanje spoja 200 puta**
1 (p_s = 25 bar)	
5 (p_s = 50 bar)	
7 (p_s = 8 bar)	

6. ZAKLJUČAK

Nedavnim usavršavanjima, zavarivanje trenjem postaje sve aktualniji i značajniji način zavarivanja metalnih i polimernih materijala. Zavarivanje trenjem se bazira na pojavi transformacije materijala u viskozno-plastično stanje koje se javlja pri povišenim temperaturama koje su blizu temperatura tališta. U takvom stanju materijal može oformiti metalne veze te se tako spojiti bez prelaska u tekuće agregacijsko stanje kao što je to slučaj kod drugih vrsta zavarivanja (elektrolučno, kemijsko, lasersko). Ostanak u krutom agregacijskom stanju pri zavarivanju ima mnoštvo prednosti. Jedna od prednosti je što je takav način zavarivanja pogodniji za okoliš i zdravlje čovjeka. Kod zavarivanja trenjem još jedna prednost je što je unos topline puno manji i pri temperaturama koje se javljaju tokom ovog postupka većina metala ostaje korozijski postojana. Postupak je energetski učinkovit jer ne zahtijeva puno energije, a glavna prednost očituje se u mogućnosti spajanja krajnje različitih metala. Sve češće korišteni metali poput aluminija, bakra i titana nisu kompatibilni i jako ih je teško zavariti klasičnim metodama. U tehnologiji zavarivanja trenjem nema problema što se tiče spajanja različitih materijala. Budući da je kod spajanja metala konstantno prisutan tlak i plastična deformacija, dolazi do trganja i usitnjavanja eventualnih oksidnih slojeva koji kod elektrolučnog zavarivanja stvaraju probleme. Najveći problemi zavarivanja trenjem su nemogućnost zavarivanja teško prisutnih pozicija jer se u suštini postupak izvodi preko CNC glodalica ili tokarskih strojeva što onemogućuje korištenje postupka za kompleksniju geometriju. Ipak ti problemi nisu nepremostivi, kroz daljnje investiranje u tehnologiju i razvoj robotike i automatizacije moguće je implementirati tehnologiju zavarivanja trenjem u sve više industrija diljem svijeta. Rezultati promjene tlaka sabijanja pri izradi uzoraka ukazuju da granični tlak sabijanja pri kojem 50 % uzoraka puca na zavaru, a 50 % na Al dijelu iznosi približno 10 bar. Nadalje, povećanjem tlaka sabijanja se mjesto pucanja epruvete odmiče od zavara prema Al dijelu uzorka. Moguće objašnjenje ove pojave jest da se povećanjem tlaka sabijanja pri izradi uzoraka Al dio više tlači te mu se povećava gustoća približavanjem prema mjestu zavara što onda dovodi do nešto veće vlačne čvrstoće u neposrednoj blizini zavara u odnosu na ostatak osnovnog materijala Al dijela uzorka. Što se tiče mehaničkih svojstava, uzorci izrađeni s različitim tlakovima sabijanja ne pokazuju bitnije razlike. Na uzorcima koji su napravljeni s većim tlakovima sabijanja zapažena je veća gustoća nečistoća u uskom području oko zavara. Ta se pojava može objasniti većim sabijanjem i kompresijom oba materijala što onda dovodi i do kompresije svih nečistoća u uzorku koje se onda raspoređuju u

gušćoj formaciji u predjelu zavara. Na slikama s mikroskopa također je potvrđena slabija Al-Cu veza na uzorku br. 7 koja se očituje u maloj debljini linije spoja Al i Cu dijela uzorka.

Zaključno, idealni tlak sabijanja za uzorke promjera 14 mm se nalazi u rasponu između 15 i 30 bar. Manji tlakovi sabijanja od 15 bar dovode spoj u opasnost pucanja na mjestu zavara dok su tlakovi veći od 30 bar nepotrebni tj. nepotrebno troše energiju za uspostavljanje većih tlakova na stroju. Negativna strana većih tlakova od 30 bar jest i povećanje gustoće nečistoća na uzorku što nikako nije poželjno. Konačno, rezultatima ispitivanja ovog diplomskog rada je utvrđeno da tvrtka Metal Product d.o.o. koristi tlak sabijanja koji se nalazi unutar idealnog raspona tlakova sabijanja te se njihovi zavari trenjem mogu smatrati ispravnima.

LITERATURA

[1] Larry Jeffus, Welding principles and applications seventh edition, Delmar, New York, 2012.

[2] https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding/materials-weldable-by-friction-stir, pristupljeno 9.10.2022.

[3] https://www.smicopower.com/cablelugs/dtl-2-f-bimetal-friction-welding-cable-lugs, pristupljeno 10.10.2022.

[4] K. Kalaiselvan, I. Dinaharan, N. Murugan, Routes for the joining of metal matrix composite materials, Elsevier, Amsterdam, 2021.

[5] A.R. McAndrew, P.A. Colegrove, C. Bühr, A. Vairis, C.D. Filipo, A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding, Elsevier, Amsterdam, 2017.

[6] Ulf Ronneteg, SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Oskarshamn, Sweden, 2004.

[7] M. Uzkut, B.S. Unlu, S.S. Yilmaz, M. Akdag, Friction welding and it 's applications in today 's world, Burch international university, 2009.

[8] https://nctfrictionwelding.com/, pristupljeno 1. 8. 2022.

[9] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, 2005.

[10] https://www.assemblymag.com/articles/94007-friction-stir-welding-expands-its-reach, pristupljeno 2. 8. 2022.

[11] M.Li, C. Zhang, D. Wang, L. Zhou, D.Wellmann, Y. Tian, Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Copper, MDPI, 2019.

[12] J. Gandra, H. Krohn, R.M. Miranda, P. Vilac, L. Quintino, J.F. dos Santos, Friction surfacing- A review, Elsevier, Amsterdam, 2013.

[13] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, F. Zhang, Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al-Cu joint produced by continous drive friction welding, Elsevier, 2015.

[14] M. Sahin, H. Erol Akata, K. Ozel, An experimental study on joining of severe plastic deformed aluminium materials with friction welding method, Materials and design, 2006.

[15] X. Zhu, Y. Fan, L. Xie, X. Xiao, P. Wang, S. Yang, C. Jiang, Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of continous drive friction welded dissimilar joints of 6061-T6 Al and copper, Metals 2022., 12, 1173.

[16] M. Kimura, Y. Inui, M. Kusaka, K. Kaizu, Effects of friction welding conditions on tensile strength of friction welded joint between 5052 Al alloy and pure copper, Mechanical engineering journal, vol.5, No.2, 2018.

[17] M. Abbasi, A. Karimi Taheri, M.T. Salehi, Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process, J. Alloys Compd. 319 (1–2) (2001) 233–241.

[18] https://material-properties.org/aluminium-and-copper-comparison-properties/, pristupljeno 10. 11. 2022.

PRILOZI

I. CD-R disc