



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM DVOSTRANIM ALATOM LEGURE ALUMINIJUM-MAGNEZIJUM-SILICIJUM

- Doktorska disertacija -

Mentor:
Prof. dr Sebastian Baloš

Kandidat:
M. Sc. Milan Pećanac

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Милан Пећанац
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	Проф. др Себастиан Балош, редовни професор, Факултет техничких наука
Наслов рада:	Заваривање трењем са мешањем двостраним алатом легуре алуминијум-магнезијум-силицијум
Језик и писмо рада:	Српски језик, латинично писмо
Физички опис рада:	Уписати број: Странаца: 131 Поглавља: 8 Референци: 173 Табела: 14 Слика: 149 Графикона: 39 Прилога: 19
Научна област:	Машинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Материјали и технологије спајања
Кључне речи / предметна одредница:	Заваривање трењем са мешањем, бобин алат, параметри заваривања, карактеризација
Апстракт на језику рада:	У овом раду је описан поступак заваривања са мешањем (ЗТМ) помоћу бобин алата. Дате су теоретске основе процеса, као и примена, предности и недостаци овог поступка. Идентификовани су релевантни параметри, а посебна пажња је посвећена карактеризацији споја. Анализиране су механичке карактеристике споја, а корозиона постојаност споја. У раду је коришћена легура EN AW 6060-T66, која је заваривана алатима различите геометрије (конвенционални ЗТМ и бобин алат), при различитим брзинама заваривања и различитим помацима. Показано је да бобин алат генерално даје спојеве са бољим карактеристикама и бољом корозионом постојаношћу
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не коришће се са радом.

Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: Проф. др Драган Рајновић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад Члан: Проф. др Оливера Ерић Цекић, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевину у Краљеву Члан: Проф. др Никола Шибалић, ванредни професор, Машински факултет у Подгорици Члан: Проф. др Дејан Моврин, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад Члан, ментор: Проф. др Себастиан Балош, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Milan Pecanac
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Prof. dr Sebastian Balos, full professor, Faculty of technical sciences
Thesis title in English:	Bobbin tool friction stir welding of aluminium-magnesium-silicon alloy
Language and script:	Serbian language, Latin letters
Physical description:	Number of: Pages: 131 Chapters: 8 References: 173 Tables: 14 Illustrations: 149 Graphs: 39 Appendices: 19
Scientific field:	Mechanical engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Materials and Joining Technologies
Subject, Key words:	welding, friction stir welding, bobbin tool, welding parameters, weld characterisation
Abstract in English:	This paper describes the process of Friction Stir Welding (FSW) using a bobbin tool. The theoretical foundations of the process are given, as well as the application, advantages and disadvantages of this process. Relevant parameters are identified, and special attention is paid to the characterization of the joint. The mechanical characteristics of the joint are analysed, and the corrosion resistance of the joint. The alloy EN AW 6060-T66 was used in the paper, which was welded with tools of different geometries (conventional SW and bobbin tool), at different welding speeds and different feeds. It is shown that the bobbin tool generally produces joints with better characteristics and better corrosion resistance.
Date of endorsement by the scientific board:	
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board:	Chair: Prof. dr Dragan Rajnovic, full professor, Faculty of technical sciences Member: Prof. dr Olivera Eric Cekic, associate professor, Faculty of mechanical and civil engineering in Kraljevo

² The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authorship,

5B – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,

5r – Copyright statement.

The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

(title, first name, last name, position, institution)	Member: Prof. dr Nikola Sibalic, associate professor, Faculty of mechanical engineering in Podgorica, Montenegro Member: Prof. dr Dejan Movrin, associate professor, Faculty of technical sciences Member, mentor: Prof. dr Sebastian Balos, full professor, Faculty of technical sciences
Note:	

Zahvalnica

Želim da izrazim iskrenu zahvalnost svima koji su me podržavali na ovom putu. Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru prof. dr Sebastianu Balošu i kolegici dr Danki Labus Zlatanović, koji su me neumorno savetovali i usmeravali. Zahvaljujem se cenjenim članovima komisije na vremenu i znanju kojim su doprineli da moja teza dostigne viši nivo.

Sa posebnom zahvalnošću i poštovanjem sećam se prof. emeritus dr Leposave Šiđanin. Njeno znanje, podrška i vera u moj rad ostavili su značajan trag na mom profesionalnom i ličnom razvoju. Iako više nije među nama, njen doprinos ostaje neizbrisiv.

Takođe, zahvaljujem se celokupnoj katedri – kako bivšim, tako i sadašnjim članovima – na безусловnoj podršci i dragocenim lekcijama koje sam imao priliku da učim tokom godina saradnje, a od kojih i dalje učim. Zahvalnost dugujem i kolegama sa Tehničkog univerziteta u Ilmenau, posebno prof. Bergmanu, kao i kolegama Haziju i Markusu. Zahvaljujem se i kolegi Aleksandru Čabrilu na omogućenom pristupu opremi za ispitivanje u BMTS-u. Zahvaljujem se i kolegama sa Fakulteta specijalnih tehnologija u Trenčinu: Jozefu, Igoru i Henrieti, sa kojima sam imao divnu saradnju.

Veliku zahvalnost dugujem kolegi Nenadu Kulundžiću, sa kojim sam imao blisku saradnju i zajedno radio eksperimente, kao i laborantu Radomiru Dukiću, čija je pomoć bila od neprocenjivog značaja.

Moju posebnu zahvalnost zaslužuje moja porodica – otac Dragoslav, moja devojka Lejla i njeni roditelji, kao i moji prijatelji i kumovi, koji su uvek bili uz mene i pružali mi безусловnu podršku. Zahvaljujem se i svim mojim kolegama muzičarima, sa kojima sam imao, a i dalje imam čast da delim binu u srećnim i teškim trenucima.

Na kraju, zahvaljujem se fondaciji DAAD, zahvaljujući čijoj stipendiji sam imao priliku da boravim i radim na Tehničkom univerzitetu u Ilmenau.

Još jednom, iskreno hvala svima jer bez vaše podrške ovaj rad ne bi bio moguć.

Hvala Vam svima.

Za mater Milku i deda Savu.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teoretske osnove	4
2.1. Opšte o zavarivanju	4
2.2. Podela postupaka zavarivanja	6
2.3. Zavarivanje trenjem	7
2.4. Zavarivanje trenjem sa mešanjem	7
2.4.1. Osnove procesa	7
2.4.2. Podela ZTM postupaka zavarivanja	9
2.4.2.1. Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću stacionarnog ramena	9
2.4.2.2. Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem	10
2.4.2.3. Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću dvostranog („bobin“) alata	10
2.4.2.4. Procesiranje zavarivanjem trenjem sa mešanjem	11
2.4.2.5. Zakivanje trenjem sa mešanjem	12
2.4.2.6. Ekstruzija trenjem sa mešanjem	12
2.4.2.7. Inkrementalno oblikovanje trenjem sa mešanjem	13
2.4.3. Stvaranje i unos toplote	13
2.4.4. Parametri procesa zavarivanja i njihov uticaj zavareni spoj	14
2.4.4.1. Uticaj brzine obrtanja na zavareni spoj	14
2.4.4.2. Brzina zavarivanja – Pomak alata	15
2.4.4.3. Uticaj nagiba i dubine prodiranja alata	16
2.4.5. Karakteristične greške u konvencionalnim ZTM spojevima	17
2.4.5.1. Istisnuti materijal	18
2.4.5.2. Smicanje materijala	18
2.4.5.3. Deformacija regije spoja	19
2.4.5.4. Šupljine (tuneli i crvotočine)	19
2.4.5.5. Ostaci ivice spoja	20
2.4.6. Primena, prednosti i nedostaci ZTM postupka	20
2.4.6.1. Primena	20
2.4.6.2. Prednosti	21
2.4.6.3. Nedostaci:	22
2.5. Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću dvostranog (bobin) alata	22
2.5.1. Delovi alata	24
2.5.1.1. Rame alata	24

2.5.1.2. Trn alata	26
2.5.2. Materijal za izradu alata	27
2.5.3. Uređaji za zavarivanje	28
2.5.4. Izgled zavarenog spoja	29
2.5.4.1. Grumen/zona mešanja	30
2.5.4.2. Zona temo mehaničkog uticaja – ZTMU	30
2.5.4.3. Zona uticaja toplote – ZUT	31
2.5.5. Uticaj parametara zavarivanja i geometrije alata na zavareni spoj	31
2.5.6. Tok materijala tokom procesa zavarivanja i uticajni faktori	34
2.5.7. Greške u zavarenim spojevima	36
2.5.7.1. Inicijacija zavarenog spoja	37
2.5.7.2. Nestabilan tok materijala	38
2.5.7.3. Žljebni defekt	39
2.5.7.4. Šupljine, tuneli i crvotočine	39
2.5.7.5. Fleš (istisnuti materijal)	40
2.5.7.6. Greške usled površinskih oksida	40
2.5.7.7. Ulazni i izlazni defekt	41
2.6. Prednosti, nedostaci i primena ZTM pomoću bobin alata	42
2.6.1. Prednosti	42
2.6.2. Nedostaci	43
2.6.3. Primena	43
2.7. Aluminijum i legure aluminijuma	45
2.7.1. Aluminijum	45
2.7.2. Legure aluminijuma i sistem označavanja	46
2.7.3. Legure serije 6XXX	49
2.7.4. Korozija aluminijuma	51
3. Eksperimentalni deo	55
3.1 Eksperimentalni deo predeksperimenta I i II	55
3.1.1. Osnovni materijal	55
3.1.2. Alati za zavarivanje	56
3.1.3. Zavarivanje i parametri	58
3.1.4. Karakterizacija zavarenih spojeva	60
3.2. Eksperimentalni deo glavnog eksperimenta	61
3.2.1. Osnovni materijal	61
3.2.2. Alat za zavarivanje	62

3.2.3. Zavarivanje i parametri	63
3.2.4. Karakterizacija materijala i spojeva	66
3.2.4.1. Svetlosna mikroskopija	66
3.2.4.2. Ispitivanje zatezanjem	68
3.2.4.3. Ispitivanje savijanjem	69
3.2.4.4. Mapiranje mikrotvrdoće	70
3.2.4.5. Ispitivanje energije udara	70
3.2.4.6. Ispitivanje korozijske otpornosti spoja	71
3.2.4.7. Skenirajuća elektronska mikroskopija	73
4. Rezultati	74
4.1 Rezultati prvog i drugog predeksperimentalnog istraživanja	74
4.1.1 Rezultati prvog predeksperimenta	74
4.1.2. Sumiranje nalaza nakon prvog predeksperimenta	77
4.2.1 Rezultati drugog predeksperimenta	78
4.2.2. Sumiranje nalaza nakon drugog predeksperimenta	84
4.3. Rezultati glavnog eksperimenta	85
4.3.2. Rezultati metalografske analize	85
4.3.3 Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika	93
4.3.4 Rezultati ispitivanja savijanjem	95
4.3.5 Rezultati ispitivanja energije udara	97
4.3.6 Rezultati mapiranja mikrotvrdoće	98
4.3.7 Rezultati ispitivanja korozijske postojanosti	101
4.3.8 Rezultati SEM analize	102
5. Diskusija	111
5.1 Mikrostruktura	111
5.2 Zatezne karakteristike	112
5.3 Savojne karakteristike	115
5.4 Energija udara	116
5.5 Mapiranje mikrotvrdoće	121
5.6 Ispitivanje korozijske postojanosti	121
6. Zaključci	123
7. Reference	125
8. Prilozi	132
План третмана података	148

1. Uvod

Današnja industrija praktično ne može da funkcioniše bez procesa zavarivanja. Velika većina delova (oko 70%) se danas zbog svojih dimenzija ili karakterističnih oblika izrađuje pomoću neke od tehnologija zavarivanja. Procesi zavarivanja moraju se konstantno prilagođavati zahtevima proizvodnje i takođe bi trebali biti što „zeleniji“, odnosno neophodno je da zadovolje sve oštrije ekološke kriterijume. Međutim, zavarivanje kao proces spajanja materijala ima svoje korene u ranoj ljudskoj istoriji. Još u bronzanom dobu su ljudi koristili proces zavarivanja koji mi danas nazivamo kovačko zavarivanje za spajanje delova od bakra, kasnije bronze, železa tokom srednjeg veka. Početkom devetnaestog veka, kroz eksperimente Ser Hemfri Dejvija i Majkla Faradeja je otkriven električni luk, dok je krajem devetnaestog veka patentiran postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja. Tokom dvadesetog veka dolazi do intenzivnijeg razvoja postupaka zavarivanja topljenjem, a najveću ulogu je imao Oskar Kjellberg koji je razvio i patentirao obloženu elektrodu [1–4].

Zavarivanje pritiskom je uvek nekako bilo u senci postupaka zavarivanja topljenjem. Međutim razvojem tehnologija i materijala javlja se potreba za novim postupcima spajanja. Jedan od tih postupaka je patentiran sada već davne 1991. godine na institutu za zavarivanje (*engl.* The Welding Institute – TWI) u Velikoj Britaniji, a nazvan je Zavarivanje trenjem sa mešanjem – ZTM (*engl.* Friction Stir Welding – FSW). Postupak ZTM je postupak zavarivanja koji se odvija u čvrstom stanju pomoću kojeg je moguće spajati materijale različitih debljina, materijale metalurški slične, čak i raznorodne materijale. ZTM je jedinstven po tome što se za proces zavarivanja koristi specijalni alat (vretenastog oblika) koji pomoću kojeg se (na račun trenja alata o osnovni materijal) generiše toplota neophodna za proces zavarivanja [5–12].

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem je postao veoma popularan, što je dovelo do razvoja varijacija kako ZTM postupaka, tako i prateće opreme. Intenzivnim radom na razvijanju ZTM procesa zavarivanja su se prevazišli problemi koji nisu bili rešivi sa konvencionalnim postupcima zavarivanja topljenjem. ZTM se pokazalo kao izuzetan postupak za zavarivanje legura aluminijuma. Najčešće zavarivane legure aluminijuma su legure iz serije AW 2XXX (Al – Cu); AW 5XXX (Al – Mg); AW 6XXX (Al – Mg – Si); AW 7XXX (Al – Zn – Mg) i ređe AW 8XXX (Al – Li). Međutim, pored legura aluminijuma se uspešno zavaruje čelik (ugljenični i u nekim slučajevima nerđajući čelik), legure bakra, titan, cink, nikl, magnezijum i mnogi drugi [8,11,13–18].

Upotrebom alata u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem ima izuzetne pogodnosti koje se ogledaju u: jednostavnosti postupka zavarivanja; mogućnošću visokog stepena automatizacije; upotrebom robota ili CNC mašina ili obradnih centara; visoka energetska efikasnost postupka; spojevi su visokog kvaliteta; a ekološki gledano, ovo je takođe veoma efikasan postupak, jer ne generiše nikakva isparavanja i ne troši se dodatni materijal što je takođe velika prednost postupka [17].

Postupkom ZTM se dobijaju spojevi koji u sebi ne sadrže greške koje su karakteristične za postupke zavarivanja topljenjem, kao što su: vitoperenje usled toplotnih napona (zavarivanje uglavnom tankih limova), vruće prsline, poroznost, zajed, zakaljenje u ZUT – u, itd. Moguće je dobiti šavove visoke efektivnosti koja se uglavnom kreće od oko 80% zatezne čvrstoće osnovnog materijalima, a u nekim slučajevima (pojedini osnovni materijali, adekvatna geometrija alata i parametri zavarivanja) može preći 100% zatezne čvrstoće osnovnog materijala [19,20].

Popularnost ZTM postupka i njegovih varijacija je dovela ove procese u svakodnevnu primenu u različitim industrijama kao što je nautika, aeronautika, železnički saobraćaj, elektronici (računarska industrija). Postupci ZTM se takođe razvijaju čak i u pravcu aditivne proizvodnje delova [20–22].

Zbog visoke cene opreme, ZTM postupci na žalost nisu naročito zastupljeni u Srbiji. Svega nekoliko institucija od kojih se izdvajaju: Vojno tehnički institut – VTI; M.I.N.D. grupa DOO (po zadnjim informacijama, linija za ZTM je demontirana); Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, Univerzitet u Kragujevcu; Fakultet tehničkih nauka – FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Mašinski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu.

U prvom delu teze su date teoretske osnove sa podelom procesa zavarivanja, sa akcentom na procese zavarivanja trenjem sa mešanjem, a posebno je posvećena pažnja zavarivanju trenjem sa mešanjem pomoću dvostranog alata, takozvanog „bobin“ alata. Izvršena je analiza osnovnog materijala, kao i analiza zavarljivosti pomoću konvencionalnih tehnologija i ZTM pomoću bobin alata. Obradene su metode karakterizacije zavarenog spoja. Obradene su primena, prednosti i nedostaci tehnologije ZTM pomoću bobin alata, što je prvi put da se u Srbiji proučava i razvija ova podvrsta ovog postupka.

U drugom delu teze je prikazan sopstveni eksperiment zavarivanja sučeonog spoja legure EN AW 6060 – T66. Proces zavarivanja je vršen pomoću bobin alata sa nagibom oba ramena od 2° ka trnu (konveksna geometrija ramena), sa triveks (poligonalnom) geometrijom trna i sa konvencionalnim ZTM alatom koji ima ravno rame sa cilindričnim rezervoarima. Nakon zavarivanja je vršena karakterizacija zavarenog spoja: metalografsko ispitivanje, ispitivanje zatezanjem, savijanjem u tri tačke, mikrotvrdoća, instrumentirana energija udara, i ispitivanje korozijske postojanosti spoja. Nakon izvršene karakterizacije izvršeno je poređenje dobijenih rezultata ispitivanja. Na osnovu rezultata vršena je diskusija i poređenje sa rezultatima drugih istraživača na osnovu kojih su doneseni određeni zaključci.

Osnovni cilj ove doktorske disertacije obuhvata izradu, sveobuhvatnu karakterizaciju i komparativnu analizu zavarenih spojeva taložno ojačane aluminijumske legure EN AW 6060 T66, dobijenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem (ZTM) primenom dva tipa alata – konvencionalnog i dvostranog (bobin) alata, sa ekvivalentnom geometrijom trna i ramena. Eksperimentalno istraživanje je koncipirano kroz dva seta ogleda u kojima su, pored brzine obrtanja alata, varirani i pomaci (brzina zavarivanja), sa namerom da se definiše optimalna kombinacija parametara koja obezbeđuje formiranje spojeva bez zapreminskih defekata karakterističnih za ZTM, uz prateću analizu radnog veka alata. Direktno upoređivanje

mikrostrukturnih, mehaničkih i korozionih osobina realizovano pri identičnim režimima rada ima za cilj dublje razumevanje mehanizama formiranja spojeva, kao i jasnu identifikaciju prednosti i ograničenja svakog postupka. Polazna naučna hipoteza zasnovana je na pretpostavci da bobin alat omogućava jednostavnije izvođenje procesa, te pruža superiorne mehaničke performanse i povišenu korozionu otpornost u odnosu na konvencionalni koncept. Na taj način, ovo istraživanje nudi inovativne pristupe koji direktno doprinose unapređenju proizvodnih tehnologija i povećanju efikasnosti primene ZTM postupka u industriji.

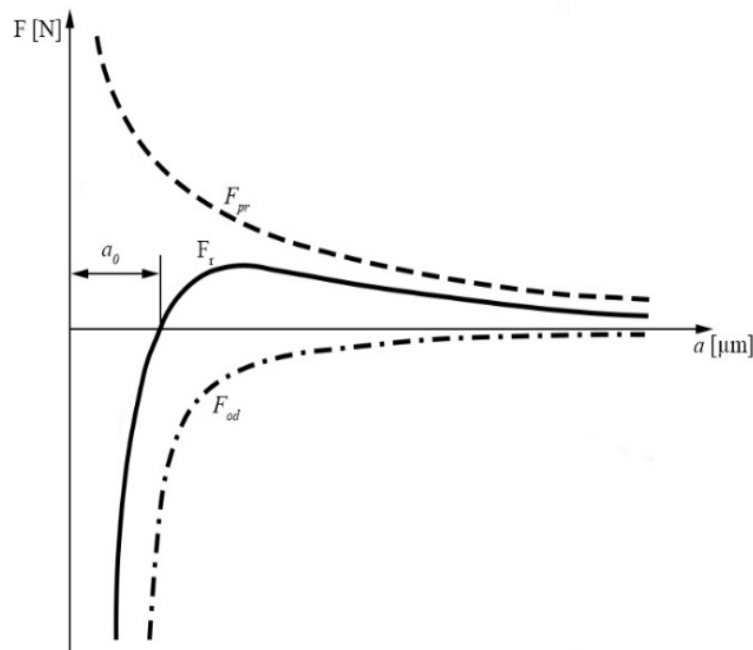
Očekivani rezultati doktorske disertacije se delimično oslanjaju na prethodna uspešna istraživanja Al-Mg legura, a fokusirani su na potvrdu mogućnosti zavarivanja termički ojačane aluminijum-magnezijum-silicijum legure pomoću konvencionalnog i dvostranog (bobin) alata, bez pojave tunela, crvotočina ili drugih zapreminskih defekata, u skladu sa važećim standardima. Eksperimentalni rezultati su potvrdili da parametri procesa zavarivanja u velikoj meri uslovljavaju mehaničke osobine zavarenog spoja, ali i da primarno diktiraju radni vek bobin alata. Naime, usled činjenice da dvostrani alat trpi znatno kompleksnija mehanička i termička opterećenja, njegov radni vek je kraći u odnosu na konvencionalni ZTM alat. Iako bobin alat ima kraći radni vek, njegova primena obezbeđuje jasnu prednost u vidu povoljnije makro i mikrostrukture, superiornijih mehaničkih svojstava i povišene korozione otpornosti spojeva. Dodatno je pokazano da se postupak uspešno može izvesti na univerzalnim i CNC glodalicama. Na osnovu prikupljenih podataka, identifikovani su kritični faktori uticaja na kvalitet spojeva, što pruža značajan doprinos kako u teorijskom kontekstu, tako i u praktičnoj industrijskoj primeni kroz optimizaciju proizvodnih procesa, minimizaciju defekata i podizanje opšte konkurentnosti i održivosti proizvodnje.

2. Teoretske osnove

2.1. Opšte o zavarivanju

Atomi metala u čvrstom stanju su raspoređeni po strogo definisanom, periodičnom obrascu, formirajući uređenu kristalnu rešetku koja se u nauci o materijalima opisuje putem elementarnih kristalnih sistema (ćelija). Kod metala, najčešći su kubni sistemi, odnosno zapreminski i površinski centrirana kubna rešetka. U idealnim rešetkama, atomi se nalaze na ravnotežnim položajima, kao što su čvorovi (rogljevi) kocke, kao i u zapremini kocke, ili na sredini površina kocke. [23,24]. Iako se atomi nalaze na termodinamički ravnotežnim položajima, oni na sobnoj temperaturi spontano osciluju oko svojih ravnotežnih položaja. Sa porastom temperature amplitude oscilacija se povećavaju, što konačno omogućava spajanje dve rešetke, odnosno spajanje dva komada materijala [23].

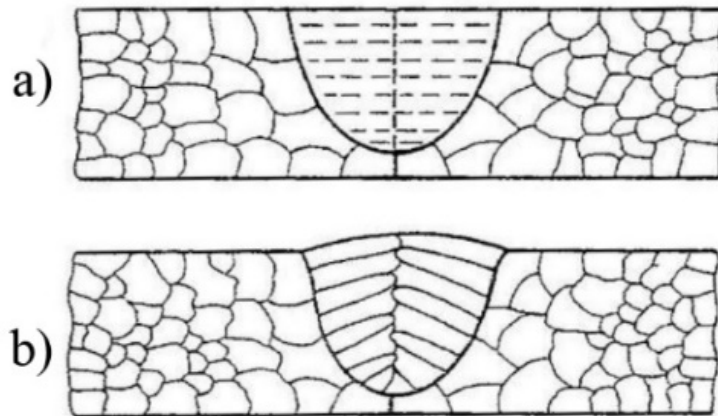
Sa slike 1 se može videti uzajamni uticaj dve pozitivno naelektrisane čestice (atoma) u polju elektrona.



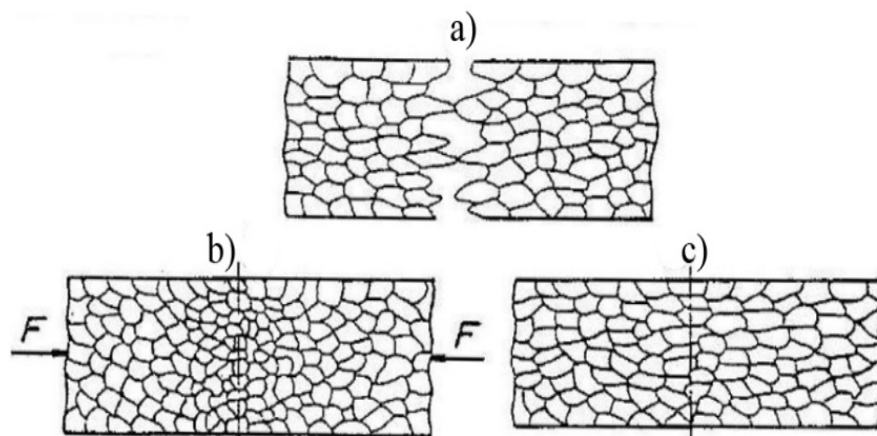
Slika 1. Prikaz uzajamnog uticaja dva atoma u zavisnosti od njihovog rastojanja [23]

Pošto čestice poseduju određenu masu, one će se međusobno privlačiti (F_{pr}), međutim usled istog znaka naelektrisanja, one će se odbijati (F_{od}). Uzajamnim delovanjem privlačnih i odbojnih sila između čestica dobija se rezultujuća sila prikazana punom linijom (F_r). Dimenzija a_0 predstavlja ravnotežno rastojanje između dva atoma u kristalnoj rešetki (parametar kristalne rešetke) gde ne deluju privlačne i odbojne sile. Kod većine metalnih materijala vrednost a_0 se kreće u granicama od $0,3 \cdot 10^{-7}$ do $0,5 \cdot 10^{-7}$ mm [23].

Dakle, da bi spajanje metalnih materijala bilo moguće, neophodno je „dovesti“ atome na pomenuta rastojanja. Ovo je jedino moguće postići lokalnim topljenjem materijala ili pritiskom, što je šematski dato na slikama 2 i 3, respektabilno.



Slika 2. Šema zavarivanja topljenjem [23]



Slika 3. Šematski prikaz zavarivanja pritiskom [23]

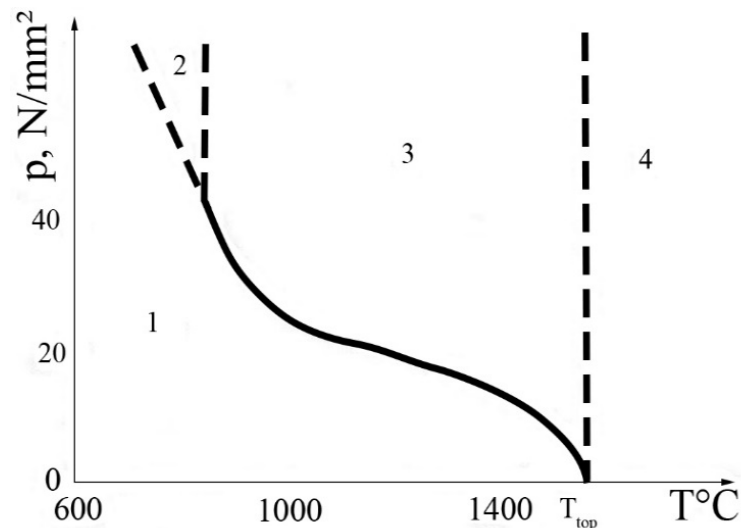
Uporedna analiza prikazana na slikama 2 i 3 pokazuje razlike između dva principa spajanja materijala. Na slici 2 je prikazana je šema zavarivanja topljenjem i na osnovu slike se uočava da bi došlo do spajanja materijala, neophodno je da se lokalno pretopi linija spoja (slika 2a) kako bi se nakon očvršćavanja rastopa formirao šav (slika 2b). Kod postupaka zavarivanja pritiskom se dve ploče (slika 3a) moraju dovesti u kontakt i istovremeno izložiti pritisknim silama (slika 3b) koje rezultuju u lokalnu plastičnu deformaciju osnovnog materijala. Ovaj proces je obično praćen difuzijom i rekristalizacijom (slika 3c), što daje zavareni spoj sa osobinama koje su veoma slične osnovnom materijalu [23].

Na osnovu iznetog se može dati definicija zavarivanja, koju propisuje međunarodni institut za zavarivanje (MIZ). Ona glasi:

Zavarivanje je tehnološki proces dobijanja nerazdvojivih spojeva, ostvarenih uspostavljanjem međuatomskih veza između elemenata uz postojanje difuzije, pri čemu je neprekidnost strukture karakteristika takvih spojeva [23].

2.2 Podela postupaka zavarivanja

U prethodnom poglavlju je data uopštena podela procesa zavarivanja na postupke zavarivanja topljenjem i na postupke zavarivanja pritiskom. Ova podela se najbolje opisuje dijagramom koji je dat na slici 4.



Slika 4. Dijagram zavisnosti pritiska i temperature tehnički čistog železa [23]

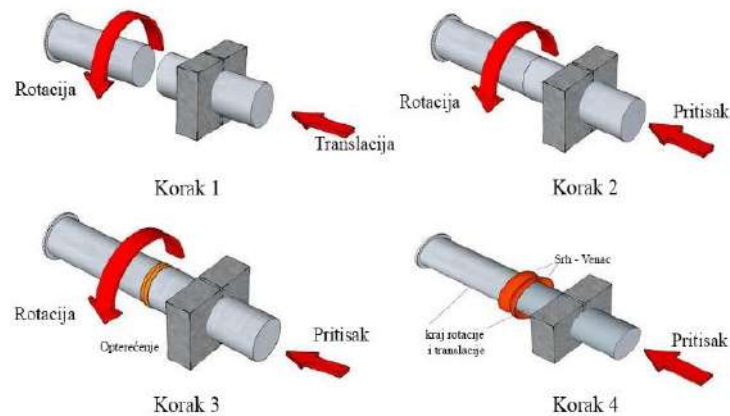
Sa dijagrama na slici 4 se mogu uočiti četiri oblasti. U oblasti jedan, nije moguće zavarivanje. Oblast dva je oblast delimično mogućeg zavarivanja (veoma teško). Oblast tri je oblast zavarivanja pritiskom (potrebne su relativno velike sile za spajanje, pri nižim temperaturama procesa). Oblast četiri je oblast zavarivanja topljenjem (potpuno odsustvo sile, ali je potrebno lokalno pretapanje). Ovo je gruba podela postupaka zavarivanja, a na slici 5 je data detaljnija podela postupaka zavarivanja.



Slika 5. Podela postupaka zavarivanja [25]

2.3 Zavarivanje trenjem

Postupak zavarivanja trenjem se odvija u čvrstom stanju, što ga čini pogodnijim postupkom zbog nižeg unosa toplote u osnovni materijal tokom procesa zavarivanja. Takođe ima prednost sa ekološkog stanovišta, jer ne dolazi do ispuštanja štetnih gasova tokom procesa zavarivanja (što je uobičajeno slučaj kod postupaka zavarivanja topljenjem), a nije potreban ni dodatni materijal. Toplota nastaje usled trenja dva dela koja se nalaze u međusobnom kontaktu (slika 6) [23,26–28].



Slika 6. Šematski prikaz procesa zavarivanja trenjem [19,27]

Tokom procesa zavarivanja trenjem materijal koji se zavaruje se postavlja u nosače, tako da stoje saosno u uređaju za zavarivanje. Tokom procesa (korak 1 na slici 6) jedan deo se rotira oko svoje ose, dok se drugi deo samo pomera duž ose. Usled dejstva aksijalne sile između dva dela dolazi do generisanja toplote usled koje se delovi zagrevaju do temperature neophodne za odvijanje procesa (korak 2 i 3). Kada se komadi zagreju, rotacija prestaje, ali sila i dalje deluje. Nastaje venac na mestu spoja koji se uklanja naknadnom mašinskom obradom (uglavnom struganje) [17,23].

Zavarivanje trenjem se sreće u serijskoj proizvodnji delova koji imaju slične geometrijske karakteristike kao što su: klipnjače, hidraulični cilindri, radijalni klipovi, osovina sa pužem, radilice, burgije, ventili, pogonska vratila, ručice menjača, transmisijni mehanizmi, fitinzi, burgije, glodala, razvrtači, elektro kontakti i mnogi drugi [28].

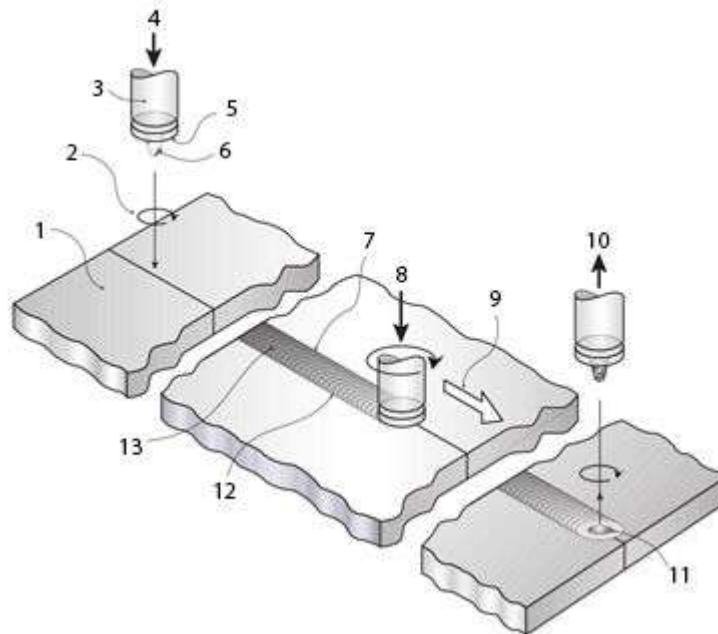
2.4. Zavarivanje trenjem sa mešanjem

2.4.1. Osnove procesa

Postupak zavarivanja trenjem (kao što se vidi na slici 5) se deli na više podgrupa, a jedna od tih podgrupa je zavarivanje trenjem sa mešanjem – ZTM (*engl.* Friction Stir Welding – FSW). Postupak je razvio i patentirao Vejn Tomas (*engl.* Wayne Thomas) i ono što ovaj postupak zavarivanja čini posebnim, jeste vretenasti alat pomoću kojeg se vrši postupak zavarivanja i što se odvija u čvrstom stanju (ne dolazi do topljenja osnovnog materijala), odnosno,

kombinacijom pritiska i temperature koja je iznosi oko 80 % od temperature topljenja materijala koji se zavaruje. Ovo je posebno važno prilikom zavarivanja tanjih materijala kao što su npr. tanki limovi [7,8,20].

Da bi spajanje materijala bilo uspešno, neophodno je pratiti šemu propisanu standardom ISO 25239 – 1:2020 [29], a koja je prikazana na slici 7.



Slika 7. Šema postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem: 1 osnovni metal, 2 smer rotacije alata (u smeru kazaljke na satu), 3 alat za zavarivanje, 4 spuštanje alata, 5 rame alata, 6 klin (trn), 7 strana napredovanja zavora, 8 aksijalna sila, 9 smer zavarivanja, 10 podizanje alata, 11 izlazni otvor, 12 povratna strana zavora, 13 lice šava [12,29]

Na osnovu slike 7 proces ZTM se grubo deli u pet faza/koraka [12,29,30]:

1. Spuštanje alata i prodiranje trna na liniji spoja,
2. Zadržavanje alata,
3. Pomeranje alata duž linije spoja,
4. Završno zadržavanje,
5. Podizanje alata i završetak procesa zavarivanja.

U prvoj fazi procesa zavarivanja, alat se rotira oko svoje ose određenom brzinom, spušta se na liniju spoja, dolazi do zaranjanja alata u osnovni materijal. Odmah nakon prodiranja, nastupa druga faza. U drugoj fazi, alat se zadržava na mestu kontakta određeno vreme (uz konstantnu rotaciju oko svoje ose). Usled razlike brzina (rotirajući alat i statične ploče) dolazi do mehaničke interakcije (trenja alata o osnovni materijal) i kao proizvod dobija se toplota. Generisana toplota razmekšava neposrednu okolinu kontakta alata i osnovnog materijala. Ubrzo nakon toga nastupa treća faza, a to je kretanje alata duž linije spoja (kreće se alat ili radni sto na kom se nalazi osnovni materijal). Na kraju procesa, kretanje alata se zaustavlja (rotacija oko sopstvene ose ne prestaje) u takozvano završno zadržavanje alata. Na kraju poslednja faza je izvlačenje alata iz kontakta sa osnovnim materijalom i zaustavljanje rotacije alata [30].

Tehnički gledano, treća faza se može preskočiti (zavisi od mogućnosti uređaja za zavarivanje) i nakon zaustavljanja kretanja alata duž linije spoja, može se izvući alat iz zahvata.

2.4.2. Podela ZTM postupaka zavarivanja

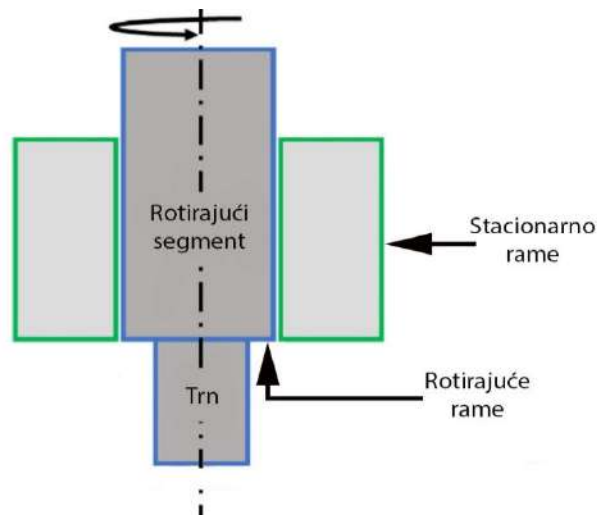
Zavarivanje trenjem sa mešanjem je tokom vremena postao primamljiv postupak zavarivanja i došlo je do intenzivnog razvijanja različitih izvedbi procesa u zavisnosti od upotrebe i namene postupka. ZTM proces je evoluirao u procese zavarivanja i procesiranja, što se može videti sa slike 8.



Slika 8. Prikaz podele postupaka zavarivanjem trenjem sa mešanjem [11,36]

2.4.2.1. Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću stacionarnog ramena

Ovaj postupak je razvijen 2005. godine kao pod vrsta konvencionalnog ZTM postupka [33]. Postupak ZTM sa stacionarnim ramenom je izuzetno pogodna za zavarivanje ugaonih spojeva [33,34]. Šematski prikaz alata je dat na slici 9.

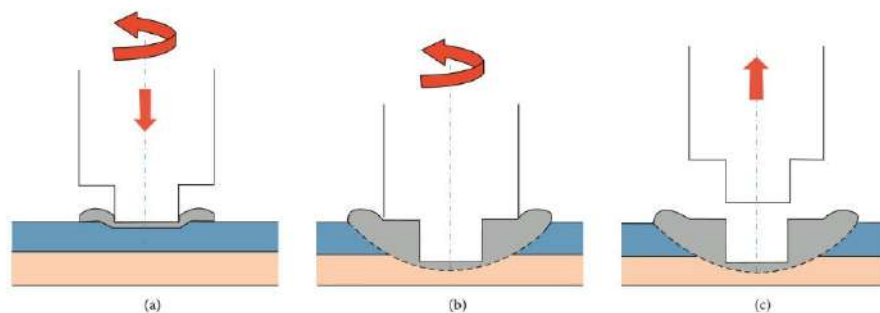


Slika 9. Šematski prikaz alata za ZTM sa stacionarnim ramenom [33]

Proces ZTM sa stacionarnim ramenom takođe karakteriše mnogo manji unos toplote u osnovni materijal, jer se samo rame alata okreće tokom procesa spajanja [33].

2.4.2.2. Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem

Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem je postupak koji je razvijen 1993. godine [35]. Proces tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem se sastoji iz tri koraka, koji su prikazani na slici 10.



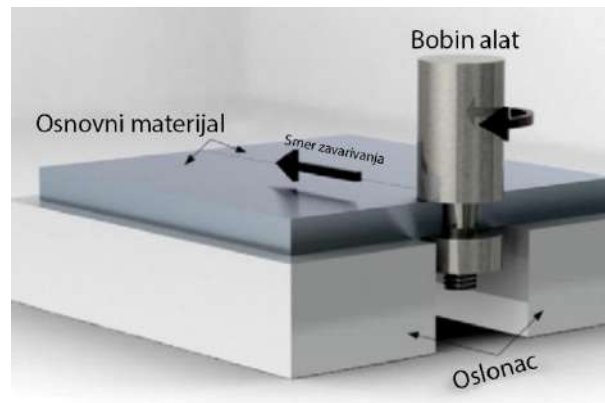
Slika 10. Šematski prikaz tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem [35]

Sa slike 10 se može videti da u prvom koraku (slika 10a) dolazi do probijanja osnovnog materijala, u drugom koraku (slika 10b) dolazi do mešanja dva materijala i u trećem koraku (slika 10c) se vrši povlačenje alata iz zahvata. Ono što se takođe može reći za ovaj proces je da se koristi za dobijanje preklopnih spojeva[31,35,36].

2.4.2.3. Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću dvostranog („bobin“) alata

Zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću dvostranog alata, koji se u literaturi naziva bobin (engl. Bobbin tool) predstavlja modifikaciju konvencionalnog postupka ZTM. Međutim, postoje ključne razlike u procesima zavarivanja koje se ogledaju u obliku alata. Bobin alat

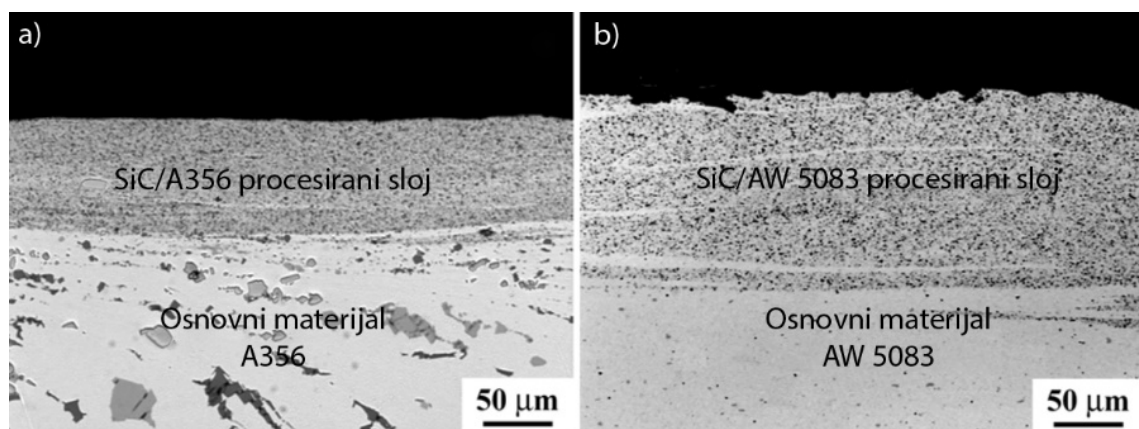
poseduje donje rame koje obuhvata osnovni materijal i prihvata ga sa donje strane [37]. Šema procesa je data na slici 11.



Slika 11. Šematski prikaz ZTM procesa sa bobin alatom [37]

2.4.2.4. Procesiranje zavarivanjem trenjem sa mešanjem

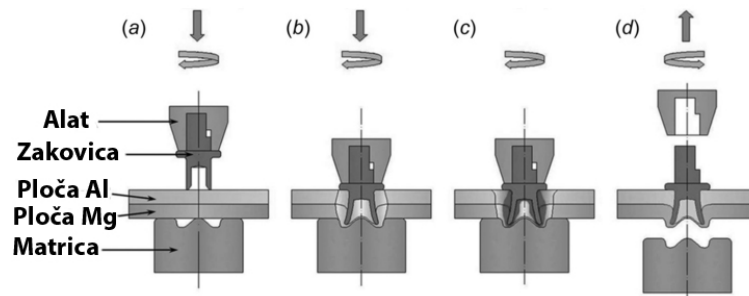
Procesiranje trenjem sa mešanjem se oslanja na principe zavarivanja trenjem sa mešanjem [38] (slika 7), odnosno to je proces pomoću kojeg se modifikuje površinski sloj materijala, utičući na mehaničke osobine i mikrostrukturu. Modifikacija površinskog sloja materijala se ostvaruje putem intenzivne plastične deformacije materijala, posredstvom rotacije alata, pomoću koje dolazi do dinamičke rekristalizacije zone mešanja [38]. Materijal se može procesirati samo prolazom alata, ali je takođe moguće i modifikovati površinu materijala dodatkom čestica koje se pomoću alata umešaju u površinu osnovnog materijala. Na slici 21 je dat primer dva materijala (A356 što je legura aluminijuma i silicijuma za livenje i AW 5083 što je legura aluminijuma i magnezijuma na plast. deformaciju) koji su podvrgnuti procesiranju trenjem sa mešanjem. Na površinu oba uzorka je nanet određeni udeo ojačavajuće faze (Silicijum karbid – SiC) koji je pomoću alata integrisan u površinski sloj osnovnog materijala, čime se u ovoj zoni dobija kompozitni materijal sa metalnom osnovom (*engl.* MMC – metal matrix composite). Sa slika 12a i 12b se jasno vidi procesirani sloj materijala u kojem preovladava sitnozrna struktura.



Slika 12. Prikaz procesiranog materijala: a) osnovni materijal A356; b) osnovni materijal AW5083 [38]

2.4.2.5. Zakivanje trenjem sa mešanjem

Zakivanje trenjem sa mešanjem je postupak sa kojim se ostvaruju uglavnom preklopni spojevi raznorodnih materijala [39]. Šema procesa zakivanja pomoću samo probijajuće nitne je data na slici 13.

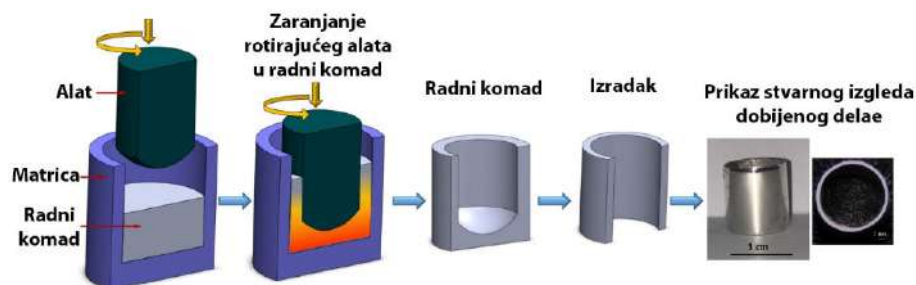


Slika 13. Prikaz procesa zakivanja trenjem sa mešanjem, pomoću takozvane samoprobijajuće nitne [43]

Sa slike 13 se jasno vidi da se proces zakivanja trenjem sa mešanjem odvija u četiri koraka. U prvom koraku se nitna (zakovica) naslanja na osnovni materijal uz rotaciju. U drugom koraku nitna razmekšava osnovni materijal i naslanja se na matricu. Treći korak je zapravo formiranje samog spoja, jer se nitna oblikuje prema matrici. Poslednji korak je zapravo izlazak iz zahvata [39]. Ovo je samo jedan od nekoliko postupaka zakivanja trenjem sa mešanjem koje su Kan i ostali spomenuli i objasnili u svom radu [39].

2.4.2.6. Ekstruzija trenjem sa mešanjem

Ekstruzija trenjem sa mešanjem je patentirana 2011. godine kao kombinacija procesa zavarivanja trenjem sa mešanjem i suprotnosmerog istiskivanja materijala [40]. Šema procesa ekstruzije trenjem sa mešanjem je data na slici 14.

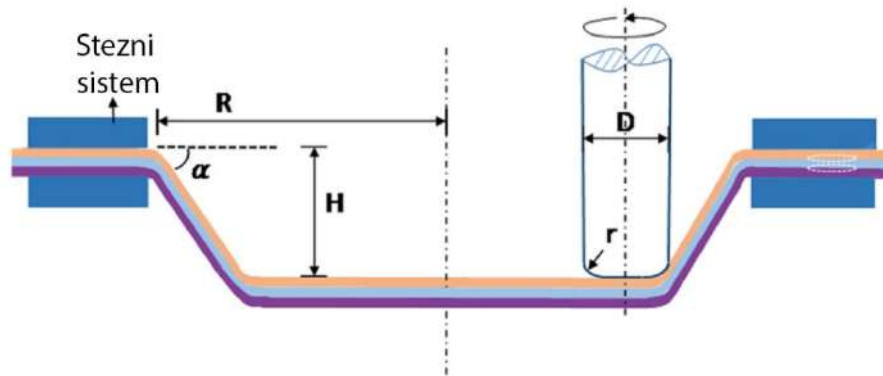


Slika 14. Šematski prikaz procesa ekstruzije trenjem sa mešanjem [40]

Sa slike 14 se jasno vidi da se rotirajući alat uranja u radni komad koji se nalazi unutar matrice. Toplota trenja koja nastaje usled trljanja rotirajućeg alata adekvatno zagreva uzorak, dok intenzivna plastična deformacija pri velikim brzinama deformacije opterećuje radni komad i gura materijal nagore (suprotno od smera kretanja alata) u prostoru između rotirajućeg alata i matrice [40].

2.4.2.7. Inkrementalno oblikovanje trenjem sa mešanjem

Inkrementalno oblikovanje pomoću trenja sa mešanjem je proces oblikovanja delova plastičnom deformacijom iz lima. Šema procesa je data na slici 15 [41].



Slika 15. Šematski prikaz inkrementalnog oblikovanja trenjem sa mešanjem [41]

Sa slike 15 se može konstatovati da je ovaj proces najbliži procesu dubokog izvlačenja. Razlika je u tome što se kod ovog procesa materijal oblikuje postepeno, pomoću alata koji se obrće oko svoje ose i posredstvom trenja omekšava radni predmet, omogućavajući lakše deformisanje materijala i manju silu tokom procesa [41].

2.4.3. Stvaranje i unos toplote

Sa aspekta formiranja zavarenog spoja, zavarivanje trenjem sa mešanjem se u potpunosti oslanja na stvaranje (generisanje) toplote. Parametri neophodni za formiranje zavarenog spoja su zapravo isti parametri za adekvatno generisanje toplote, a količina generisane toplote zavisi od geometrijskih karakteristika alata, brzine obrtanja i translacije alata, pritiska alata na osnovni materijal, koeficijenta trenja [30]. Za određivanje količine generisane toplote, kreće se od pretpostavke da se količina generisane toplote generiše kao zbir količine toplote usled adhezije i količine toplote generisane usled deformacije osnovnog materijala, što je predstavljeno formulom 1 [30]:

$$Q = Q_{adhez.} + Q_{def.} \quad (1)$$

Đurđanović u svom radu [30] navodi da količina generisane toplote zavisi od kontaktnih površina alata. Kod konvencionalnog postupka ZTM su površine trna (bokovi i čelo trna) i površina ramena. Kada se rečeno primeni na formulu 1, dobija se formula 2:

$$Q = Q_{vrh\ trna} + Q_{bok\ trna} + Q_{ramena} \quad (2)$$

U radu [30] se takođe navodi pretpostavka da se najveća količina toplote generiše tik ispod trna, ali ova pretpostavka nije u potpunosti eksperimentalno dokazana, niti opovrgnuta. Takođe se navodi da rame alata generiše oko 85% toplote, a trn 15% kada u osnovnom materijalu ne

postoji tehnološka rupa [30]. Ji (Yi) je u svom radu [42] koristio kalorimetrijsku metodu za određivanje količine unesene toplote i došao je do sledeće formule:

$$HI = 7,2V^{-0,80} \cdot N^{0,1} \cdot D^{0,55} \cdot d^{0,45} \cdot h^{0,3} \cdot \lambda^{0,4} \quad (3)$$

Gde je: HI – Generisana toplota [J/mm]; V – Brzina zavarivanja [mm/s]; N – Brzina obrtanja alata [rad/s]; D – Prečnik ramena [mm]; d – Prečnik trna [mm]; h – Visina trna [mm]; λ – Toplotna provodljivost materijala [W/mK].

Međutim prilikom zavarivanja pomoću bobin alata, generisanje toplote je kompleksnije zbog posebne geometrije alata koji poseduje dva ramena (gornje i donje), odnosno još jedan izvor toplote. Haba i ostali [43] su na osnovu Đurđanovićevog rada [30] bazirao svoj model i njegova polazna formula glasi:

$$Q = Q_{gornjeg\ ramena} + Q_{bok\ trna} + Q_{donjeg\ ramena} \quad (4)$$

Haba je u svom radu [43] koristio alat sa konkavnim geometrijama gornjeg i donjeg ramena, dok je trn alata cilindričan. Došao je do jednačine:

$$Q_t = \left[\frac{2\pi\mu\omega\tau_s(R_{us}^3 - R_p^3)}{3} \right] + \left[\frac{2\pi\mu\omega\tau_s(R_{ls}^3 - R_p^3)}{3} \right] + [2\pi\omega l_p R_p^2 \tau_s] \quad (5)$$

Gde je: Q_t – Količina generisane toplote [W]; μ – koeficijent trenja; ω – Ugaona brzina [s^{-1}]; τ_s – Smicajni napon usled trenja [MPa]; R_{us} – Radijus gornjeg ramena [mm]; R_{ls} – Radijus donjeg ramena [mm]; l_p – Dužina trna [mm]; R_p – Radijus trna [mm].

Na osnovu formule 5 konstatovano je da se količina generisane toplote povećava sa brzinom obrtanja alata, međutim smanjuje se sa povećanjem brzine zavarivanja, odnosno pomaka. Zatim konstatovano je da model generisanja toplote predstavljen formulom 5 sa velikom sigurnošću daje temperature koje su dobijene nezavisnim merenjem.

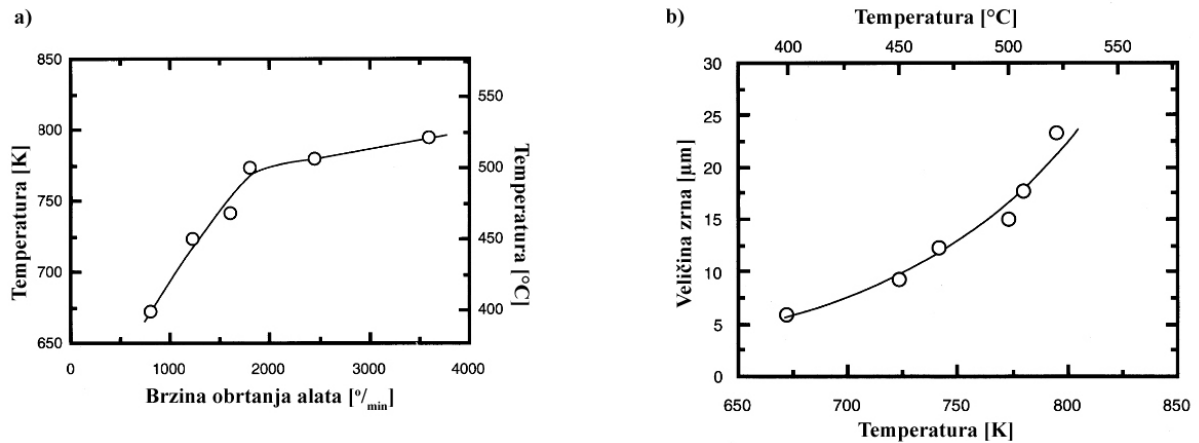
2.4.4. Parametri procesa zavarivanja i njihov uticaj zavareni spoj

Uticaj parametara koji se koriste u procesu ZTM je veoma značajan jer utiču na karakteristike zavarenog spoja i na strukturu zavarenog spoja [19,32,44,45]. Parametri koji najviše utiču na zavareni spoj su brzina obrtanja alata, brzina zavarivanja (odnosno pomak alata) [46].

2.4.4.1. Uticaj brzine obrtanja na zavareni spoj

Brzina obrtanja alata je veoma važna komponenta koja je direktno povezana sa količinom generisane toplote. U zavisnosti od uređaja koji se koristi prilikom procesa zavarivanja, zavisice i izbor brzine zavarivanja. Na primer, ako se koriste prilagođene mašine (vertikalne glodalice starijeg datuma proizvodnje), postižu se fiksne brzine obrtanja alata koje mašina može da iznese [32,47]. Ali ako se koriste CNC uređaji, moguće je dobiti mnogo širi dijapazon brzina koje

mašina može koristiti. U nekim slučajevima je čak i moguće menjati i prilagođavati brzinu obrtanja alata tokom procesa zavarivanja. Sato i ostali [48] su u svom radu pokazali da se sa povećanjem brzine obrtanja alata povećava i temperatura procesa (slika 16a), odnosno raste i količina generisanje toplote, što dovodi do porasta veličine zrna (slika 16b).

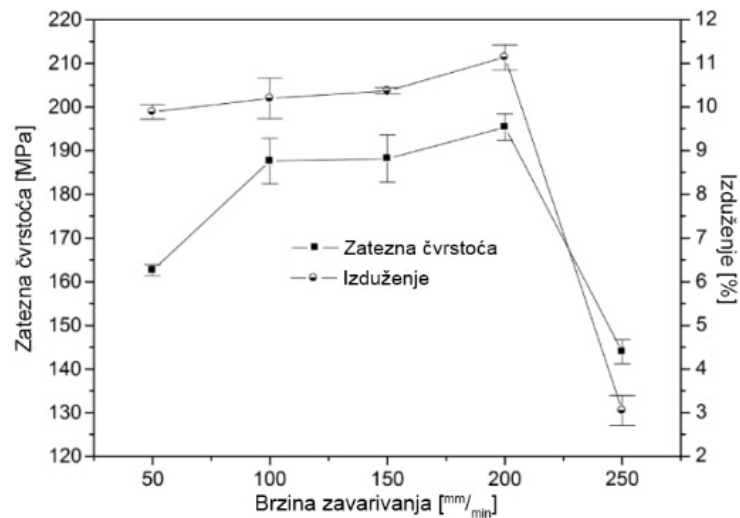


Slika 16. Prikaz zavisnosti: a) brzine obrtanja od temperature; b) veličine zrna u zavisnosti od temperature [48]

U istom radu [48] je pokazano da veličina zrna raste sa povećanjem količine generisane toplote tokom procesa zavarivanja. Drugim rečima, sa povećanjem brzine obrtanja alata raste i veličina zrna u zavarenom spoju, čime se značajno utiče na mehaničke osobine zavarenog spoja. Odnosno, sa povećanjem veličine zrna dolazi do smanjenja čvrstoće i žilavosti materijala kroz mehanizam obrnut procesu ojačavanju granicama zrna.

2.4.4.2. Brzina zavarivanja – Pomak alata

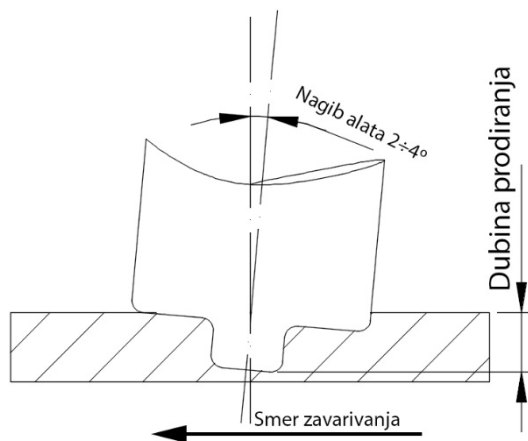
Brzina zavarivanja je brzina kojom se alat kreće duž linije spoja. Kretanje alata je u većini slučajeva pravolinijsko i zavisi od karakteristika materijala koji se zavaruje [17]. Brzina zavarivanja više utiče na pojavu grešaka (tunela ili crvotočina) unutar zavarenog spoja, odnosno, pri većim pomacima postoji veći rizik od nastanka istih [7]. Do ove pojave dolazi isključivo pri velikim pomacima, jer razmekšani materijal na stiže do strane napredovanja šava i popuni šupljinu (tunel ili crvotočinu) nastalu usled rotacije alata [7]. Liu i ostali [49] su ispitivali uticaj brzine zavarivanja na mehaničke osobine zavarenog spoja i ustanovili su da sa povećanjem brzine zavarivanja, raste i veličina zrna u zoni mešanja. Takođe je ustanovljeno da se zavareni spojevi bez defekata dobijaju pri manjim brzinama zavarivanja. Na kraju je ustanovljeno da sa povećanjem brzine zavarivanja rastu i mehaničke osobine zavarenog spoja (slika 17). Ali iznad pomaka od 200 [mm/min] dolazi do intenzivnog pada mehaničkih osobina.



Slika 17. Prikaz uticaja brzine zavarivanja na zatezne karakteristike zavarenog spoja [49]

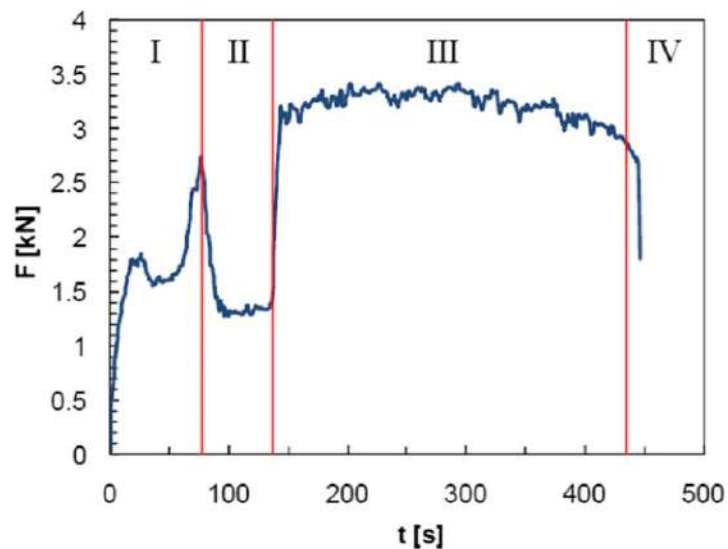
2.4.4.3. Uticaj nagiba i dubine prodiranja alata

Dubina prodiranja se definiše kao najniža tačka ispod ramena alata. Utiskivanje ramena u osnovni materijal, obezbeđuje pritisak kojim alat deluje na osnovni materijal čime omogućava adekvatan tok materijala [7,50,51]. Značajnije uranjanje ramena alata se postiže nagibom alata od dva do četiri stepena u odnosu na vertikalu (slika 18). Prilikom nagiba alata, prednji deo alata je viši u odnosu na zadnji deo alata, sa čime se poboljšava kvalitet šava (šav može dostići zateznu čvrstoću od oko 75÷89% zatezne čvrstoće osnovnog materijala) [50]. Na slici 18 je prikazan crtež na kojem se jasno vidi nagib i dubina prodiranja alata.



Slika 18. Prikaz Nagiba alata i dubine prodiranja

Dubina prodiranja mora da bude odgovarajuća (nju diktira sila prodiranja alata koju obezbeđuje uređaj za zavarivanje) kako bi osigurao adekvatan kontakt alata sa osnovnim materijalom što je neophodno za uspešan proces zavarivanja [5,7,50,52]. Karakteristična promena vertikalne sile tokom ZTM je data na slici 19.



Slika 19. Prikaz zavisnosti sile u vremenu tokom procesa ZTM [52]

Sa slike 19 se jasno identifikuju četiri karakteristične oblasti: I – Prodiranje trna u osnovni materijal, II – Držanje alata, III – Zavarivanje, IV – Izvlačenje alata iz zahvata. Prilikom inicijacije kretanja alata duž linije spoja, imamo porast sile i ona ostaje prilično konstantna tokom procesa zavarivanja. Sa izlaskom alata iz zahvata, dolazi do pada sile. Prekomerna opterećenost delova mašine za zavarivanje trenjem sa mešanjem, može dovesti do međusobnih deformacija delova u mašini što rezultuje pojavu grešaka ili vibracija pri zavarivanju što može da dovede do pojave defekata, odnosno grešaka kao što je na primer pojava tunela ili crvotočina (šupljina u šavu). Prekomerna dubina prodiranja (uslovljena prekomernom silom) dovodi do potpunog prodiranja trna kroz osnovni materijal što dovodi do trenja o podložnu ploču (pribor za stezanje) ili čak može doći do značajnog smanjenja debljine šava u odnosu na osnovni materijal [7,50]. U literaturi [52] se navodi da vreme držanja ne utiče značajno na vrednost sile tokom procesa zavarivanja.

2.4.5. Karakteristične greške u konvencionalnim ZTM spojevima

Greške kod spojeva izvedenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem se mogu javiti i narušiti kako izgled spoja, tako i mogu smanjiti njegove mehaničke osobine. Standard ISO 25239 – 5:2020 [53] definiše greške koje se mogu javiti prilikom ovog postupka zavarivanja, standard takođe propisuje i nivo prihvatljivosti grešaka. Greške se dele u četiri grupe:

- Površinske greške I tipa
- Površinske greške II tipa
- Unutrašnje greške
- Greške korena

Površinske greške I tipa su greške koje se (kao što samo ime implicira) javljaju na površini zavarenog spoja i one ne utiču na promenu debljine zavarenog spoja, a greške koje se nalaze u

ovoj grupi su: istisnuti materijal (*engl.* Toe flash), linearno smicanje (*engl.* Linear misalignment), ugaono smicanje (*engl.* Angular misalignment), Deformacija zone spoja (*engl.* Joint area deformation) i neregularnost lica šava (*engl.* Irregular surface).

Površinske greške II tipa su greške koje utiču (menjaju) poprečni presek zavarenog spoja. Ovoj grupi pripada nepopunjenost zone mešanja (*engl.* Underfill) i površinska pora (*engl.* Cavity). Unutrašnje greške su greške koje se javljaju u zapremini zavarenog spoja i uglavnom zahtevaju metalografsku analizu da bi se uočile. U ovu grupu grešaka spadaju: šupljine, odnosno tuneli i crvotočine (*engl.* Cavity), kuka (*engl.* Hook), nepotpuna penetracija (*engl.* Incomplete penetration) i uključci.

Greške korena se javljaju u korenu zavarenog spoja. One se mogu otkriti metalografskim ispitivanjem ili se uočavaju prilikom ispitivanja savijanjem. Greške koje pripadaju ovoj grupi su: ostaci ivice spoja u metalu šava (*engl.* Bonded joint remnant) i ostaci ivice spoja van metala šava (*engl.* Unbonded join remnant).

2.4.5.1. Istisnuti materijal

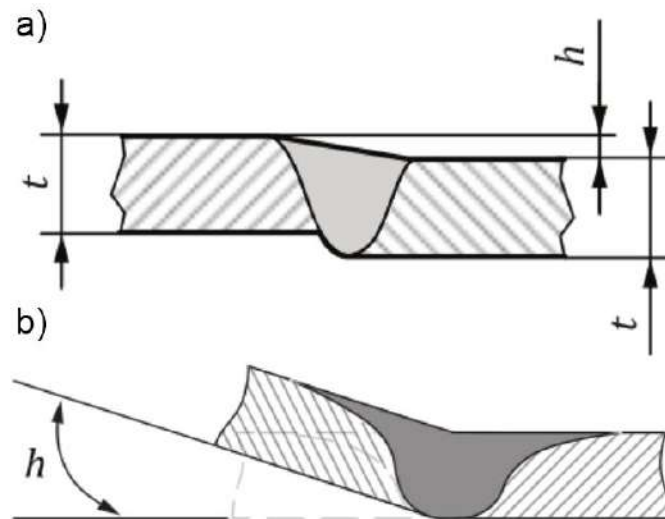
Istisnuti materijal ili kako se žargonski zove fleš je materijal koji je istisnut iz zone mešanja tokom procesa zavarivanja. Na pojavu istisnutog materijala utiče mnogo faktora, neki od njih su: pritisna sila, brzina obrtanja alata, pomak (brzina zavarivanja) alata, nagib alata, geometrija ramena alata itd. Šematski prikaz istisnutog materijala (crne strelice) je dat na slici 20.



Slika 20. Šematski prikaz istisnutog materijala [53]

2.4.5.2. Smicanje materijala

Pod pojmom smicanje materijala se smatra odstupanje od horizontalne ravni zavarenog spoja. Smicanje osnovnog materijala može biti linearno (slika 21a) i ugaono (slika 21b). Ovaj tip greške nastaje uglavnom usled neadekvatnog poravnavanja, stezanja ili kombinacije pomenutih faktora.



Slika 21. Prikaz linearnog smicanja (a) i ugaonog smicanja (b) [53]

Standard ISO 25239 – 5:2020 [53] propisuje tri nivoa prihvatljivosti za ovaj tip greške. Što se tiče linearnog smicanja, „B“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 0,1t$ ili 1 mm, šta god da je manje; „C“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 0,2t$ ili 2 mm, šta god da je manje i „D“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 0,3t$ ili 3 mm, šta god da je manje. Sa druge strane, za ugaono smicanje, „B“ nivo prihvatljivosti toleriše nagib $h \leq 2^\circ$; „C“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 3^\circ$, dok se „D“ nivo prihvatljivosti ne koristi.

2.4.5.3. Deformacija regije spoja

Deformacija regije spoja (slika 22) može da nastane usled kombinacije neadekvatnog stezanja i prekomerne pritiskne sile alata.



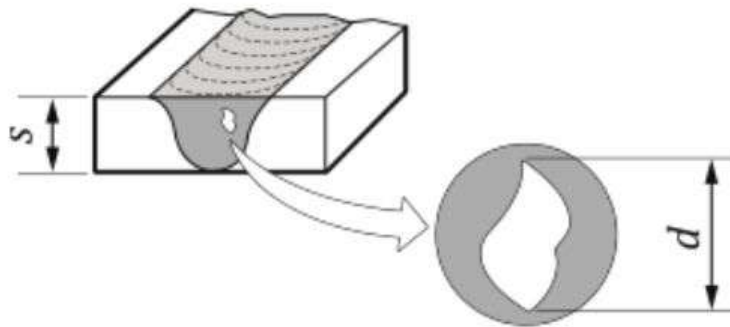
Slika 22. Prikaz deformacije zone spoja [53]

Standardom ISO 25239 – 5:2020 [53] su propisani nivoi prihvatljivosti: „B“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 0,1s$, a „C“ nivo prihvatljivosti toleriše $h \leq 0,2 \div 0,1s$.

2.4.5.4. Šupljine (tuneli i crvotočine)

Tuneli i crvotočine su greške koje su obično karakteristične za spojeve koji se izrađuju ZTM postupcima i nalaze se uglavnom na strani napredovanja šava [7]. Razlika između tunela i

crvotočine je ta što tuneli imaju početak i kraj, dok crvotočina ima otvor kroz koji se može videti kraj zavarenog spoja [9]. Šematski prikaz šupljine je dat na slici 23.

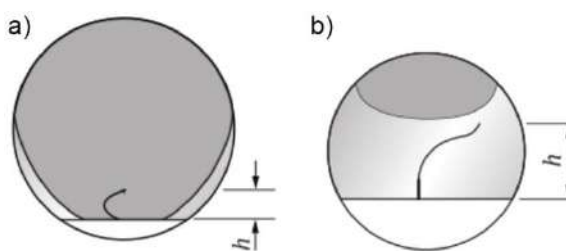


Slika 23. Šematski prikaz šupljine [53]

U standardu ISO 25239 – 5:2020 [53] se navodi da ako postoji dve ili više šupljina koje su veoma blizu jedna druge, smatraju se kao jedna šupljina. Takođe se navode i nivoi prihvatljivosti. „B“ nivo prihvatljivosti ne toleriše se šupljine, odnosno šav ih ne sme sadržati. „C“ nivo prihvatljivosti dopušta šupljine ako se poštuje uslov $d \leq 0,2s$ ili 4 mm, šta god da je manje.

2.4.5.5. Ostaci ivice spoja

Ostaci ivice spoja u i van metala šava se žargonski zovu kissing bonds (*engl.* Kissing Bonds) ili lejzi es (*engl.* Lazy S). Karakteristične su greške koje se javljaju prilikom konvencionalnog zavarivanja trenjem sa mešanjem. Nastaje tokom zavarivanja tako što površinski sloj oksida ulazi u zonu mešanja koji ostaje zarobljen i otežava, a u nekim slučajevima sprečava spajanje dve ploče [7]. Prikaz dva tipa ostataka ivice spoja je dat na slici 24.



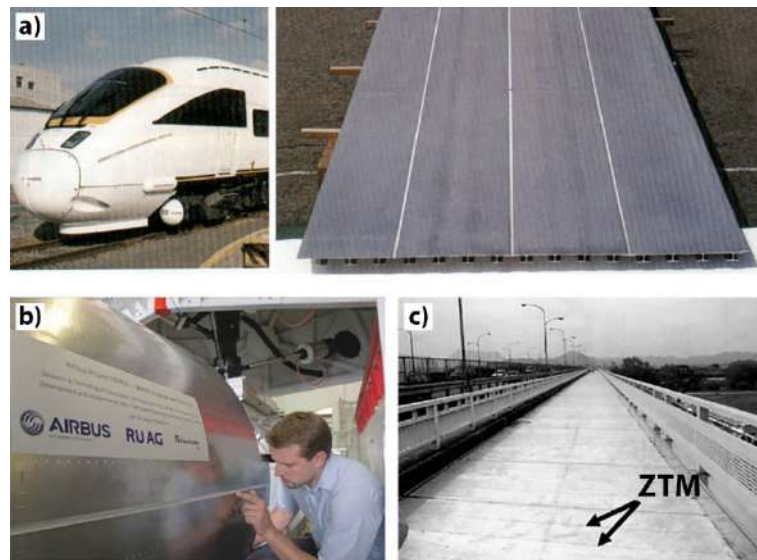
Slika 24. Prikaz ostatka spoja: a) u metalu šava; b) van metala šava [53]

2.4.6. Primena, prednosti i nedostaci ZTM postupka

2.4.6.1. Primena

Zavarivanje trenjem sa mešanjem je proces sa veoma širokim poljem primene u raznim granama industrije, kao što su aeronautika, brodogradnja, železnička industrija, automobilska industrija i mnoge druge. U aeronautičkoj industriji ZTM proces se koristi kako bi se ostvarile uštede (kako ekonomske prirode, tako i ušteda sa stanovišta redukcije mase) prilikom izgradnje

letelice. Tipična upotreba ZTM – a je prilikom izrade krila, podnih panela, putničkog dela trupa, pa čak i segmenti opreme za sletanje [54]. U brodogradnji ZTM se uglavnom koristi za spajanje bočnih i podnih panela, platforme za sletanje helikoptera, izmenjivači toplote itd. Železnička industrija je odavno uvela ZTM proces za izgradnju segmenata (podovi krovovi i bočni paneli) vagona brzih vozova [8,54]. Automobilska industrija postepeno uvodi ZTM postupak zavarivanja i trenutno se najviše koristi za izradu mehaničkih komponenti kod kojih se javljaju dugački šavovi bilo da su pravolinijski ili imaju neku drugačiju geometriju [54]. Postupak ZTM se ne koristi kod zavarenih spojeva gde je potrebna ispuna (žljeb u osnovnom materijalu), te su uobičajene geometrije spojeva koje se koriste za ZTM su prikazane na slici 25 [55].



Slika 25. *Primena procesa ZTM: a) spajanje segmenata poda u vozovima; b) spajanje segmenata trupa aviona i c) spajanje segmenata mostova [55]*

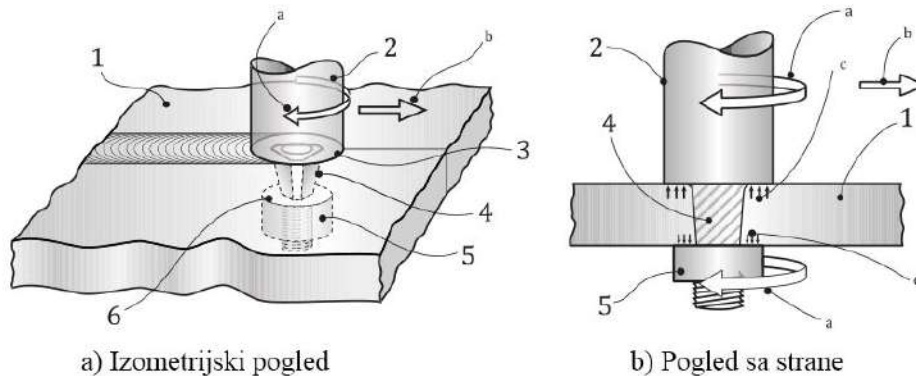
2.4.6.2. Prednosti

Spojevi izvedeni postupcima ZTM imaju finostrnu strukturu u zavarenom spoju što rezultuje u boljim mehaničkim osobinama zavarenog spoja u odnosu na OM. Koeficijent korisnog dejstva (efikasnost) zavarenog spoja može dostići vrednost od preko 90% [21,56], a u pojedinim slučajevima, kada OM nije termički obrađen može biti i preko 100 %, što znači da zavareni spoj ima veću zateznu čvrstoću u odnosu na OM [20]. Generalno, prednosti ZTM postupka se mogu podeliti u tri grupe, a to su: metalurške, energetske i ekološke prednosti.

Metalurške prednosti:

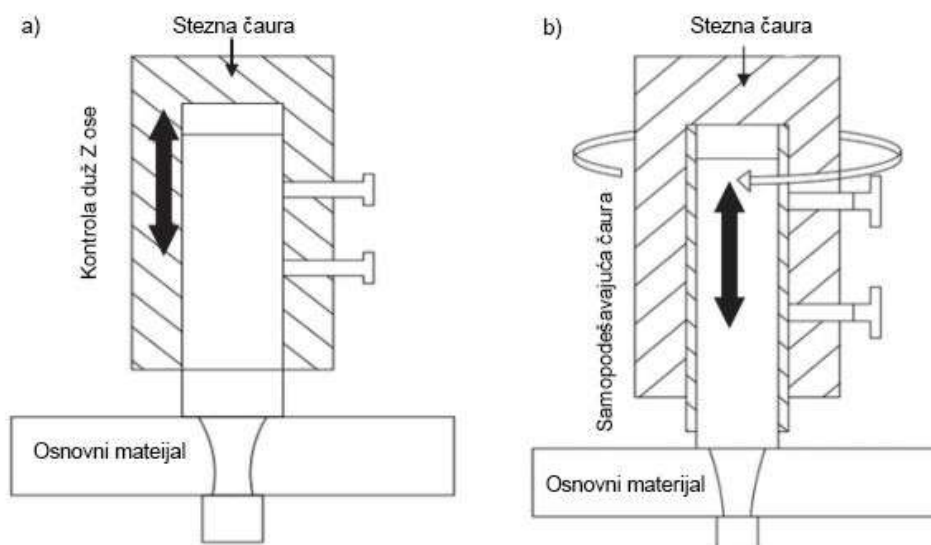
- Proces koji se odvija u čvrstom stanju
- Veoma velika dimenziona stabilnost materijala tokom procesa spajanja
- Nema gubitka legirajućih elemenata
- Odlične osobine zavarenog spoja
- Sitnozrna struktura zavarenog spoja
- Nema pojave vrućih prslina

Analizom slike 26 se jasno mogu uočiti razlike između dva tipa alata. Donje rame prihvata osnovni materijal sa donje strane i koje ujedno deluje kao dodatni izvor toplote prilikom postupka zavarivanja. Šematski prikaz procesa zavarivanja je dat na slici 27 [29].



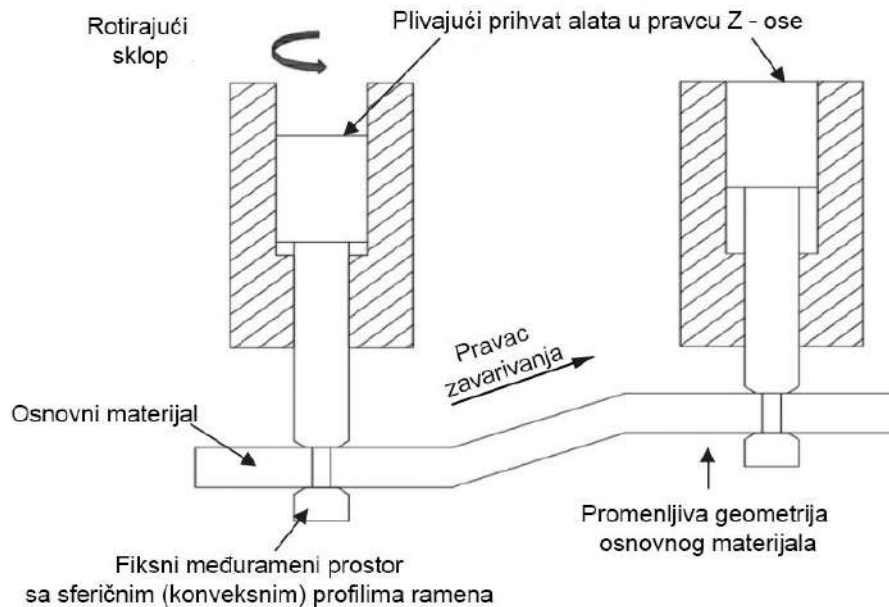
Slika 27. Šematski prikaz ZTM sa bobin alatom; 1 osnovni materijal, 2 gornji segment alata, 3 gornje rame, 4 trn, 5 donji deo alata, 6 donje rame; a smer obrtanja alata, b smer zavarivanja, c sila na gornje rame, d sila na donje rame [29]

Može se konstatovati da je proces zavarivanja sa bobin alatom veoma sličan konvencionalnom procesu (isti koraci se sprovedu da se ostvari spoj), međutim vertikalna sila koja je obavezna za obavljanje konvencionalnog procesa ZTM je u potpunosti eliminisana, jer se osnovni materijal nalazi između gornjeg i donjeg ramena (slika 27b). Reaktivne sile (c i d) koje su šematski prikazane na slici 27b opterećuju trn alata na zatezanje. Ako je alat loše konstruisan ili ako je loša termička obrada alata, može doći do prevremenog zamornog loma alata na mestu trna usled kombinacije cikličnog opterećenja i zatezanja trna. Takođe, loše pozicioniranje alata može više ili manje opteretiti trn. Iz tog razloga su razvijena dva koncepta zavarivanja sa bobin alatom. To su zavarivanje sa fiksnim i plivajućim prihvatom alata, a oni su šematski prikazani na slici 28.



Slika 28. Šematski prikaz: a) fiksnog i b) plivajućeg prihvata za bobin alat [9]

Fiksni prihvati alata se uglavnom koriste isključivo za pravolinijske spojeve kod kojih nema pomeranja u pravcu Z – ose (uz pažljivo podešavanje). Izvedba sa plivajućim prihvatom alata koristi na spojevima kod kojih je neophodno ispratiti liniju spoja u pravcu Z – ose (slika 29), ali se takođe koristi kod pravolinijskih spojeva gde je teže podesiti alat.



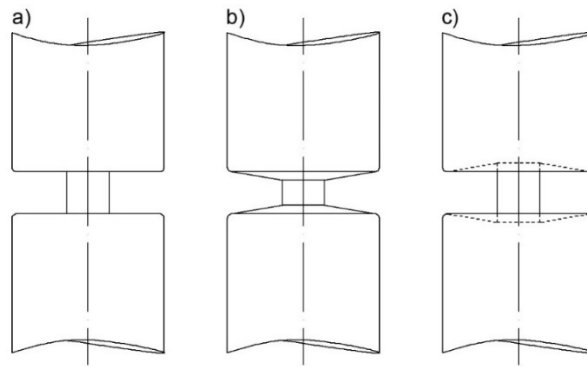
Slika 29. Prikaz principa rada sa plivajućim prihvatom bobin alata [9]

Upotrebom bobin alata se eliminišu greške u zavarenim spojevima koje su karakteristične za konvencionalni ZTM postupak, kao što su linearno i ugaono smicanje spoja, ostaci ivice spoja (neprovar).

2.5.1. Delovi alata

2.5.1.1. Rame alata

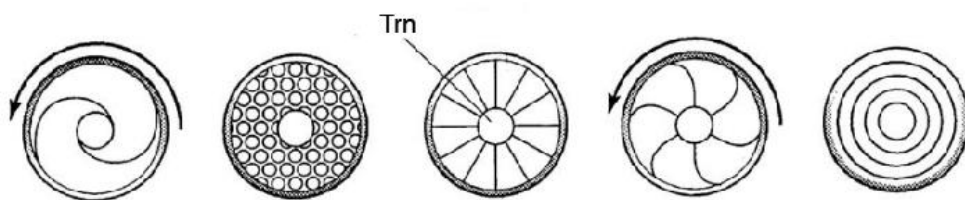
Geometrija ramena ima značajnu ulogu u procesu ZTM, jer je ona u stalnom kontaktu sa osnovnim materijalom i ona najviše stvara toplotu usled trenja. Razlikuju se ravna konveksna (ispupčena) i konkavna (udubljena – takozvani rezervoar) geometrija (profil) ramena (slika 30). Geometrija alata značajno utiče na osobine zavarenog spoja kao što su hrapavost lica/korena ili mehaničke osobine [20,58–61].



Slika 30. Prikaz geometrija ramena bobin alata za ZTM: a) ravna geometrija b) konveksna geometrija ramena; c) konkavna geometrija

Mishra i Mahney [7] su konstatovali da konkavna geometrija ramena daje kvalitetne šavove i relativno se lako može izraditi i čistiti. Konkavna šupljina se definiše kao ugao između ivice ramena i trna, a on se kreće u dijapazonu od $6 \div 10^\circ$. Kada alat uđe u osnovni materijal, trn izgura višak materijala u konkavnu šupljinu. Izgurani materijal, služi kao „rezerva“ za takozvano kovačko delovanje ramena alata na šav. Pomeranje alata tera nove količine osnovnog materijala u konkavnu šupljinu ramena (rezervoar), a novi materijal tera stari materijal (uz pomoć gravura) iz šupljine ka trnu.

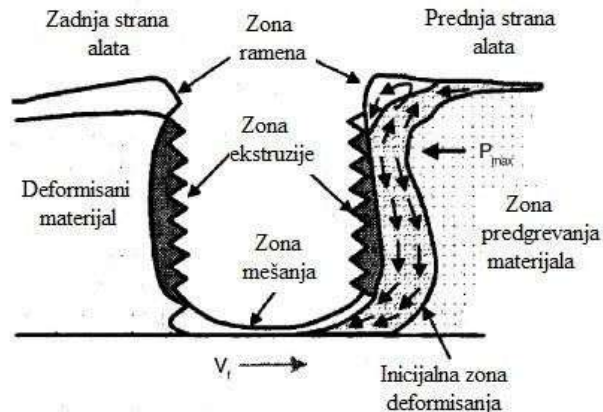
Ravna geometrija ramena (slika 30a) je definitivno najlakša za izradu, međutim ravna geometrija (profil) ramena ima veliki nedostatak, a to je da ne zadržava razmekšani materijal i izbacuje ga sa strane u vidu istisnutog materijala, fleša (*engl.* Flash) [9] o čemu će kasnije biti reči. Što se tiče alata sa konveksnom geometrijom (slika 30c), prvi (neuspešno) pokušaji upotrebe (konvencionalnog ZTM) alata sa konkavnom geometrijom alata su obavljani na Zavarivačkom institutu TWI u Velikoj Britaniji [7]. Problem pri upotrebi alata (za konvencionalni postupak ZTM) sa konveksnom geometrijom ramena (slika 30b) je u tome što konveksna geometrija udaljava materijal od trna, umesto da ga usmerava materijal ka trnu. Jedini uspešan pokušaj upotrebe konveksne geometrije ramena bio je kada je konveksna geometrija ramena bila glatka, prečnika 5 mm pri zavarivanju lima debljine 0,4 mm. Alati za zavarivanje materijala većih debljina su realizovani tek pošto je na konveksnu geometriju dodata zavojnica koja gura materijal ka trnu koji dalje gura materijal u zonu mešanja [7]. Međutim kod bobin alata za ZTM, postignuti su obećavajući rezultati [32,47,60] gde su dobijeni šavovi bez defekata sa dobrim mehaničkim osobinama, jer se materijal „pritiska sa obe strane“ što uzrokuje većim stepenom plastične deformacije, a ujedno i većim stepenom deformacionog ojačavanja. Pored prikazanih geometrija ramena mogu se izrađivati i alati sa kombinacijom geometrija ramena sa slike 31.



Slika 31. Prikaz nekih geometrija koje se mogu naći na ramenu alata [7]

2.5.1.2. Trn alata

Trn je tokom procesa zavarivanja unutar osnovnog materijala (slike 7 i 27.) i trn pored toga što formira takozvani grumen zavarenog spoja služi za dodatno usmeravanje razmekšanog osnovnog materijala (slika 32) [7]. Trn kod bobin alata za ZTM pored pomenutih uloga služi i za povezivanje gornjeg i donjeg ramena alata [9].



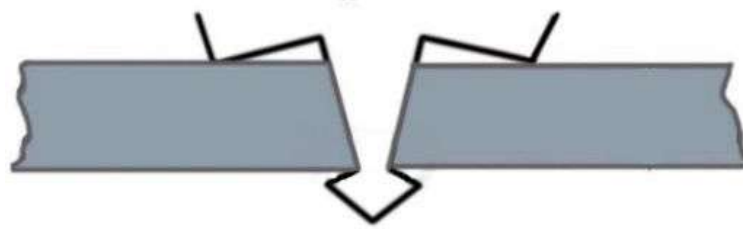
Slika 32. Prikaz kretanja materijala oko trna sa gravurom tokom procesa zavarivanja sa klasičnim ZTM alatom [7]

Tokom procesa razmekšani materijal (od strane trna) ulazi u gravuru koja ga dalje meša (deformiše) i sprovodi ka dole (smer navoja), slika 32. Kod bobin alata za ZTM se mogu naći alati koji imaju „dvostruki navoj“ (levi i desni simetrično urezan u trn) [57] koji je prikazan na slici 33. Ovakva gravura na trnu usmerava razmekšan materijal ka gornjem i donjem ramenu kako bi se OM dodatno podvrgnuo plastičnoj deformaciji koja izaziva dinamičku rekristalizaciju, pomoću koje se dobija fino zrna struktura grumena.



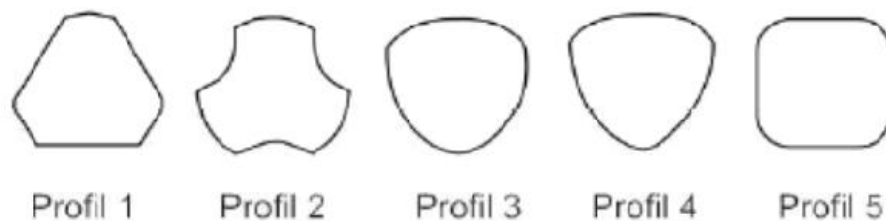
Slika 33. Prikaz trna sa dvostrukim navojem [57]

Upotrebom ovakve geometrije (gravure) trna se postiže drugačiji tok materijala, odnosno simetričan raspored „razmekšanog“ osnovnog materijala ka gornjem i donjem ramenu [57]. Pored konvencionalnog oblika trna (paralelne izvodnice), trn može imati koničan oblik (slika 34) [62].



Slika 34. Prikaz koničnog oblika trna [62]

Tomas i ostali [63] navode da konični trn kod bobin alata za ZTM dovodi do smanjenja kontaktne površine na donjem ramenu što rezultuje manjim otporom, odnosno lakšim kretanjem kroz materijal što je posledica smanjenog obrtnog momenta koji deluje na alat. Takođe navode kako su opterećenja tokom zavarivanja ne uniformna po preseku i da koničan trn zahvata mnogo manje materijala u odnosu na trn sa paralelnim izvodnicama [63]. Oblik trna, odnosno poprečni presek trna može biti različitih oblika, najčešće se sreću cilindrični trnovi, radi lakše izrade, međutim poligonalni trnovi (takozvani triveks trnovi) daju bolje zavarene spojeve [20,32,47]. Prikaz poligonalnih preseka trnova je dat na slici 35.



Slika 35. Prikaz poligonalnih „Triveks“ oblika trna [5,56]

2.5.2. Materijal za izradu alata

Materijal od kog se izrađaju alati za ZTM mora da poseduje otpornost na habanje i visoku temperaturu, odnosno da zadrži svoje osobine prilikom generisanja toplote neophodne za proces zavarivanja. U literaturi [7,8,32,64] se mogu naći različiti materijali koji se koriste za izradu alata. Najčešće korišten materijal za izradu, a uglavnom i najjeftiniji je čelik. Najčešće se primenjuje alatni čelik za rad na toplo, kao što su EN X38CrMoV5-1 (AISI H11) i EN X40CrMoV5-1 (AISI H13). Ti čelici se nakon obrade iz polufabrikata obavezno podvrgavaju procesu termičke obrade (kaljenje i otpuštanje). Nakon kaljenja preporučuje se dvostepeno visoko temperaturno otpuštanje kako bi se postigla adekvatna žilavost materijala sa tvrdoćom u rasponu 48÷54 HRC, mada se u literaturi [65] navodi da se u nekim slučajevima ide i na trostepeno otpuštanje. U tabeli 1 su predstavljene preporuke za materijale alata u zavisnosti od osnovnog materijala koji se zavaruje.

Uvidom u tabelu 1 uočava se da se pored čelika koriste alati na bazi volframa (W) i volfram karbida (WC). Koriste se i alati sa prevlakama od kubnog bor nitrida (PCBN). Zanimljivo je napomenuti da je moguće izraditi alat (za konvencionalni ZTM postupak) od čeličnog vijka M20 [8], ali takav alat bi se mogao koristiti za neke manje odgovorne spojeve i naravno, vijak od kojeg se alat izrađuje morao bi biti u određenom kvalitetu (npr. 10.9 ili 12.9).

Tabela 1. Prikaz materijala od kojih se izrađuju alati za ZTM [7]

Osnovni materijal	Debljina osnovnog materijala		Materijal alata
	mm	Inča	
Al i legure Al	<12	<0,5	Alatni čelik; WC – Co
	<26	<1,02	Legure Ni i Co
Mg i legure Mg	<6	<0,24	Alatni čelik; WC
Cu i legure Cu	<50	<2	Legure Ni, PCBN, legure W
	<11	<0,4	Alatni čelik
Ti i legure Ti	<6	<0,24	Legure W
Nerđajući čelik	<6	<0,24	PCBN, legure W
Niskolegirani čelik	<10	<0,4	WC; PCBN
Ni i legure Ni	<6	<0,24	PCBN

2.5.3. Uređaji za zavarivanje

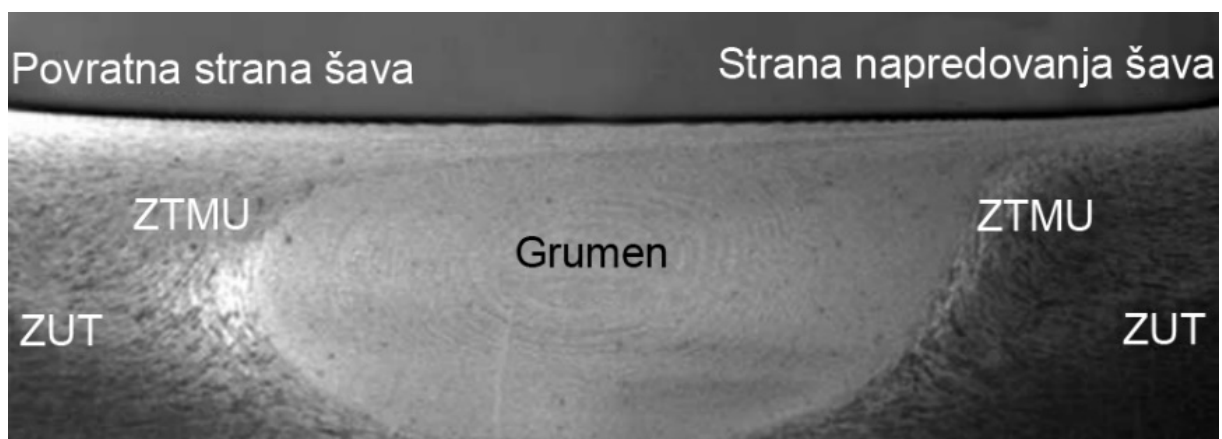
Uređaj za zavarivanje trenjem sa mešanjem treba da poseduje adekvatnu krutost tokom procesa spajanja materijala, kako bi na kraju imali uspešno zavaren deo. Postoje dve izvedbe uređaja za ZTM u industrijskim uslovima: prva izvedba je namenski uređaj za ZTM (slika 36a), a druga izvedba je u vidu robotske ruke (slika 36b). Stacionarni uređaj za zavarivanje je više namenjen za pravolinijske šavove relativno velike dužine. Robotski uređaj prikazan na slici 36b je prikladniji za izvođenje kompleksnijih kontura zavarenih spojeva, ali mogu se izvoditi i šavovi prostijih geometrija, međutim njihov radni vek je dosta manji nego kod mašina koje rade isključivo linearne spojeve. Kod zavarivanja sa robotskim uređajem (rukom) smanjena je krutost u odnosu na stacionarni uređaj, te se mogu javiti vibracije tokom zavarivanja prilikom upotrebe određenih pomaka alata. Takođe je upitna krutost robotske ruke prilikom zavarivanja sa bobin alatom [66]. Mašine koje definitivno mogu poslužiti kao alternativa su vertikalne glodalice [20,21,47], mada njihova glavna mana (stariji, analogni uređaji) je ta što uglavnom ne pokrivaju opsege (pomaka i brzine obrtanja alata) koje specijalizovani uređaji nude. Doduše, na CNC glodalicama je moguće izprogramirati program kretanja, kao i parametre (brzinu obrtanja i pomak alata) preko G – koda koji se učitava u mašinu. Jedini nedostatak je uglavnom odsustvo merne ćelije pomoću koje se može pratiti sila u pravcu Z – ose. Za eksperimentalne potrebe, vrlo često se koriste i konvencionalne glodalice, poželjno veće snage i krutosti. Ovi uređaji se uz pogodne pribore i alate uspešno mogu koristiti za ZTM, što je i potvrđeno u nekoliko publikacija [17,20,47,67].



Slika 36. a) uređaj za ZTM [68]; b) robotska ruka za ZTM [69]

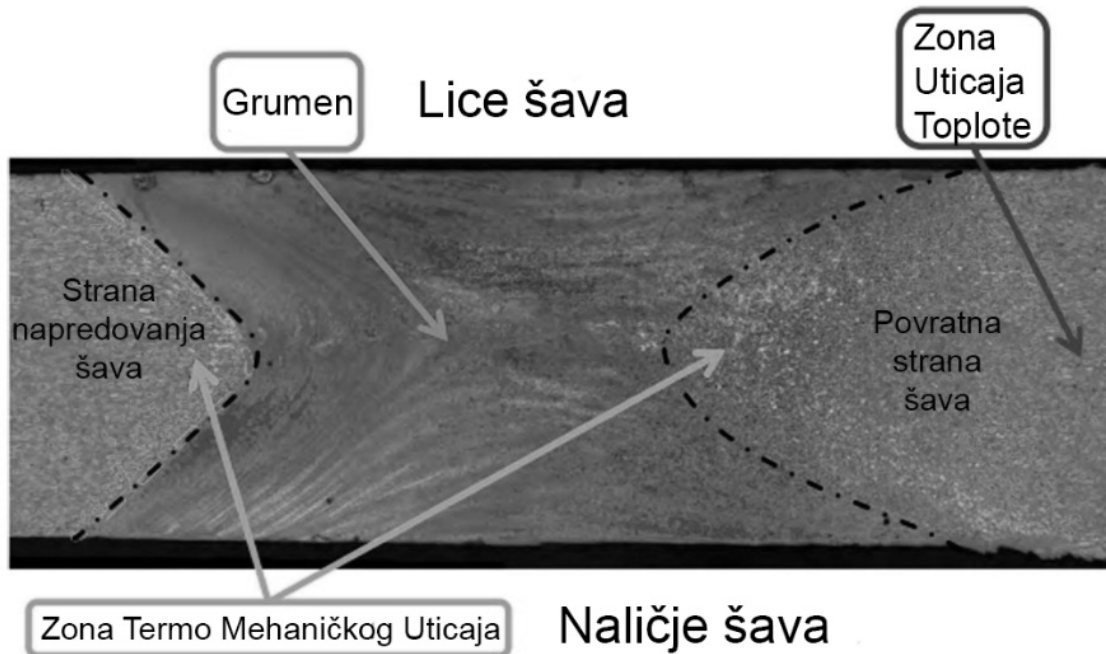
2.5.4. Izgled zavarenog spoja

Zavareni spojevi dobijeni zavarivanjem trenjem sa mešanjem imaju morfološki drugačiju makrostrukturu u odnosu na spojeve koji se dobijaju postupcima topljenjem. Spojevi dobijeni postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem imaju karakterističan oblik koji se može videti na slici 37.



Slika 37. Prikaz spoja dobijenog ZTM [5]

Makroskopska analiza poprečnog preseka prikazana na slici 37 omogućava identifikaciju svih karakterističnih regija zavarenog spoja, kao što su grumen (zona mešanja), zona termo mehaničkog uticaja (ZTMU), zona uticaja toplote (ZUT), kao i strana napredovanja šava (SNŠ) i povratna strana šava (PSŠ). U slučaju zavarivanja pomoću bobin alata, regije unutar spoja su podjednako prepoznatljive, ali zona mešanja razvija specifičan makrostrukturni profil koji oblikom asocira na peščani sat, što predstavlja jasnu geometrijsku razliku u odnosu na konvencionalne ZTM spojeve (slika 38).



Slika 38. Prikaz spoja zavarenog sa bobin alatom [9]

2.5.4.1. Grumen/zona mešanja

Grumen (*engl.* nugget) ili kako se još može naći u literaturi [9] zona mešanja (*engl.* stir zone) nastaje direktnim delovanjem rotacije trna alata. Grumen se formira usled dinamičke rekristalizacije osnovnog materijala, rezultujući u sitnozrnu strukturu unutar te regije [49]. Grumen, odnosno zonu mešanja kod postupaka zavarivanja sa bobin alatom možemo podeliti u tri regije:

1. Gornja zona mešanja (GZM)
2. Srednja zona mešanja (SZM)
3. Donja zona mešanja (DZM)

Širina i oblik grumena u mnogome zavisi od oblika i dimenzija trna [9,70] i struktura zone grumena je ujednačena finostrukturna [9,64,71,72]. U literaturi [64] se navodi da prosečna veličina unutar grumena u granicama $6\div 8\ \mu\text{m}$ prilikom zavarivanja legure EN AW 6082 – T6, mada se u literaturi [73] takođe pominje da veličina zrna zavisi i od razmaka između gornjeg i donjeg ramena („međurameni prostor“). Sitnozrna struktura grumena omogućuje mehanizam ojačavanja granicama zrna, kojom se u određenoj meri može zameniti mehanizam taložnog ojačavanja kod termički obrađenih legura aluminijuma i koja zavarenim spojevima takvih materijala daje relativno visoke mehaničke osobine [20].

2.5.4.2. Zona termo mehaničkog uticaja – ZTMU

Zona termo mehaničkog uticaja nastaje usled delovanja rotacije alata oko svoje ose i njegovog kretanja. Termički ciklusi i efekat „izvlačenja“ osnovnog materijala od strane trna zapravo formiraju ZTMU i ona je delimično dinamički rekristalizovana zbog nedovoljnog zagrevanja

materijala. Ovo sve dovodi do pojave izduženih zrna unutar ove zone [9,74]. U određenim izvorima [74–76] se navodi da je primećena neujednačenost u granicama između zona grumena i ZTMU sa povratne strane šava, ali da je ta pojava još izraženija na strani napredovanja šava. Literatura [9] navodi da se taj fenomen može pripisati razlici intenziteta plastične deformacije koja je sveprisutna tokom procesa zavarivanja. Naime, intenzitet plastične deformacije je veći na strani napredovanja šava zbog poklapanja komponenti kretanja (pomaka) alata i tangencijalne brzine obrtanja alata [77].

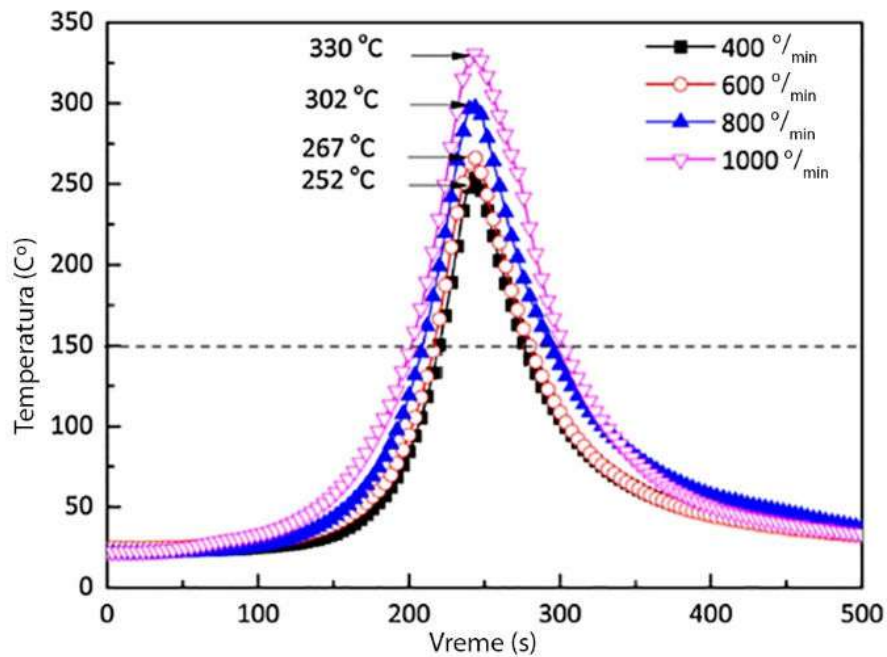
2.5.4.3. Zona uticaja toplote – ZUT

Kao što samo ime i kaže ZUT je zona zavarenog spoja koja je izložena isključivo toplotnim efektima procesa zavarivanja. ZUT je prisutan sa obe strane zavarenog spoja i nalazi se odmah pored zone termomehaničkog uticaja što se može videti na slici 25. Mehaničke osobine ZUT – a su relativno niže u odnosu na ostatak zavarenog spoja i može se okarakterisati kao mekša zona zavarenog spoja [9]. Literatura [78] napominje da se ZUT razlikuje na strani napredovanja šava i na povratnoj strani šava. Odnosno da je prelaz iz ZTMU u ZUT oštiji i mnogo jasniji za uočavanje sa strane napredovanja šava, dok je ZUT na povratnoj strani šava difuzan i mnogo teži za uočiti (prelaz iz ZTMU u ZUT). Mikrostruktura osnovnog materijala i ZUT-a je relativno slična [9]. Mehaničke karakteristike ZUT-a su najlošije u odnosu na ostatak zavarenog spoja. Tvrdoca ZUT-a je niža u odnosu na ostale delove spoja [9]. Liu i ostali [49] u svom radu navodi da dolazi do lučenje β' sekundarne faze u ZUT-u prilikom zavarivanja EN AW 6061-T6 legure i da zapravo ona uzrokuje lošije mehaničke osobine spoja.

2.5.5. Uticaj parametara zavarivanja i geometrije alata na zavareni spoj

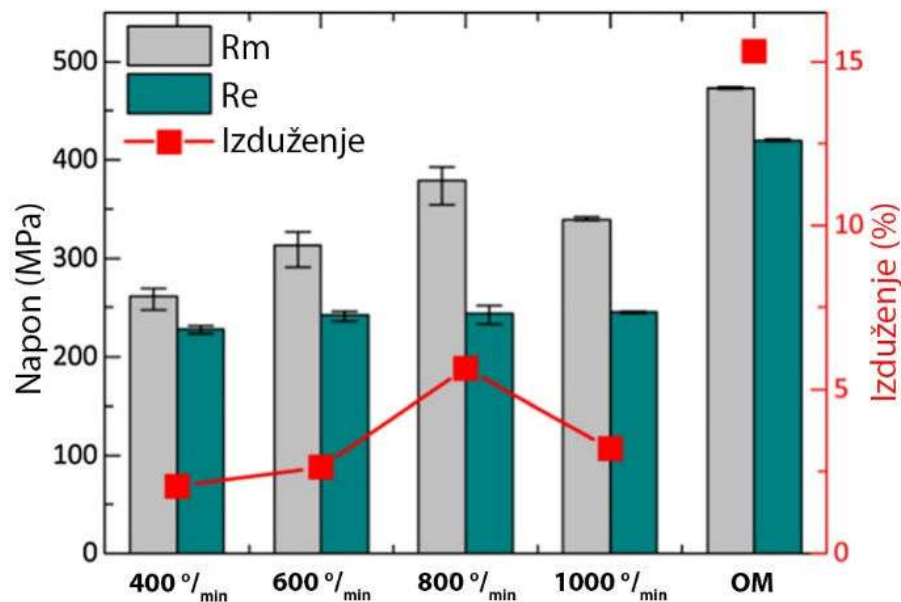
Uticaj parametara zavarivanja na zavarene spojeve izvedene sa bobin alatom se ne razlikuje u mnogome od uticaja parametara za konvencionalni ZTM postupak. Sa povećanjem brzine zavarivanja raste i veličina zrna, pri konstantnoj brzini obrtanja alata [49].

Donje rame kao dodatni izvor toplote itekako utiče na količinu generisane toplote, što je u prethodnom delu teksta i matematički formalizovano jednačinom 5. Povećana količina unete toplote generalno utiče na mikrostrukturu legure koja se zavaruje. Ovu tvrdnju su potvrdili Liu i ostali [49], ističući da tokom zavarivanja legure EN AW 6061–T6 primenom dvostranog (bobin) alata dolazi do rastvaranja β' i β'' taloga, koji inače predstavljaju primarne ojačavajuće faze u ovoj leguri. Do raspadanja taloga dolazi jer su oni metastabilni [49,79,80]. U radu [81] je pokazano da se talozi raspadaju usled povećanog unosa toplote (na preko 400 °C). Takođe je pokazano da postoji uticaj brzine zavarivanja na zatezne karakteristike zavarenog spoja (slika 17). Wang i ostali [74] su u svom radu konstatovali da sa porastom brzine rotacije alata raste i količina unete toplote u zonu spoja (slika 39). Temperatura je merena na deset milimetara od linije spoja. U radu [74] je takođe utvrđeno da sa porastom brzine obrtanja alata rastu i zatezne karakteristike zavarenog spoja (slika 40).

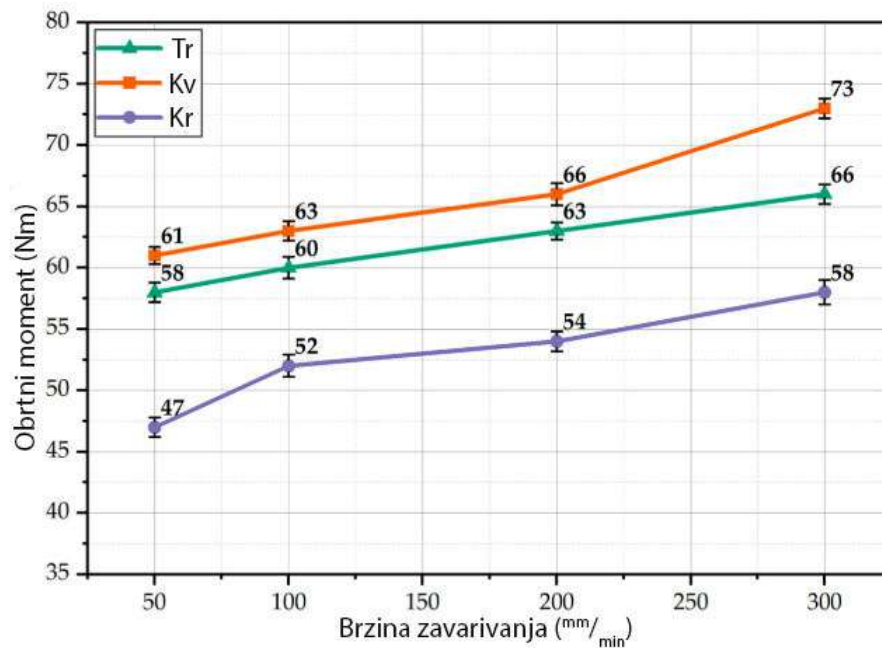


Slika 39. Prikaz zavisnosti temperature i brzine obrtanja alata [74]

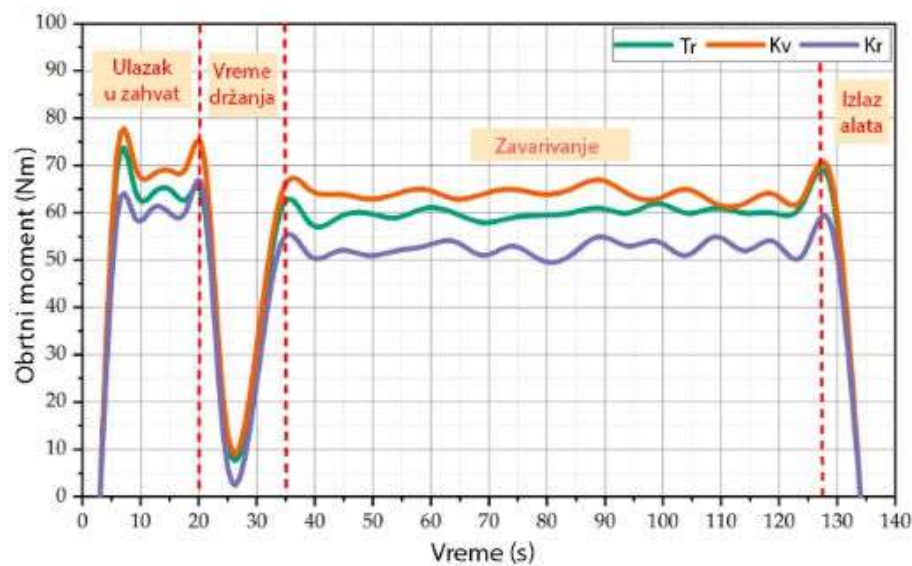
Pored parametara zavarivanja, geometrija alata takođe ima velik uticaj na osobine zavarenog spoja. U svom radu Ahmed i ostali [82] navode da geometrija trna značajno utiče na mehaničke osobine spoja. Analizirajući tri različite konfiguracije: cilindričnu, trouglastu i kvadratnu. Autori su zaključili da se maksimalni obrtni moment generiše pri upotrebi alata sa kvadratnim profilom trna (slika 41). Takođe je utvrđena i zavisnost između obrtnog momenta i brzine zavarivanja. Tačnije, sa porastom brzine zavarivanja, raste i obrtni moment (slika 42).



Slika 40. Prikaz zavisnosti zateznih karakteristika u odnosu na brzinu obrtanja alata [74]

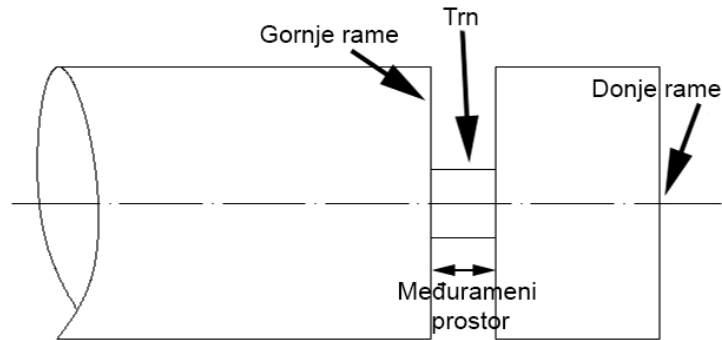


Slika 41. Prikaz obrtnog momenta i brzine za različite geometrije trna [82]



Slika 42. Odnos obrtnog momenta u odnosu na vreme [82]

Na osobine zavarenog spoja takođe utiče i međurameni prostor (*engl.* Shoulder pinching gap) kod bobin alata (slika 43). Međurameni prostor se može tumačiti i kao dužina vrata kod bobin alata za ZTM. Od te dimenzije zavisi kolika će kompresiona sila (od strane samog alata) delovati na osnovni materijal, a time i na same karakteristike zavarenog spoja [73,83]. U radu [73] se navodi da se sa smanjenjem međuramenog rastojanja raste unos unesene toplote, što dovodi do rasta zrna uz zoni mešanja, zoni termomehaničkog uticaja i u ZUT-u. Uvidom u sliku 31, može se konstatovati da međurameni prostor može biti konstantan, rastući ili opadajući u zavisnosti od geometrije samog ramena alata. Zbog mogućnosti pojave rastućeg ili padajućeg međuramenog prostora, najmanje rastojanje između dva ramena može se smatrati međuramenim rastojanjem.



Slika 43. Grafička interpretacija međuramenog prostora [83]

2.5.6. Tok materijala tokom procesa zavarivanja i uticajni faktori

Tok materijala tokom procesa ZTM je kompleksan i u mnogome zavisi od tipa alata (konvencionalni, ili bobin alat), takođe zavisi od geometrije trna i ramena. U literaturi [84,85] se uglavnom napominje da se osnovni materijal tokom procesa zagrevanja i „razmekšavanja“ ponaša kao nenjutnovski fluid koji poseduje viskozitet. Takvo stanje materijala se najbolje opisuje pomoću Navije-Stoksove jednačine toka u tri dimenzije [84].

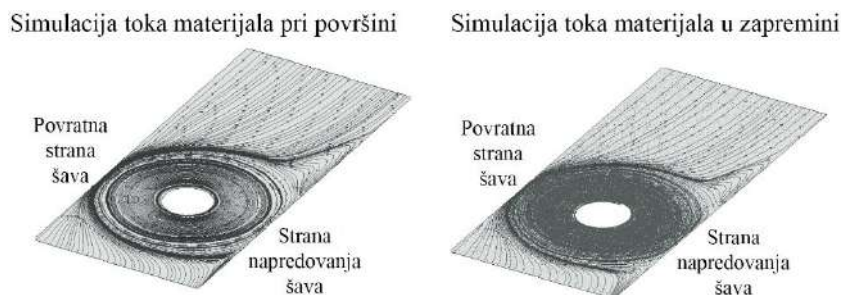
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Gde su u , v i w brzine u pravcima x , y i z . Razlaganjem i sređivanjem izraza pomoću Laplasovog operatora se dobija izraz koji glasi:

$$\rho c_v = \rho_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho q \quad (7)$$

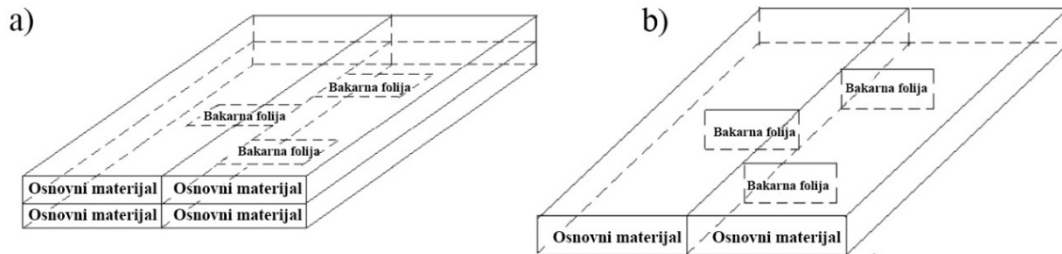
Gde je: ρ – gustina materijala, c_v – specifični toplotni kapacitet rastopljenog materijala, T – temperatura, k – Koeficijent toplotne provodljivosti, ρ_{ij} – tenzor napona drugog reda i ε_{ij} – tenzor deformacije drugog reda.

Čen i ostali [84] su u svom radu pomoću gore navedene jednačine (7) izvršili simulaciju toka materijala i došli do zaključka da se polja brzina na površini i zapremini osnovnog materijala u mnogome razlikuju (slika 44).



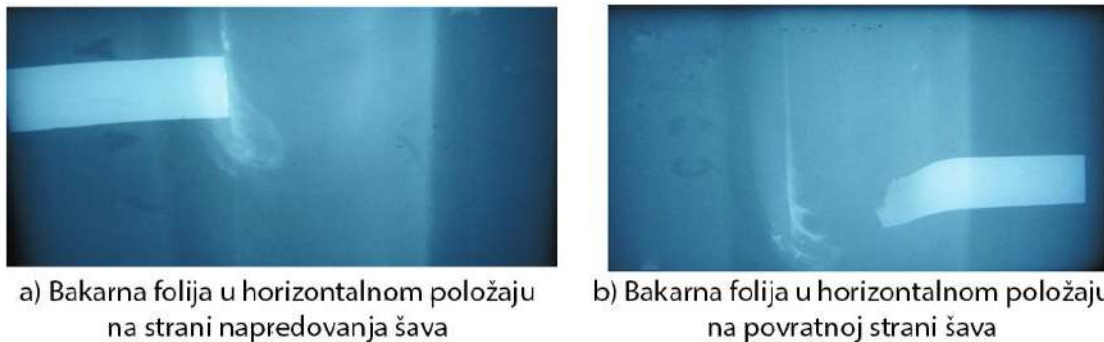
Slika 44. Grafički prikaz simulacije kretanja materijala prilikom ZTM [84]

Sa slike 44 se jasno može uočiti da je polje brzina pri površini mnogo manje nego u samoj zapremini modela. Pored simulacije vršeno je i ispitivanje u realnim uslovima pomoću bakarne folije umetnute u osnovni materijal [84]. Folija je bila postavljena naizmenično, sa leve i desne strane alata, kao što je prikazano na slici 45.



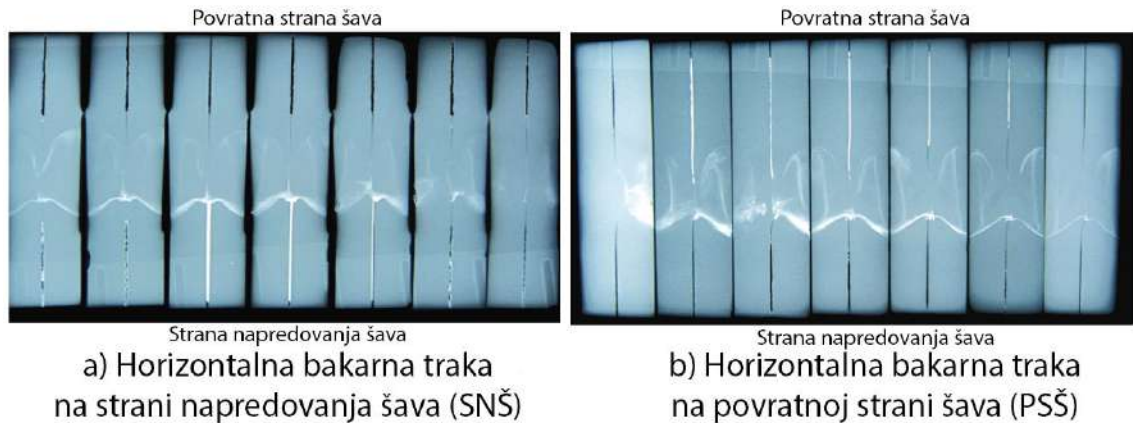
Slika 45. Postavka eksperimenta utvrđivanja toka materijala prilikom ZTM pomoću bobin alata [84]

Rezultati eksperimenta su pokazali da se materijal uslovno rečeno odnosi na strani napredovanja šava i da uglavnom ostaje na istoj strani (horizontalna pozicija bakarne folije) dok sa povratne strane šava osnovni materijal nešto više učestvuje u formiranju zavarenog spoja (slika 46).



Slika 46. Rendgenski snimci zavarenih spojeva sa horizontalnom orijentacijom bakarne folije [84]

Sa druge strane, kada pogledamo zavareni spoj sa strane (iz profila), konstatuje se da bakarna folija koja učestvuje u formiranju šava ima oblik jednoručnog tega (bučice) što se može videti na slici 47.



Slika 47. Rendgenski snimci zavarenih spojeva sa horizontalnom orijentacijom bakarne folije (pogled sa strane) [84]

Kod vertikalne orijentacije bakarne folije (slika 48) može se videti da materijal uglavnom završava na strani napredovanja šava (svetlo zamućena regija u sredini spoja).



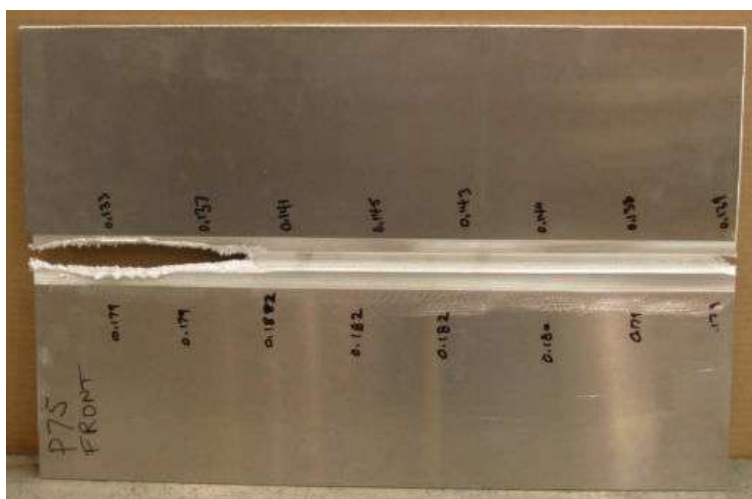
Slika 48. Rendgenski snimak zavarenog spoja sa vertikalnom orijentacijom folije [84]

2.5.7. Greške u zavarenim spojevima

Greške u ZTM zavarenim spojevima se mogu manifestovati usled lošeg pozicioniranja alata, ako se pozicioniranje vrši ručno. Greške koje se javljaju tokom procesa ZTM su propisane standardom ISO 25239 – 5:2020 [53]. Međutim pomenuti standard pokriva greške koje su navedene su vezane za konvencionalni postupak ZTM. Prilikom zavarivanja sa bobin alatom eliminišu se određene greške, ali se takođe javljaju nove koje će biti prikazane u daljem tekstu.

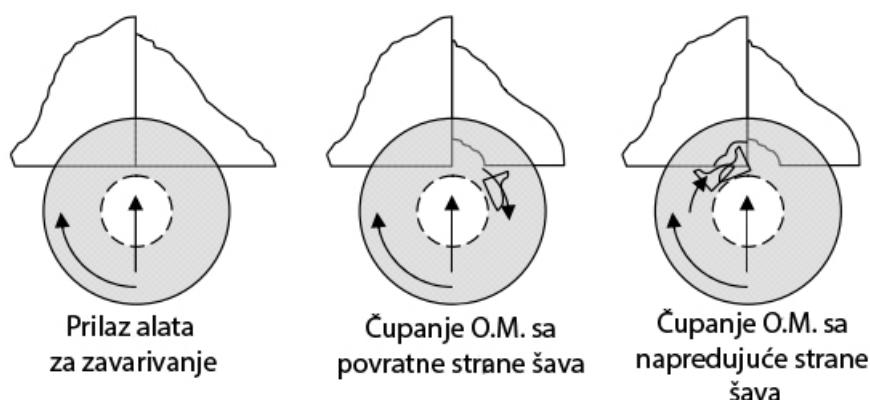
2.5.7.1. Inicijacija zavarenog spoja

Inicijacija zavarenog spoja (*engl.* Weld initiation process) je greška gde šav nije formiran nakon prolaska bobin alata. Koligan i ostali [86] su posebnu pažnju posvetili problemu inicijacije zavarenog spoja koji se još naziva i zagušenje. Ova pojava je posebno izražena kod alata sa međuramenim rastojanjem manjem od 6 mm. Prikaz problema inicijacije zavarenog spoja legure aluminijuma AA5083-H116, debljine 4 mm se može videti na 49.



Slika 49. Prikaz problema inicijacije zavarenog spoja AA 5083 – H116, debljine 4 mm [86]

Postoje dva tipa ovog problema, Prvi se karakteriše kao zagušenje čupanjem materijala (*engl.* Tear – out plugging), pojava gde se delovi osnovnog materijala odlamaju i ostaju zarobljeni u međuramenom prostoru što dalje otežava inicijaciju zavarenog spoja. Šematski prikaz ovog problema se može videti na slici 50.



Slika 50. Šematski prikaz zagušenja čupanjem materijala [86]

Na šemi se jasno može uočiti da prilikom kontakta bobin alata sa OM dolazi do odlamanja/čupanja segmenta OM sa povratne strane šava i ostaje zarobljen u međuramenom prostoru i odlama segment OM sa napredujuće strane šava. Oba odlomljena dela ostaju zarobljena u međuramenom prostoru gde se tokom zavarivanja nakupljaju naslage OM koje

nepovoljno utiču na proces zavarivanja sa stanovišta geometrije alata koja je izmenjena zbog naslaga.

Drugi tip greške inicijacije zavarenog spoja se naziva akumulaciono zagušenje (*engl.* Accumulation plug). To je tip greške gde se osnovni materijal nagomilava na jednoj tački alata koje daljim nagomilavanjem rezultuje zagušenje alata. Prikaz ovog tipa greške je dat na slici 51 [86].

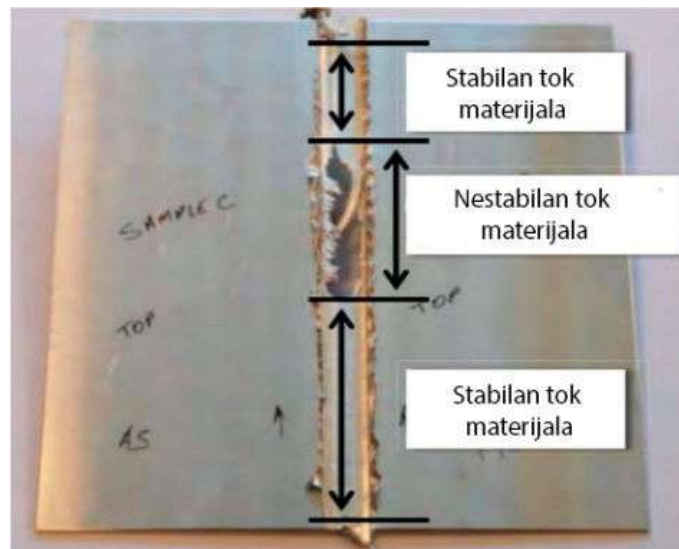


Slika 51. Prikaz akumulacionog zagušenja alata (*akumulacija materijala na gornjem ramenu alata*) [86]

Sa slike 51 uočava se da je donje rame skinuto sa bobin alata i da je nagomilavanje materijala započeto na gornjem ramenu alata. Naslage aluminijuma na alatu se mogu ukloniti na nekoliko načina. Hilgert [87] navodi da se čišćenje alata može vršiti potapanjem alata u rastvor natrijum hidroksida. Takođe se navodi da je efektivna koncentracija natrijum hidroksida $10\div 20 \text{ mg/l}$. Pored pomenute metode moguće je međurameni prostor čistiti i žičanom četkom, međutim, potapanjem u hemijski reagens, kao što je NaOH daje daleko bolje rezultate, jer se radne površine alata ne oštećuju i ne menjaju geometriju.

2.5.7.2. Nestabilan tok materijala

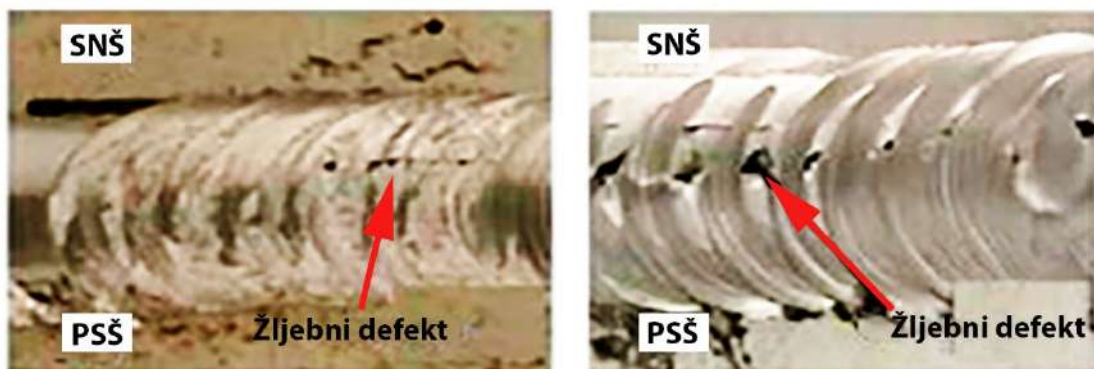
Fuse i Badheka [9] navode da se ovaj tip greške javlja kao uzajamno dejstvo kratkotrajnog temperaturnog intervala zagrevanja mesta spoja (usled prolaska bobin alata kroz OM) i toka materijala tokom procesa zavarivanja. Ova pojava nije prisutna kod konvencionalnog postupka ZTM, zbog ograničenog kretanja materijala tokom zavarivanja [9]. Nestabilan tok materijala rezultuje „čupanjem/kidanjem“ segmenata spoja (obično na središnjem delu spoja) i lomom bobin alata zbog većih opterećenja tokom ove pojave. Prikaz spontane neregularnosti je dat na slici 52.



Slika 52. Prikaz pojave nestabilnog toka materijala [9]

2.5.7.3. Žljebni defekt

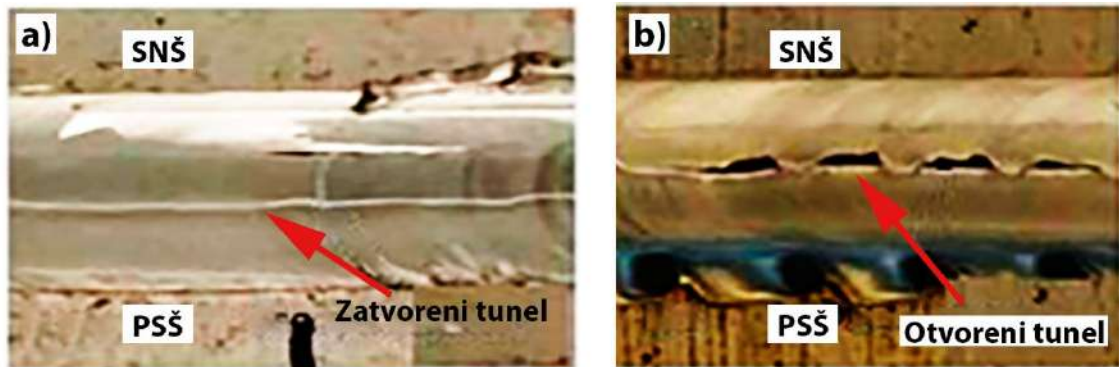
Žljebni defekti (*engl.* groove defect) utiču na izgled samog šava i na mehaničke osobine. Ovaj tip greške se obično manifestuje kada je donje rame alata manje u odnosu na gornje rame što rezultuje manjom silom koja deluje između gornjeg i donjeg ramena [9]. Prikaz žljebnog defekta se može videti na slici 53. Na slici 53 je dokumentovano da se makroskopski žljebni defekt pretežno generiše na strani napredovanja šava (SNŠ)



Slika 53. Žljebni defekt (SNŠ – strana napredovanja šava; PSŠ – povratna strana šava) [9]

2.5.7.4. Šupljine, tuneli i crvotočine

Šupljina (*engl.* Void) je greška koja se javlja neposredno ispod površine zavarenog spoja, dok su tuneli kontinualne šupljine koje se javljaju na površini (otvoreni tunel) ili unutar zapremine samog šava (zatvoreni tunel) [9]. Crvotočine (*engl.* Wormhole) su greške koje podsećaju na tunel, ali se razlikuje u tome što se one prostiru u celosti kroz šav. Na slici 54 su prikazani otvoreni i zatvoreni tunel.



Slika 54. Prikaz otvorenog (a) i zatvorenog (b) tunela [9]

2.5.7.5. Fleš (istisnuti materijal)

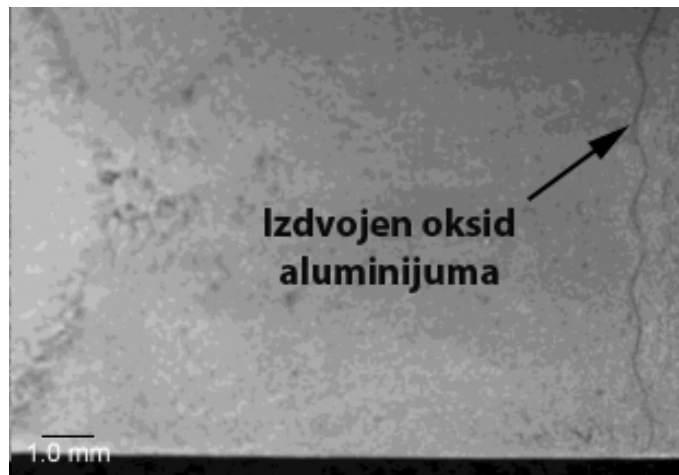
Fleš (*engl.* Flash) predstavlja istisnuti materijal iz zone spoja, a prikaz ove karakteristične greške se može videti na slici 55. Pojava fleša prilikom zavarivanja se objašnjava istiskivanjem materijala ramenom alata, koji ima smanjen viskozitet usled povišene temperature tokom procesa zavarivanja [9].



Slika 55. Fleš nastao u toku postupka zavarivanja [9]

2.5.7.6. Greške usled površinskih oksida

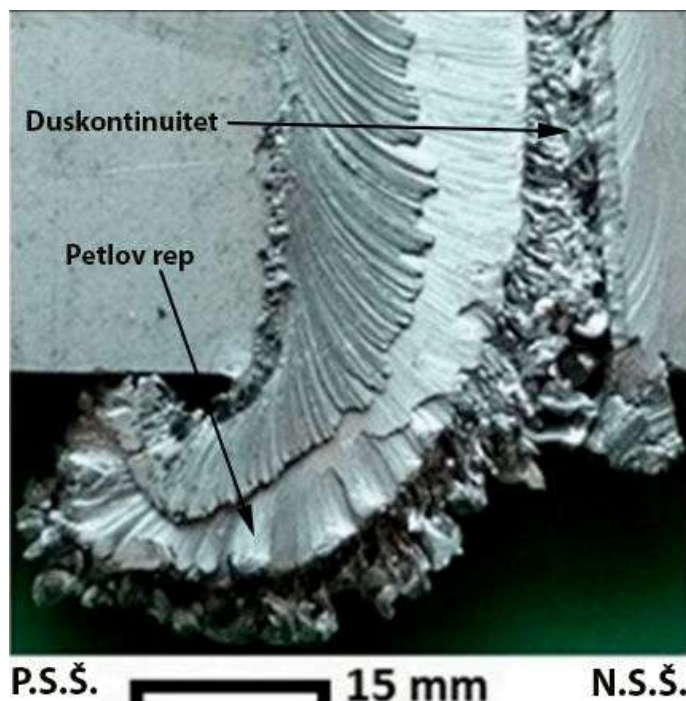
Aluminijum je po svojoj prirodi veoma reaktivan metal u atmosferi koja sadrži kiseonik, jer formira pasivizirajući sloj (patinu) koji štiti materijal od dalje oksidacije. Aluminijum oksid ima loše mehaničke osobine nepovoljno utiče na mehaničke osobine spoja [9]. Oksid (najčešće Al_2O_3) se izdvaja u zavarenom spoju kao takozvane cik-cak linije, prikazanih na slici 56. Žargonski se ovaj oksidni sloj unutar zavarenog spoja naziva i „Lejzi S“ (*engl.* Lazy S) [88].



Slika 56. Prikaz izdvojenog oksida (cik – cak linija) [88]

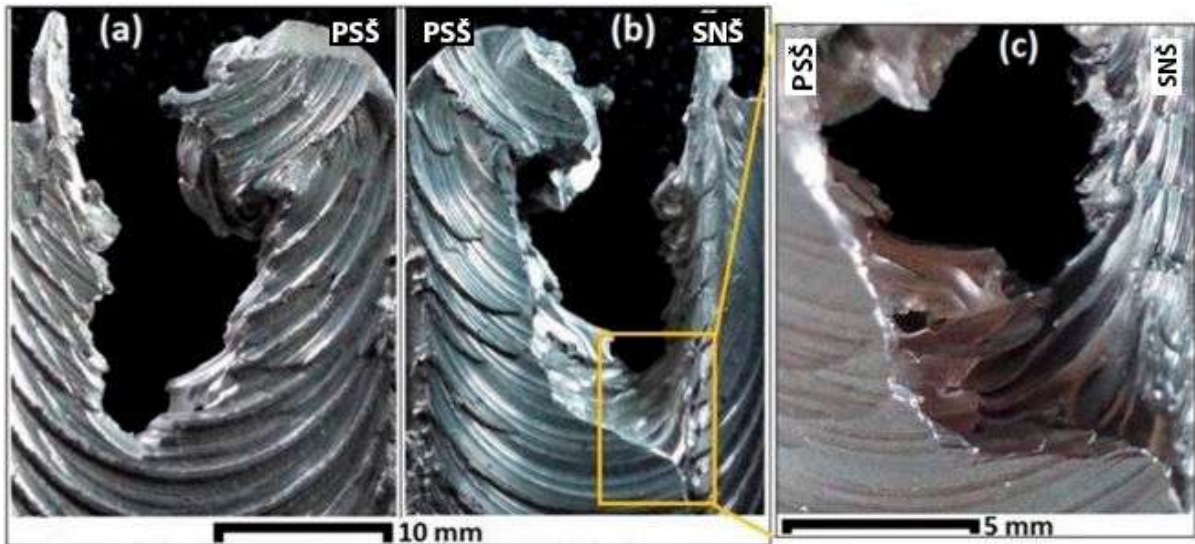
2.5.7.7. Ulazni i izlazni defekt

Ulazni i izlazni defekt (*engl.* Entry/Exit defect) su karakteristična su dva dela koja prate ulazni defekt, a to su petlov rep (*engl.* Rooster tail) i diskontinuitet. Ove greške zavise prvenstveno od parametara zavarivanja, naročito od brzine obrtanja alata. Na primer, povećanjem brzine obrtanja alata pojava petlovog repa postaje manje izražena [89]. Ova greška se u potpunosti može eliminisati izradom otvora na mestu spoja, kojim se omogućava potpuno okruživanje trna dodatnim materijalom [9]. Prikaz ulaznog defekta je prikazan na slici 57.



Slika 57. Prikaz ulaznog defekta sa karakterističnim delovima [89]

Izlazni defekt nastaje kao posledica „nedostatka“ materijala prilikom izlaza alata iz zahvata, a prikaz izlazne rupe se može videti na slici 58.



Slika 58. Prikaz izlazne rupe. a) pogled od gore; b) pogled od dole; c) uvećanje pogleda od dole [89]

Izlazna rupa ima oblik cilindra brave, po čemu je i dobila naziv (*engl.* Keyhole). U radu [89] je ustanovljeno da površina izbačenog materijala (petlov rep) približno odgovara površini izlazne rupe. Nažalost, Fuse i Badheka [9] u svom istraživanju navodi da je ova greška uvek prisutna i da jedino promena parametara pri izlasku alata iz zahvata može uticati na oblik i veličinu defekta.

2.6. Prednosti, nedostaci i primena ZTM pomoću bobin alata

Na osnovu prethodno izloženog može se konstatovati se da proces zavarivanja trenjem sa mešanjem ima sličnosti sa konvencionalnim procesom zavarivanja trenjem sa mešanjem, ali i razlika. Stoga je neophodno istaći prednosti, nedostatke i mogućnosti primene ovog postupka u poređenju sa konvencionalnim ZTM postupkom.

2.6.1. Prednosti

Dvostrani prihvata osnovnog materijala kod bobin alata eliminiše potrebu za potporom koja je neophodna za konvencionalni postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem. Zavarivanjem pomoću bobin alata se u potpunosti eliminiše mogućnost pojave defekata u korenu zavarenog spoja, što nije slučaj prilikom zavarivanja sa konvencionalnim postupkom ZTM [57]. Dodatna prednost je ta što se radni komad prihvata sa obe strane čime se rezultuje ravnomernija distribucija toplote i kretanje materijala tokom procesa spajanja [57]. Sa ravnomernijom distribucijom toplote, minimiziraju se temperaturni gradijenti, što smanjuje zaostale napone i plastičnu deformaciju [57]. Ovo je veoma korisno prilikom zavarivanja delova čija je geometrija sklona uvijanju ili onih geometrija koje zahtevaju visoku dimenzionu tačnost. Ujednačen tok materijala doprinosi formiranju homogenije strukture zavarenog spoja, što rezultuje ujednačenijim vrednostima zatezne i dinamičke čvrstoće u odnosu na konvencionalni postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem [9].

Krutost uređaja za zavarivanje u velikoj meri zavisi od tipa alata koji se koristi. Uređaji koji se koriste prilikom zavarivanja trenjem sa mešanjem pomoću konvencionalnog alata moraju imati veću krutost usled prisustva značajne pritisne sile duž Z – ose [9]. Uređaji sa kojima se vrši zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću bobin alata mogu imati manju krutost, jer je sila duž Z – ose manja, pošto sam alat (uslovno rečeno) delimično preuzima opterećenja na sebe. Na osnovu toga se može konstatovati da je cena opreme niža u odnosu na cenu opreme za konvencionalni postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem [9].

2.6.2. Nedostaci

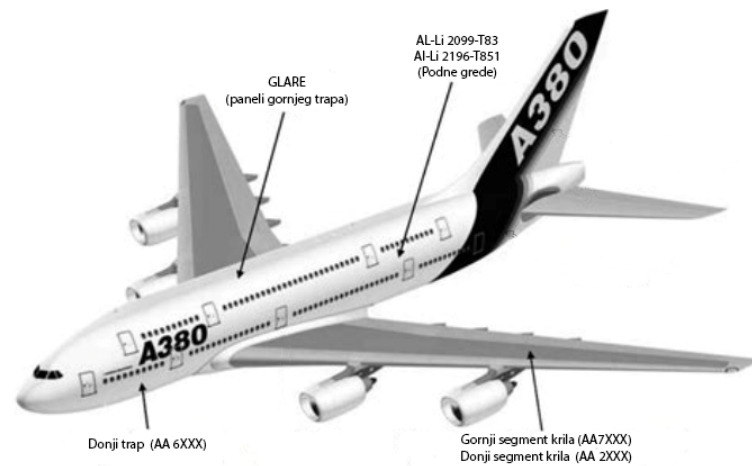
Jedan od glavnih nedostataka bobin postupka u poređenju sa konvencionalnim postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem jeste ograničenje debljine osnovnog materijala i prema literaturi [64] maksimalna debljina oko 10 mm. Kod konvencionalnog postupka je moguće zavariti radne materijale debljine do 50 mm [64]. Dodatni nedostaci bobin postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem je potreba za preciznim podešavanjem početne pozicije alata, kako bi opterećenje alata na trn bilo ujednačeno i kako ne bi došlo do loma tokom procesa zavarivanja. Čak i najmanja greška prilikom poravnavanja može dovesti do pojave defekata u zavarenom spoju [9]. Trenutno nije moguće zavarivati sve vrste materijala pomoću bobin postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem. Ovaj postupak se prvenstveno primenjuje za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura, dok se konvencionalnim postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem može zavarivati širi spektar materijala, kao što su čelici, bakar i titan [90,91]. Zavarivanje raznorodnih materijala pomoću bobin alata je moguće, ali se ne preporučuje zbog razlika u karakteristikama toka materijala tokom procesa zavarivanja. Sa druge strane, taj efekat je manje izražen kod konvencionalnog postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem [90].

2.6.3. Primena

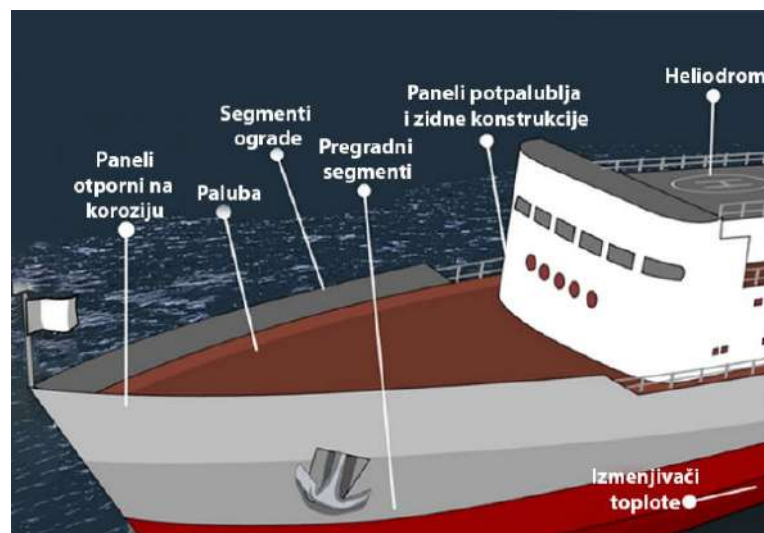
Primena ZTM sa bobin alatom se uglavnom podudara sa primenom konvencionalnog ZTM postupka. Tačnije, najznačajnija primena ovog postupka je u aeronautici (spajanje konstrukcije krila, segmenata rezervoara i drugih segmenata strukturnih elemenata konstrukcije, slika 59) uglavnom šupljih profila izrađenih od legura aluminijuma. Takozvani „GLARE“ je lamelarni kompozitni materijal koji je sačinjen od staklenih vlakana (*engl.* Fiber glass) i aluminijuma i koristi se za izgradnju segmenata konstrukcije putničkih aviona, mada se postupci ZTM više koriste u nautici, tačnije brodogradnji (slika 60) [92].

Od 1997. se intenzivno koristi u izgradnji segmenata vagona [49] koji se obično izrađuju od šupljih profila. Postupak zavarivanja sa bobin alatom se takođe intenzivno koristi u automobilske industriji, gde se spajaju segmenti nosača motora (Honda Accord) koji se izrađuju od pocinkovanog čelika i aluminijuma (slika 61) [14].

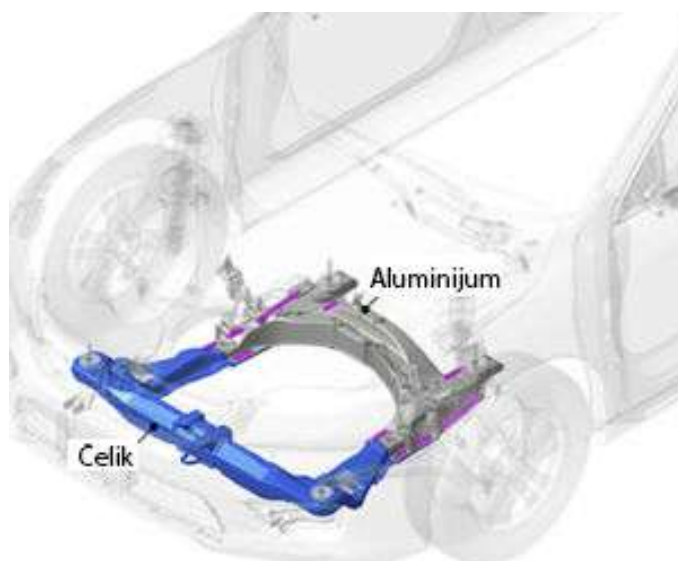
Sve u svemu, postupak ZTM za bobin alatom, kao i konvencionalni ZTM postupak se najčešće u praksi koristi za zavarivanje legura aluminijuma.



Slika 59. Pregled upotrebe legura aluminijuma u izgradnji putničkog aviona [93]



Slika 60. Primena ZTM u brodogradnji [92]

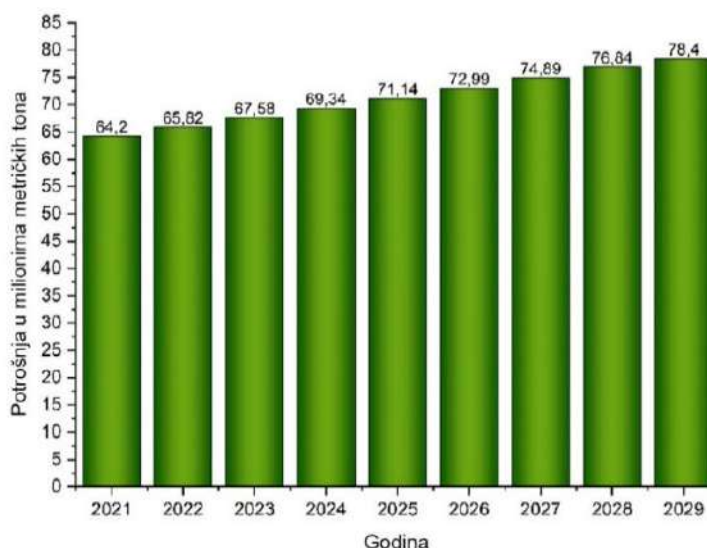


Slika 61. Prikaz nosača motora za Hondu Akord [14]

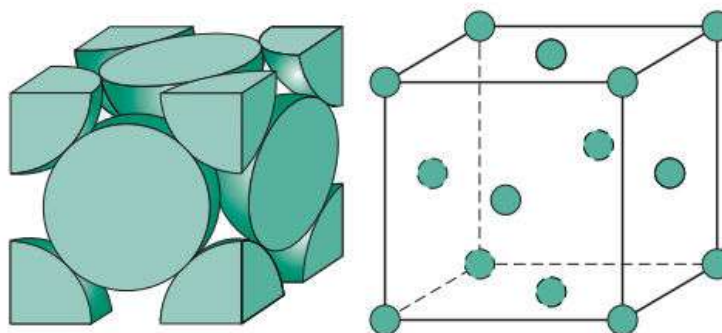
2.7. Aluminijum i legure aluminijuma

2.7.1. Aluminijum

Aluminijum spada u grupu lakih metala čija zastupljenost u proizvodnji raste iz godine u godinu (slika 62). Glavne karakteristike materijala su dobre mehaničke osobine, mala gustina, dobra sposobnost oblikovanja što mu omogućuje širok spektar primene kod malih kućnih aparata, pa sve do primene u automobilske i vazduhoplovnoj industriji [94,95]. Proizvodnja aluminijuma se vrši u oko 35 zemalja Evrope [96]. Aluminijum je treći najzastupljeniji hemijski element u Zemljinoj kori, posle kiseonika i silicijuma. Aluminijum je element koji poseduje kristalnu strukturu, tačnije kristališe u obliku površinski centrirane kubne rešetke (PCK) koja je karakteristična za duktilne i obojene metale [97]. PCK kristalna struktura je prikazana na slici 63.



Slika 62. Globalna projekcija potrošnje aluminijuma od 2021 do 2029 [94]



Slika 63. Površinski centrirana kubna (PCK) kristalna struktura [97]

Sa ekološkog stanovišta, reciklaža aluminijuma nudi niz prednosti kao što su [98]:

1. Reciklažom se štedi do 95% energije prilikom proizvodnje sekundarne (reciklirane) legure uz 5% emisije gasova koji daju efekat staklene bašte u poređenju sa proizvodnjom sirovog aluminijuma iz rude.
2. Reciklažom jednog kilograma Al se štedi oko osam kilograma rude boksita, četiri kilograma hemijskih reagenasa i oko četrnaest kilovata električne energije.
3. Smanjuje količinu aluminijumskog otpada na deponijama
4. Pruža dodatni prihod za operatore u sektoru prerade i reciklaže materijala.

Aluminijum je veoma pogodan za reciklažu jer se može praktično neograničeno reciklirati [99]. Prognoze ukazuju da će do 2040. godine potražnja za aluminijumom dostići oko 90 miliona tona godišnje primarnog metala dobijenog iz rude, kao i oko 70 miliona tona recikliranog aluminijuma [99]. Reciklaža aluminijuma je danas veoma popularna. U SAD-u je tokom 2021. godine reciklirano preko 3,2 miliona tona aluminijuma [100]. U literaturi [101] navodi se da je neophodno dalje unapređenje tehnologija i standarda za reciklažu aluminijuma kako bi proces reciklaže postao još održiviji. Takođe se navodi da se u budućnosti može očekivati da se iz otpada mogu izvući legirajući elementi koji bi se ponovo mogli koristiti tokom procesa reciklaže [101].

2.7.2. Legure aluminijuma i sistem označavanja

Legure aluminijuma se generalno dele na dve grupe [96,102,103]:

1. Legure za plastičnu deformaciju – *engl.* Wrought alloys (AW)
2. Legure za livenje – *engl.* Cast alloys (AB; AC; AM)

Ovakvu podelu legura je predložila Asocijacija za aluminijum (*engl.* Aluminum Association) iz SAD-a [96,102,103]. Sistem koji su oni razvili se zasniva na četvorocifrenoj brojnoj oznaci koja postaje sve zastupljenija širom sveta. Tabela prikazuje podele legura prema standardu EN 573-1:2004 [104] je dat na slici 64.

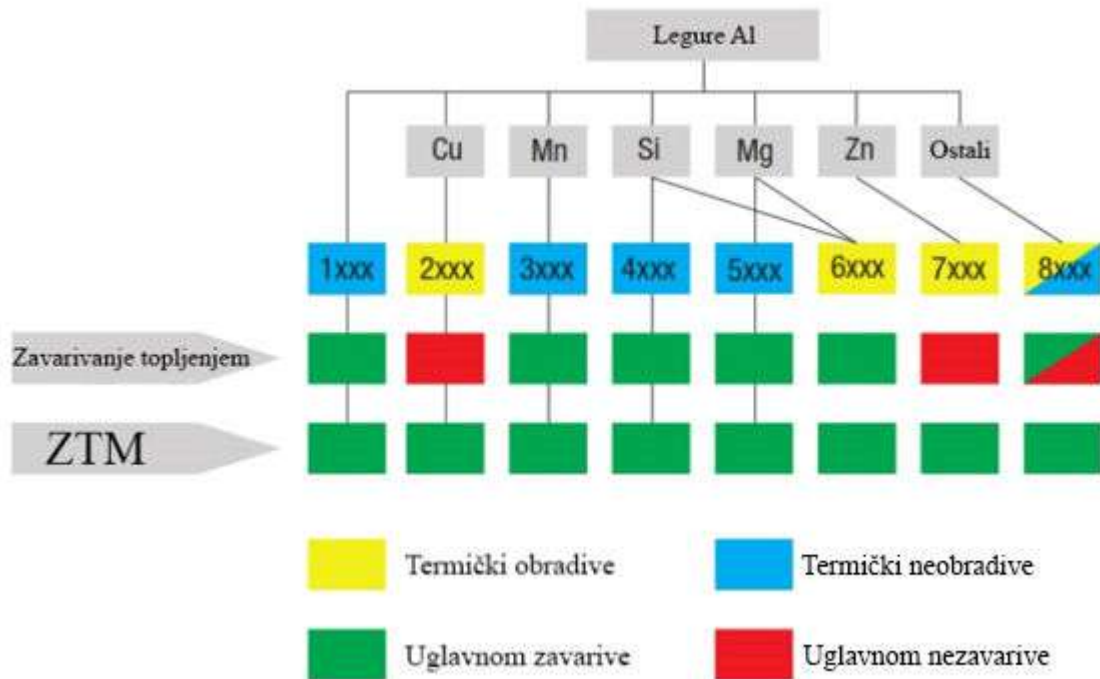
	Serijska	Glavni legirajući element	Atoma u rastvoru	Deformaciono ojačavaju	Ojačavanje sekundarnim fazama	
Legure za plastičnu preradu *)	1XXX	Čist Al (99,00%)		X		Termički neobradive legure
	3XXX	Mn	X	X		
	4XXX	Si	X	X		
	5XXX	Mg	X	X		
	2XXX	Cu	X	(X)	X	
EN AW-	6XXX	Mg+Si	X	(X)	X	Termički obradive legure
	7XXX	Zn	X	(X)	X	
	8XXX	Ostali	X	(X)	X	

Legure za livenje *)	1XXX0	Čist Al (min 99,00%)
EN AB-	2XXX0	Cu
EN AC-	4XXX0	Si
AN AM-	5XXX0	Mg
	7XXX0	Zn
	8XXX0	Sn
	9XXX0	Master legure

*) Slova koja prethode brojčanoj oznaci znače sledeće:
 EN – Evropska norma (Evropski standard)
 A – Aluminijum
 B – Ingot
 C – Livena legura
 M – Master legura
 W – Legura za deformisanje

Slika 64. Podela legura aluminijuma [96]

Sa slike 64 se uočava da prvi broj u četvorocifrenoj oznaci zapravo definiše glavne legirajuće elemente u leguri. Drugi broj u oznaci (samo za seriju 1XXX) simbolizuje nivo kontrole nečistoća ili legirajući element. Ako je npr. drugi broj u oznaci nula, to znači da legura ima „prirodne“ nedefinisane granice za nečistoće. Sa druge strane, brojevi od 1 do 9 u indiciraju na specijalnu kontrolu legirajućeg elementa ili nečistoće. Na primer, oznaka 1145 znači da je u pitanju legura aluminijuma, čistoće 99,45%, drugi broj (1) označava posebnu kontrolu udela železa i silicijuma [96]. Za serije 2XXX – 8XXX, zadnja dva broja u oznaci nemaju poseban značaj, njihova glavna uloga jeste da naprave razliku između legura unutar iste serije [96]. Broj na drugom mestu simbolizuje modifikaciju legure i ako je drugi broj nula, onda to znači da je reč o „originalnoj“ leguri [96]. Prema [105], postoji preko 450 registrovanih legura aluminijuma različitog hemijskog sastava [106]. Što se tiče zavarivosti legura aluminijuma, one se uglavnom mogu zavarivati postupcima topljenjem, mada je kvalitet zavarenog spoja u značajnom broju slučajeva, posebno kod legura koje ojačavaju taložno često upitan, posebno u pogledu mehaničkih osobina (čvrstoća i žilavost), postupcima ZTM mogu zavarivati sve legure i to relativno kvalitetno (slika 65) [8].



Slika 65. Dijagram zavarivosti legura Al prema TWI [8].

Dodatne oznake naknadne obrade

Legure aluminijuma namenjene za plastičnu preradu/deformaciju poseduju dodatan sistem oznaka koje se odnose na naknadnu obradu i one su propisane standardom EN 515:2017 [107]. Prema [107] naknadna obrada (*engl.* Temper) je stanje metala/legure nastalo kao posledica mehaničke ili termičke obrade. Sistem obeležavanja naknadne obrade se sastoji od slovno – brojne oznake i koja se obično navodi iza oznake za seriju legure, na primer: EN AW6063 – T4. Slova koja se koriste u ovom sistemu sa njihovim značenjem su:

- F temper – Netretirana legura
- O temper – Žareno stanje
- H temper – Deformaciono ojačano
- T temper – Termički tretirano

Ova slova su grupisana u tri grupe, što se može videti na slici 66.

XXXX	– F	Sirovo stanje
	– O	Žareno stanje

XXXX	– H1	Deformaciono ojačano	
	– H2	Deformaciono ojačano i delimično žareno	
	– H3	Deformaciono ojačano, stabilizaciono žareno na niskim temp.	
	– HX2	Četvrt tvrdo	Stepen hladne deformacije
	– HX4	Polu tvrdo	
	– HX6	Tri četvrt tvrdo	
	– HX8	Tvrdo	

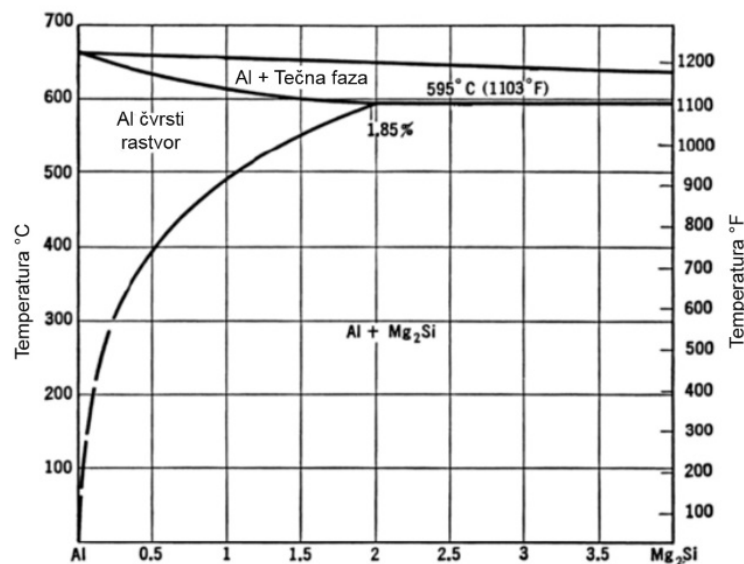
Termički
neobradive legure

XXXX	– T2	Hlađeno sa povišene temp. i prirodno starenje	Termički obradive legure
	– T4	Rastvarajuće žareno i prirodno starenje	
	– T5	Hlađeno sa povišene temp. obrade i veštački starenje	
	– T6	Rastvarajuće žareno i veštački starenje	
	– T8	Rastvarajuće žareno, hladno deformisano i starenje	

Slika 66. Grupe oznaka za stanja legure [96]

2.7.3. Legure serije 6XXX

Legure aluminijuma serije šest (6XXX) su legirane sa magnezijumom i silicijumom [108]. Deo pseudo binarnog faznog dijagrama Al – Mg_2Si je prikazan na slici 67.



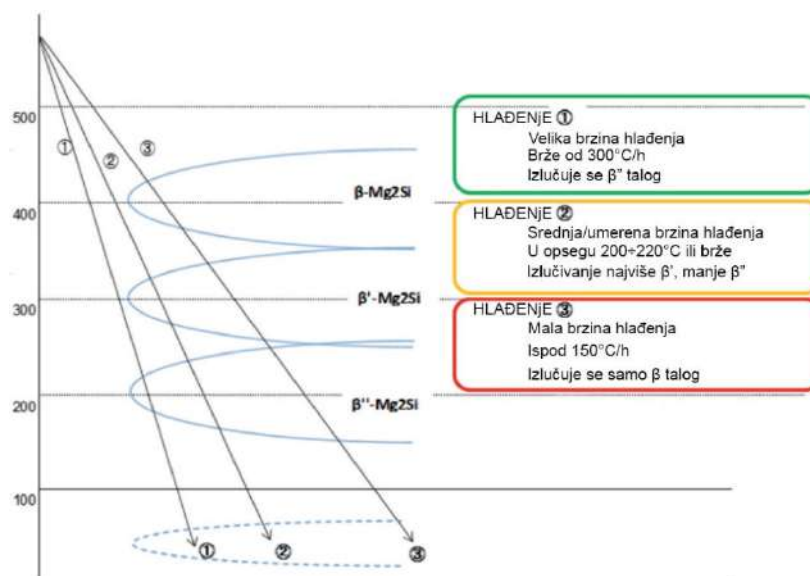
Slika 67. Al- Mg_2Si pseudo binarni fazni dijagram [108].

Količina legirajućih elemenata je nalazi se u odgovarajućem odnosu za formiranje hemijskog jedinjenja (Mg_2Si) koje zapravo omogućava da legure serije 6XXX bude termički obradiva [96]. Pored magnezijuma i silicijuma, u ovoj seriji legura su zastupljeni i drugi elementi.

Elementi koji su prisutni su: Mn; Cr; Cu; Zr; Sc i Ti [109]. Seriju legura 6XXX karakteriše dobra obradivost plastičnom deformacijom i skidanjem strugotine, takođe poseduje dobru otpornost na koroziju iako je ona nešto slabija u poređenju sa legurama serije 2XXX i 7XXX [100,109]. Od svih serija legura, serija 6XXX se najčešće koristi u vazduhoplovnoj, automobilske i industriji izrade železničkih vagona [109]. Primarni mehanizmi ojačavanja materijala kod serije 6XXX je starenje (taložno ojačavanje), deformaciono ojačavanje i ojačavanje granicama zrna. Ranije u tekstu je rečeno da magnezijum i silicijum obrazuju hemijsko jedinjenje (Mg_2Si) koje se izdvaja u obliku taloga, u tri oblika [109]:

- β'' (beta double prime) Mg_2Si , talog najmanjih dimenzija, u obliku štapića, koja najviše doprinosi poboljšanju mehaničkih osobina materijala kada je gusto raspoređena u matrici.
- β' (beta prim) Mg_2Si , dimenziono veća verzija štapičastog taloga nastala transformacijom iz β'' faze.
- β (beta) Mg_2Si , najveći od tri izlučena taloga, kubnog oblika, koja nema značajan uticaj na mehaničke osobine materijala.

Preporučeni odnos udela magnezijuma i silicijuma iznosi $Mg/Si = 1,73$. Ovaj odnos elemenata nije moguće u potpunosti postići u realnim uslovima, pa se u legurama javlja "višak" magnezijuma ili silicijuma. Višak magnezijuma doprinosi boljoj korozionoj postojanosti, ali dovodi do smanjenja čvrstoće i plastičnosti. Sa druge strane, višak silicijuma poboljšava mehaničke osobine i olakšava zavarivanje, ali povećava sklonost ka nastanku interkristalne korozije [109]. Železo je takođe prisutno u seriji 6XXX, železo se obično vezuje za silicijum i nastaje intermetalno jedinjenje ($AlFeSi$). Ovo jedinjenje nema uticaj na mehaničke osobine materijala. Kontrolom nivoa železa u leguri se može uticati na odsjaj (reflektivnost) svetlosti i električnu provodljivost (opada sa većim udelima Fe) [109]. Serija 6XXX je termički obradiva i uglavnom se radi postupak poboljšavanja. Na slici 68 je dat TTT dijagram sa tri različite brzine hlađenja koje dovode do formiranja različitih tipova taloga.



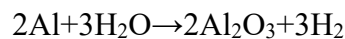
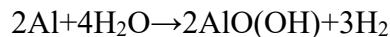
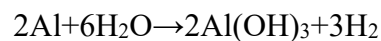
Slika 68. Dijagram hlađenja i stvaranja taloga [109]

Serijska legura 6XXX poseduje veću čvrstoću u odnosu na legure serije 5XXX, pre svega zahvaljujući taložnom ojačavanju, ali nižu u odnosu na legure 2XXX i 7XXX [110]. Međutim, zavarljivost joj je bolja u odnosu na legure 2XXX i 7XXX, tako da je pronašla vrlo široku upotrebu, naročito u automobilske industriji.

2.7.4. Korozija aluminijuma

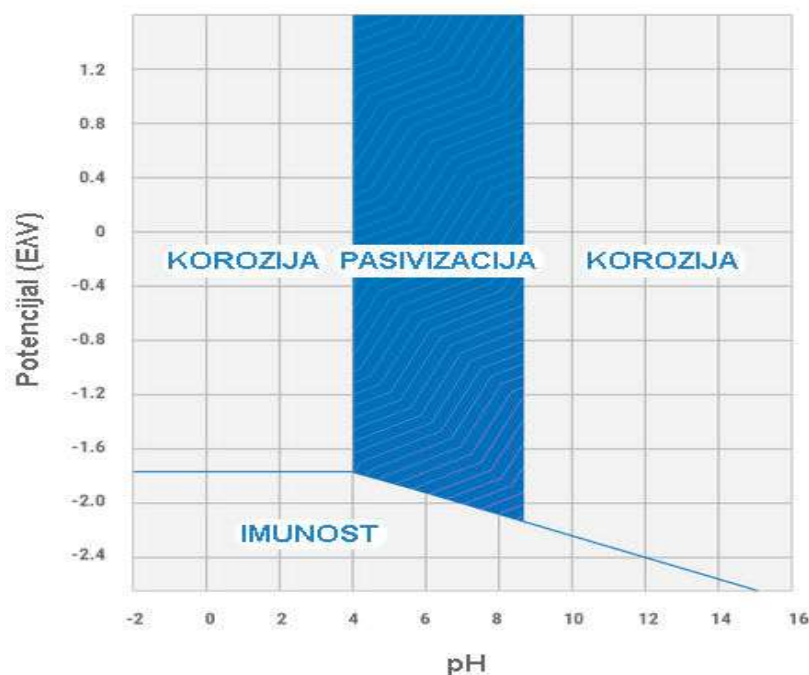
Važna karakteristika aluminijuma i njegovih legura jeste otpornost na koroziju. Površina aluminijuma reaguje sa kiseonikom ($4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$) i stvara pasivan oksid (patinu) na površini koji štiti materijal od dalje oksidacije [100,111]. Ukoliko iz bilo kog razloga nastupi lokalno oštećenje pasivnog sloja, trenutno dolazi do procesa ponovne pasivizacije, odnosno spontanog obnavljanja zaštitnog oksidnog filma na mestu degradacije [102].

Međutim, aluminijum pokazuje reaktivnost u direktnom kontaktu sa vodom (vlagom, osetljivost na atmosfersku koroziju), pri čemu se odigravaju sledeće reakcije:



Navedene reakcije se javljaju u zavisnosti od temperature. Od sobne temperature, pa sve do 280°C najstabilniji produkt je $\text{Al}(\text{OH})_3$, dok je u temperaturnom intervalu $280\div 480^\circ\text{C}$ najstabilniji $\text{AlO}(\text{OH})$, a iznad 480°C najstabilnije jedinjenje je Al_2O_3 [111].

Uslovi termičke stabilnosti pasivnog sloja aluminijuma prikazuju se pomoću Pourbeovog (fr. Pourbaix) dijagrama za aluminijum prikazanog na slici 69 [111–113].



Slika 69. Šematski prikaz Pourbeovog dijagrama za aluminijum [111,113]

Dijagram prikazan na slici 67 jasno ilustruje da je aluminijum pasivan isključivo u pH opsegu od 4 do 9, pri čemu granice ovog stabilnog područja direktno zavise od temperature. Drugim rečima, aluminijum korodira pri vrednostima pH manjim od 4 i većim od 9.

Najčešći tipovi korozije aluminijuma i njegovih legura su:

1. Piting
2. Korozija u prslini (zazoru)
3. Filiform korozija (korozija ispod zaštitnog sloja)
4. Interkristalna korozija
5. Eksfoliaciona korozija
6. Galvanska korozija
7. Biološka korozija

Navedeni oblici korozije mogu se javiti kao uniformna ili lokalizovana korozija i elektrohemijske su prirode [114,115].

Ispitivanje korozije, odnosno korozione postojanosti materijala se najčešće sprovodi u laboratorijskim uslovima i obično podrazumeva:

1. Metoda naizmenične imerzije
2. Vizuelna kontrola
3. Slani sprej/slana soba
4. Elektrohemijska ispitivanja

Metoda naizmenične imerzije je jedna od najjednostavnijih laboratorijskih metoda za ispitivanje otpornosti na koroziju. Ovaj tip ispitivanja je opisan ASTM G44 – 21 [116] standardom. Uzorak se potpuno uranja u rastvor koji sadrži $3,5 \pm 0,1$ % NaCl u vodi tokom 10 min, nakon čega se vadi i drži na mirnom vazduhu narednih 50 min. Ovaj postupak se ciklično ponavlja tokom dvadeset i četiri časa dok ukupno trajanje ispitivanja iznosi od 20 do 90 dana. Pre samog ispitivanja neophodno je izmeriti masu uzorka, a nakon završetka ispitivanja masa se ponovo određuje i upoređuje sa početnom vrednošću. Otpornost na koroziju preko ovog testa se izražava preko gubitka materijala u milimetrima godišnje (mm/god), primenom Faradejevog zakona [114,115,117].

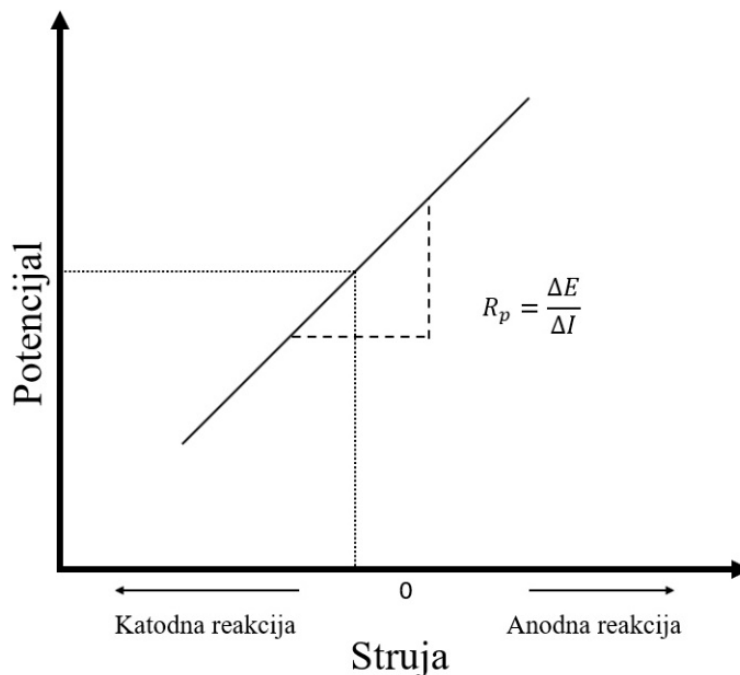
Vizuelna kontrola obuhvata posmatranje uzorka golim okom, ali i analizu uzoraka pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM), difrakcije X-zraka (XRD) i fotoelektronske spektroskopije X-zracima (XPS) [117].

Ideja ispitivanja pomoću slanog spreja/slane sobe zasniva se na izlaganju uzorka atmosferi koja sadrži 5 % rastvor NaCl pri temperaturi od 35 °C. Ovakvom tipu ispitivanja se uglavnom podvrgavaju delovi koji dolaze u kontakt sa morskom vodom ili se nalaze u neposrednoj blizini [117].

Elektrohemijsko ispitivanje pružaju značajne informacije o korozionim elektrohemijskim reakcijama i mehanizmima koji stoje iza njih. Prilikom elektrohemijskog ispitivanja se koristi potenciostatički uređaj na koji su povezane radna, referentna i pomoćna elektroda, pri čemu su

sve elektrode uronjene u odgovarajući rastvor [117]. Tri parametra imaju veoma značajnu ulogu za ovo ispitivanje (jačina struje, potencijal i vreme) [117–119]

Najjednostavniji postupak elektrohemijškog ispitivanja korozije predstavlja metoda linearne polarizacije otpornosti (*engl.* Linear Polarisation Resistance – LPR). Kod ove metode meri se jačina struje u određenom opsegu potencijala (~20 mV). Kao rezultat dobija se kriva na dijagramu, a na osnovu njenog nagiba može se odrediti otpornost materijala prema određenom tipu korozije (slika 70) [117].



Slika 70. Prikaz LPR dijagrama [117]

Sa slike 70 se može videti šematski prikaz LPR dijagrama pri čemu nagib LPR prave (u pojedinim slučajevima krive) predstavlja polarizacioni otpor (R_p) između elektroda i elektrolita. Drugim rečima, dolazi do povećanja električnog otpora u elektrohemijškoj ćeliji usled hemijskih reakcija koje se odvijaju na elektrodama [117,120].

Druga metoda ispitivanja elektrohemijškog ispitivanja korozione postojanosti je Tafelova metoda [121]. Naziv je dobila po Juliusu Tafelu koji je razvio istoimenu formulu koja glasi:

$$\eta = a + b \cdot \log(I) \quad (10)$$

Gde je: η – ukupni potencijal; I – gustina struje, a i b – konstante.

Rezultati koji su dobijeni Tafelovom metodom su prikazani u formi dijagrama i oni su važeći samo u slučaju kada imamo uniformnu koroziju po celokupnoj površini uzorka. Ovo Tafelovu metodu čini izuzetno pogodnom za poređenje uzoraka sličnog hemijskog sastava [121].

Prilikom ispitivanja korozione postojanosti prema Tafelovoj metodi, Galvele je u svom radu [122] pokazao da tokom elektrohemijskog ispitivanja korozione postojanosti dolazi do pada pH unutar jamica (pitova). S obzirom na to da se kiselost na površini aluminijuma spušta ispod pH 4, dolazi do potpunog rastvaranja produkata korozije u okolnom elektrolitu. Kao rezultat ovog fenomena, ispitivana površina ostaje čista od produkata korozije, što omogućava jasnu opservaciju i preciznu analizu morfologije nastalog usled korozije.

Posebna karakteristika piting korozije ogleda se u njenom specifičnom mehanizmu širenja. Istraživanja koja su sprovedli Liang i Melchers [123] ukazuju na to da se piting korozija širi preferencijalno duž specifičnih kristalografskih ravni osnovnog materijala, a ne nasumično. Upravo zbog ove zavisnosti procesa rastvaranja od kristalografske orijentacije zrna, ovaj fenomen se u literaturi označava kao kristalografska korozija (*engl. crystallographic corrosion*) [123,124].

3. Eksperimentalni deo

Iako je primena postupka sa dvostranim (bobin) alatom dokumentovana u literaturi, naučni podaci koji se bave uporednom analizom parametara u odnosu na konvencionalno zavarivanje trenjem sa mešanjem su nepotpuni. Kako bi se adekvatno istražila ova problematika, sproveden je eksperimentalni rad podeljen na dva preliminarne i glavni eksperiment.

Cilj prvog preliminarneog eksperimenta (I) bio je definisanje adekvatne geometrije alata uzimajući u obzir generisanje toplote, mikrostrukturu, greške u zavarenim spojevima i mehaničke osobine.

Drugi preliminarni eksperiment (II) odredio je optimalni međurameni prostor na bobin alatu. Sa tim saznanjima, pristupilo se glavnom eksperimentu, koji je imao za cilj ispitivanje uticaja parametara bobin ZTM i poređenje sa konvencionalnim ZTM postupkom, kako bi se sagledale razlike između dva postupka, tačnije, razlika u mikrostrukturi, mehaničkim osobinama i korozionoj postojanosti zavarenih spojeva.

3.1 Eksperimentalni deo predeksperimenta I i II

Zbog velike sličnosti prvog i drugog predeksperimenta u pogledu uređaja za zavarivanje i uređaja za karakterizaciju koji su bili korišćeni, prvi i drugi eksperiment biće prikazani objedinjeno. Svi eksperimenti su se obavili unutar Laboratorije za rezanje i Laboratorije za ispitivanje materijala na Departmana za proizvodno mašinstvo, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, osim ukoliko je drugačije navedeno u tekstu.

3.1.1. Osnovni materijal

Za osnovni materijal uzeta je legura aluminijuma EN AW 5005. Hemijski sastav osnovnog materijala je određen pomoću postupka optičke emisije spektroskopije (OES) u fabrici „Prva petoletka“ (Trstenik, Srbija) na uređaju ARL (*engl.* Applied Research Laboratories) 3580. Priprema za OES i sam proces određivanja hemijskog sastava su izvršeni u skladu sa standardom ISO 14707:2021 [125]. Hemijski sastav je prikazan u tabeli 2, dok su zatezne karakteristike date u tabeli 3, zatezne karakteristike su određene ispitivanjem zatezanjem pomoću univerzalne kidalici VEB ZDM 5/91. Ispitivanje je vršeno prema standardu ISO 6892-1:20019 [126]. Poprečni presek epruvete je kvadratni (5x5 mm) a početna merna dužina epruvete je iznosila 30 mm.

Tabela 2. Hemijski sastav aluminijuma AW 5005

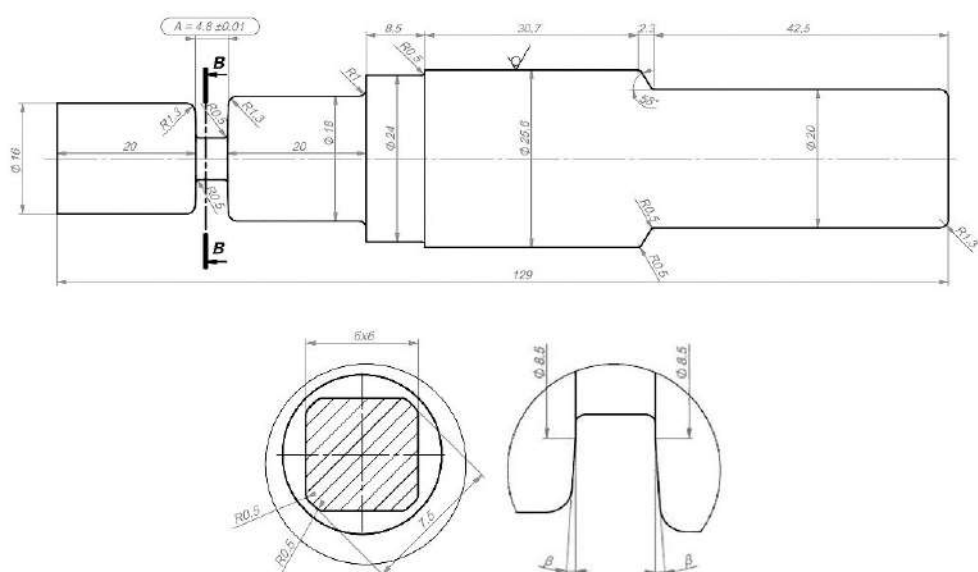
Rezultat merenja [mas.%]							
Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Al
0,07	0,13	0,79	0,23	0,28	0,055	0,02	Osnova
EN AW 5005 [110]							
Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Al
≤0,2	≤0,2	0,7÷1,1	≤0,3	≤0,7	≤0,2	≤0,1	Osnova

Tabela 3. Mehaničke osobine aluminijuma AW 5005 H112 [110]

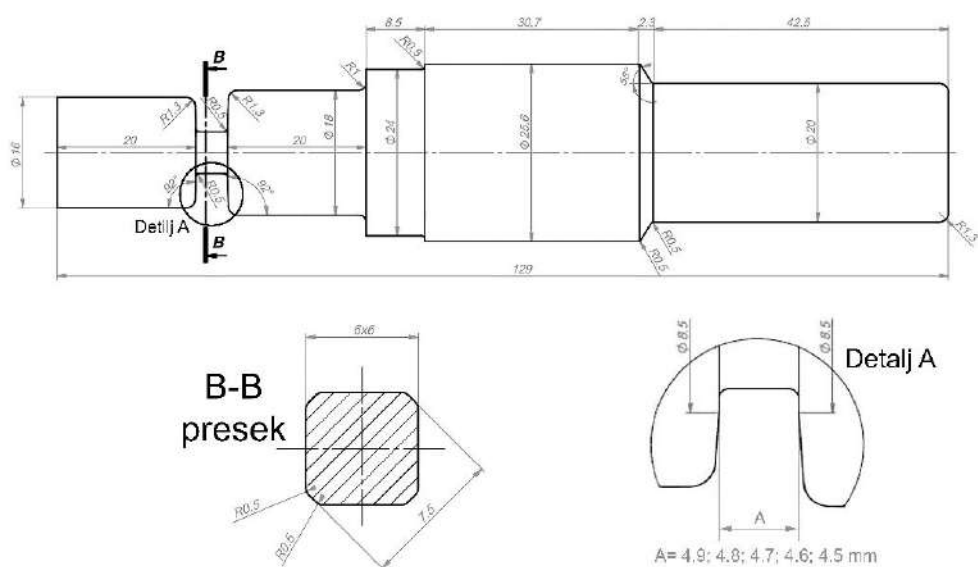
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
Merenje	119	137	16
EN AW 5005 [110]	Min 40	Min 100	18

3.1.2. Alati za zavarivanje

Oba alata za predeksperimente su izrađena od alatnog čelika EN X40CrMoV5-1 (ekvivalent ASTM H13), a njihovi crteži su prikazani na slikama 71 i 72. Alati u prvom predeksperimentu se razlikuju po nagibu ramena od 2° i 4° , dok je u drugom predeksperimentu varirano međurameno rastojanje samo za nagib ramena od 2° .



Slika 71. Segment crteža bobin alata za prvi predeksperiment; $\beta=2^\circ$; $\beta=4^\circ$



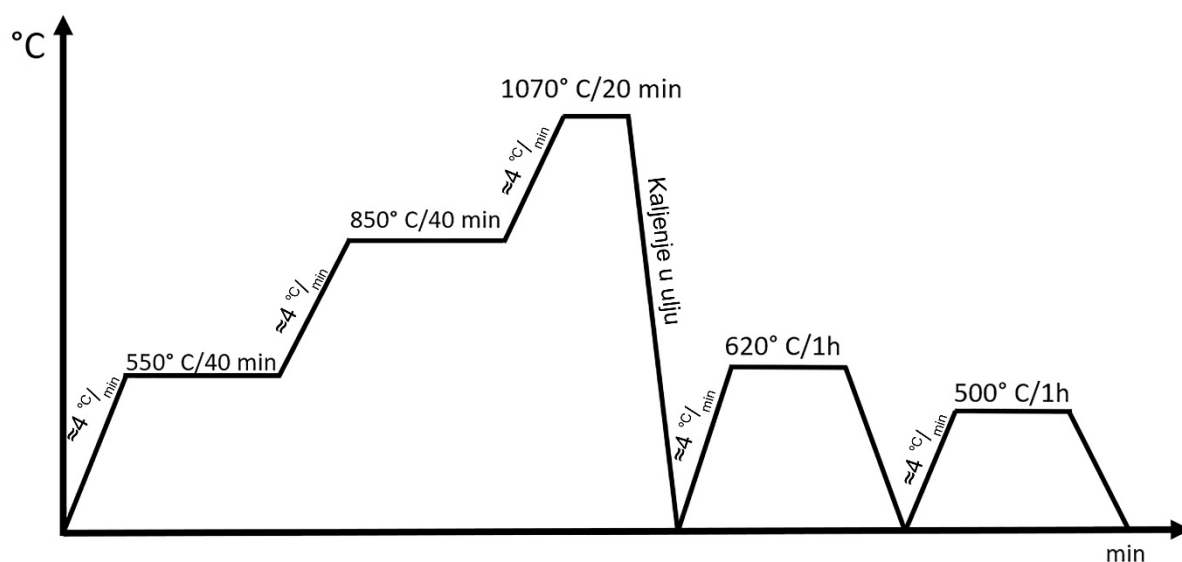
Slika 72. Segment crteža bobin alata za drugi predeksperiment

Alati su nakon mašinske obrade podvrgnuti termičkoj obradi – poboljšavanje (kaljenju i otpuštanju) radi postizanja adekvatnih mehaničkih svojstava neophodnih za proces zavarivanja trenjem sa mešanjem. Termička obrada alata je vršena u prostorijama Laboratorije za materijale pomoću komorne peći „Grejač komerc MP-3“ (slika 73). Grafički prikaz režima termičke obrade je dat na slici 74.



Slika 73. Komorna peć Grejač komerc MP-3

Nakon termičke obrade, na alatima je postignuta tvrdoća od približno 51 HRC, što je u potpunoj saglasnosti sa preporukama standarda ISO 4957:2018 [127] za korišćeni alatni čelik.



Slika 74. Grafički prikaz termičke obrade alata

3.1.3. Zavarivanje i parametri

Zavarivanje u okviru oba predeksperimenta realizovano je pomoću vertikalne glodalice Prvomajska FSSGVK-3, prikazane na slici 75.



Slika 75. Vertikalna glodalica Prvomajska FSSGVK-3

U tabelama 4 i 5 su prikazani parametri zavarivanja korišteni tokom oba predeksperimenta, a takođe je data i legenda za obeležavanje uzoraka u odnosu na korištene parametre. Zadiranje (interferencija) je pojam koji definiše veličinu za koju je rastojanje između ramena alata manje od debljine osnovnog materijala, a izražava se u apsolutnim (mm) ili relativnim (%) vrednostima.

Tabela 4. Legenda obeležavanja uzoraka i parametri zavarivanja predeksperimenta I

Oznaka uzoraka	Oznaka alata	Nagib ramena [°]	Brzina obrtanja alata [°/min]	Pomak [mm/min]
A2-1	A2	2	900	20
A2-2			1120	
A2-3			1400	
A4-1	A4	4	900	
A4-2			1120	
A4-3			1400	

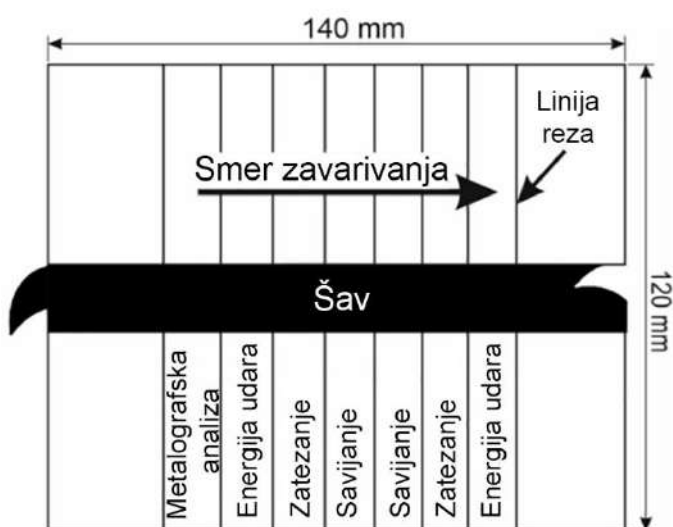
Tabela 5. Legenda obeležavanja uzoraka sa parametrima zavarivanja predeksperimenta II

Oznaka uzorka	Dimenzija međuramenog prostora [mm]	Interferencija [mm]	Interferencija [%]	Brzina obrtanja [°/min]	Pomak [mm/min]
1	4,9	0,1	2	1400	20
2	4,8	0,2	4		
3	4,7	0,3	6		
4	4,6	0,4	8		
5	4,5	0,5	10		

U oba predeksperimenta postupak zavarivanja je posmatran Termovizijskom kamerom ThermoPro TP8S (slika 76) kako bi se pratila temperatura tokom procesa i utvrdio njen uticaj na karakteristike zavarenog spoja. Kamera je kalibrisana na prosečnu temperaturu ljudskog tela (36,5°)

**Slika 76.** Termovizijska kamera ThermoPro TP8S

Nakon zavarivanja izvršeno je isecanje uzoraka za karakterizaciju prema šemi datoj na slici 77.

**Slika 77.** Šema reza za predeksperimentalna ispitivanja I i II

3.1.4. Karakterizacija zavarenih spojeva

Karakterizacija zavarenih spojeva obuhvatala je vizuelnu kontrolu, određivanje mehaničkih karakteristika i analizu mikrostrukture. Urađena je standardna priprema uzoraka za metalografsku pripremu: Brušenje pomoću SiC brusnog papira (od P80 do P2500), mehaničko poliranje sa dijamantskom suspenzijom (6;3 i 1 μm), nakon čega je izvršeno razvijanje strukture pomoću Kelerovog reagensa. Metalografska analiza je izvedena pomoću svetlosnog mikroskopa Leitz Orthoplan koji je prikazan na slici 78.



Slika 78. Svetlosni mikroskop Leitz Orthoplan

Nakon metalografske analize je izvedeno ispitivanje zatezanjem pomoću univerzalne kidalice VEB ZDM5/91. Poprečni presek epruvete za zatezanje je iznosio 4×5 mm. Na istom uređaju je izvršeno i ispitivanje na savijanje preko lica i korena u tri tačke (dimenzije epruvete 10×120 mm). Na kraju je izvršeno ispitivanje energije udara pomoću instrumentiranog Šarpijevog klatna JWT – 450 (dimenzija epruvete 10×5×55 mm). Analiza morfologije površine loma je izvršena samo za uzorke iz drugog predeksperimenta. Uređaj korišten za analizu je skenirajući elektronski mikroskop (SEM) JEOL JSM 6460LV (slika 79) koji se nalazi u Univerzitetkom centru za elektronsku mikroskopiju (UCEM), Novi Sad.



Slika 79. Skenirajući elektronski mikroskop JEOL JSM 6460LV

3.2. Eksperimentalni deo glavnog eksperimenta

Glavni eksperiment se razlikovao u odnosu na predeksperimente. Korištena je druga serija legura (EN AW 6060 T66), alat je izrađen na osnovu rezultata predeksperimenta. Takođe, glavni eksperiment se odvijao na nekoliko lokacija. Karakterizacija zavarenih spojeva je proširena u odnosu na predeksperimente.

3.2.1. Osnovni materijal

Inicijalna faza eksperimentalnog istraživanja obuhvatila je nabavku i ulaznu kontrolu, odnosno proveru svojstava osnovnog materijala. Glavni eksperiment izveden je sa legurom aluminijuma EN AW 6060 T66. Glavni razlozi za izbor ove legure su bolje mehaničke osobine legura serije 6XXX u odnosu na legure serije 5XXX, kao i činjenica da se legure serije 6XXX češće primenjuju u automobilske industriji i proizvodnji železničkih vagona, gde je karakteristična intenzivna primena tehnologije ZTM. Hemijski sastav materijala je određen pomoću optičkog emisionog spektrometra Spectro SPECTROMAXx uređaja. Uređaj se nalazi na Univerzitetu Aleksandar Dubček u Trenčinu, Republika Slovačka. Ispitivanje je izvršeno u skladu sa standardom ISO 14707:2021 [125].

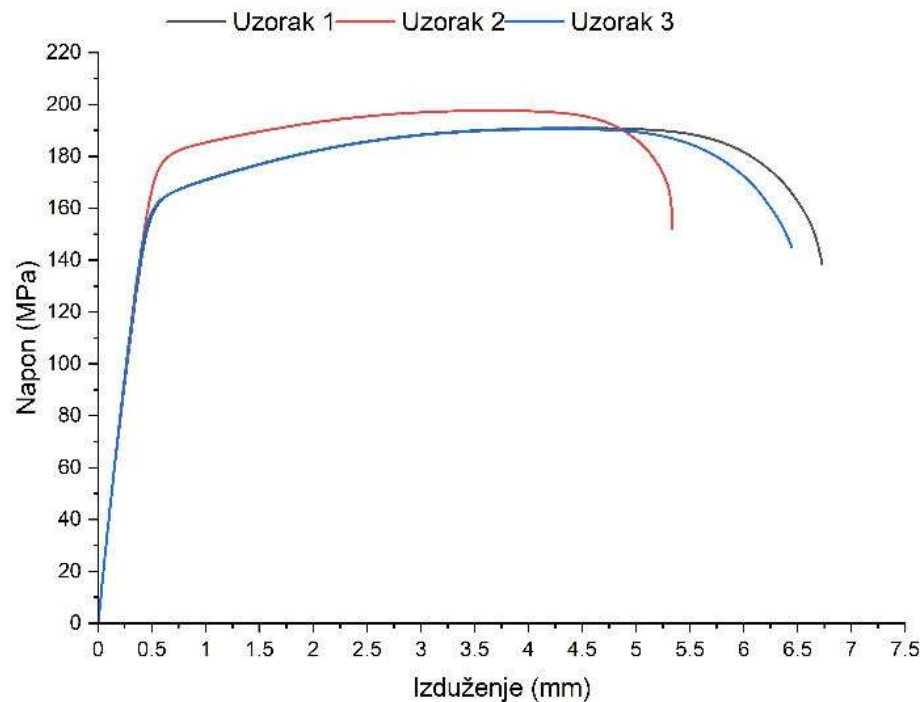
U tabeli 6 su dati rezultati provere hemijskog sastava materijala. Na osnovu dobijenih rezultata, potvrđeno je da je reč o leguri EN AW 6060. Pored određivanja hemijskog sastava materijala, izvršena je provera zateznih karakteristika osnovnog materijala na Tehničkom univerzitetu u Ilmenau, Nemačka. Ispitivanje je sprovedeno na univerzalnoj kraljici Hegewald & Peschke, Inspect Retrofit. Ispitivanje je vršeno u skladu sa ISO 6892 – 1:2019 [128]. Rezultati ispitivanja zatezanjem prikazani su u tabeli 7, dok su dijagrami zatezanja osnovnog materijala prikazani na slici 80.

Tabela 6. Rezultati određivanja hemijskog sastava pomoću optičke emisione spektroskopije

Hem. el. [mas. %]	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Al
Uzorak	0,532	0,425	0,205	0,0432	0,0545	0,0126	Osnova
EN AW 6060	0,3÷0,6	0,35÷0,6	0,1÷0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,05	Osnova

Tabela 7. Rezultati ispitivanja zatezanjem

Uzorak	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [mm]
1.	162	191	6,7
2.	180	198	5,4
3.	161	191	6,5
Srednja vrednost	168±10,69	193,3±4,04	6,2±0,7
EN AW 6060 T66 [110]	150	195	6

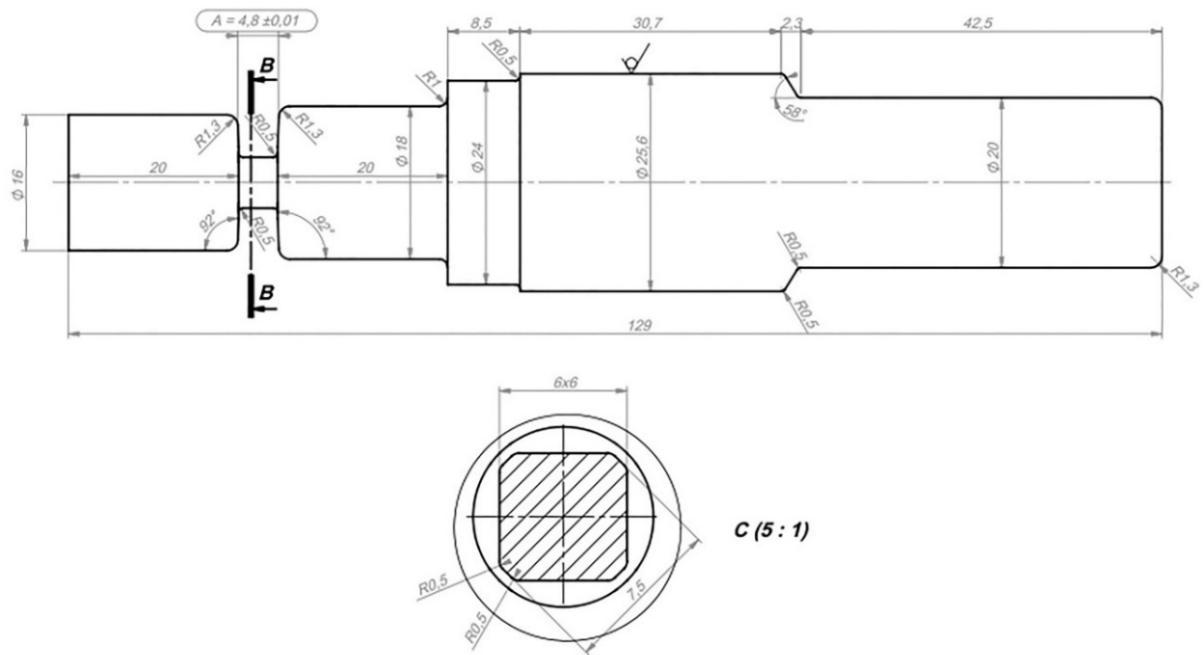


Slika 80. Dijagrami zatezanja osnovnog materijala

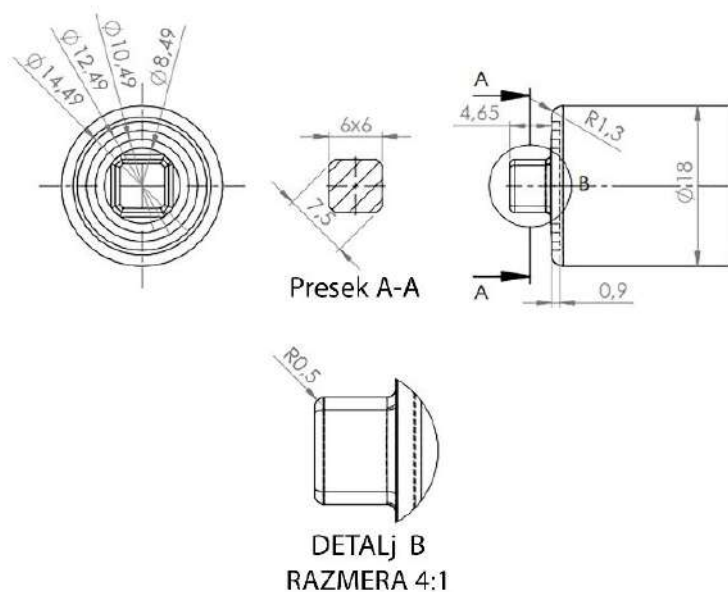
Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 7, konstatuje se da termičko stanje legure odgovara stanju T66. Vrednosti napona tečenja su veće od propisanih, dok su vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja u propisanim granicama. Na osnovu dobijenih rezultata potvrđeno je da je reč o leguri EN AW 6060 T66.

3.2.2. Alat za zavarivanje

Pregledom literature [7,8,32,64] i komercijalno dostupnu ponudu materijala, doneta je odluka da se za izradu alata primeni visokolegirani alatni čelik za rad na toplo EN X37CrMoV5–1 (ekvivalent ASTM H11, UNS T20811). Izrada konvencionalnog i bobin alata je obavljena u pogonu alatnice „MIR“ iz Trstenika prema crtežima sa slika 81 i 82. Geometrija bobin alata preuzeta je kao kombinacija geometrija korišćenih u prvom i drugom predeksperimentu, dok je geometrija alata za konvencionalni postupak prilagođena geometriji korišćenoj u ranijim eksperimentima [20,21,129]. Razlika se ogleda u tome što prečnik ramena alata odgovara gornjem prečniku bobin alata radi lakšeg poređenja rezultata.



Slika 81. Crtež bobin alata za ZTM



Slika 82. Segment crteža konvencijalnog alata za ZTM

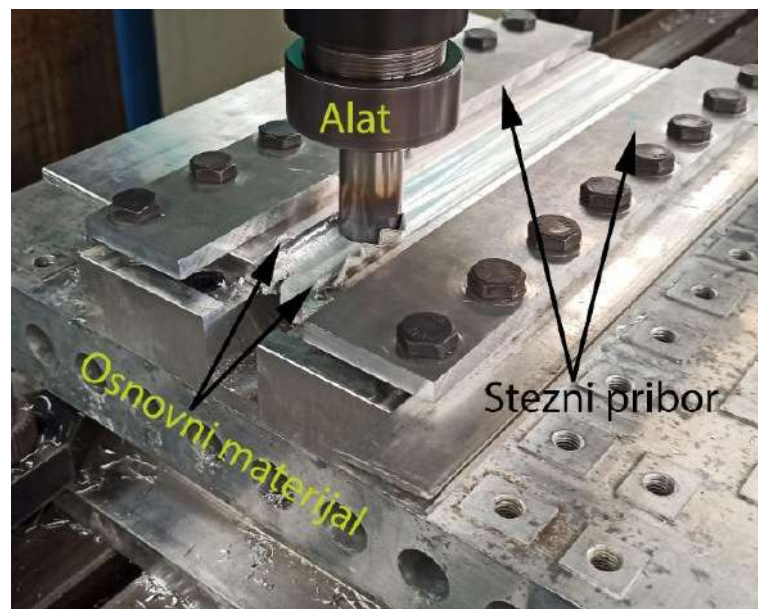
3.2.3. Zavarivanje i parametri

Zavarivanje uzoraka je izvršeno na prilagođenim (retrofitovanim) vertikalnim glodalicama. Konvencionalno zavarivanje trenjem sa mešanjem vršeno je u pogonu alatnice „Mir“ iz Trstenika na CNC glodalici Deckel Maho FP3-50 (slika 83a), dok je zavarivanje bobin alatom izvedeno u Laboratoriji za konvencionalne tehnologije obrade, Departmana za proizvodno mašinstvo, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu. Tom prilikom korišćena je vertikalna glodalica Prvomajska FSSGVK-3 (slika 83b).



Slika 83. CNC vertikalna glodalica Deckel Maho FP3-50 i Prvomajska FSSGVK-3

Parametri korišteni prilikom zavarivanja uzoraka su određeni na osnovu vrednosti pomaka i brzina obrtanja alata koje omogućava vertikalna glodalica Prvomajska FSSGVK-3. Glavni eksperiment odnosio se na zavarivanje pomoću bobin alata. Legenda označavanja uzoraka, kao i parametri zavarivanja uzoraka su prikazani u tabeli 8. Pomenuta glodalica omogućava i manju brzinu obrtanja alata ($900 \text{ }^{\circ}/\text{min}$) sa kojom je prvobitno pokušano izvođenje eksperimenta. Međutim, prilikom prvog prolaza sa tom brzinom obrtanja alata, dolazilo je do pojave nestabilnog toka materijala, te zbog čega je od nje odustalo i prešlo se na prvu veću brzinu obrtanja alata ($1120 \text{ }^{\circ}/\text{min}$). Postavka eksperimenta je data na slici 84.



Slika 84. Postavka eksperimenta

Tokom eksperimenta je došlo do loma bobin alata, a izgled preloma se može videti na slici 85.



Slika 85. Prikaz prelomljenog alata

Na osnovu slike 85 se može konstatovati da je do loma došlo usled zamora materijala. Dodatno se može konstatovati da je trn alata bio izložen kombinovanom dejstvu zateznih napona i cikličnog opterećenja.

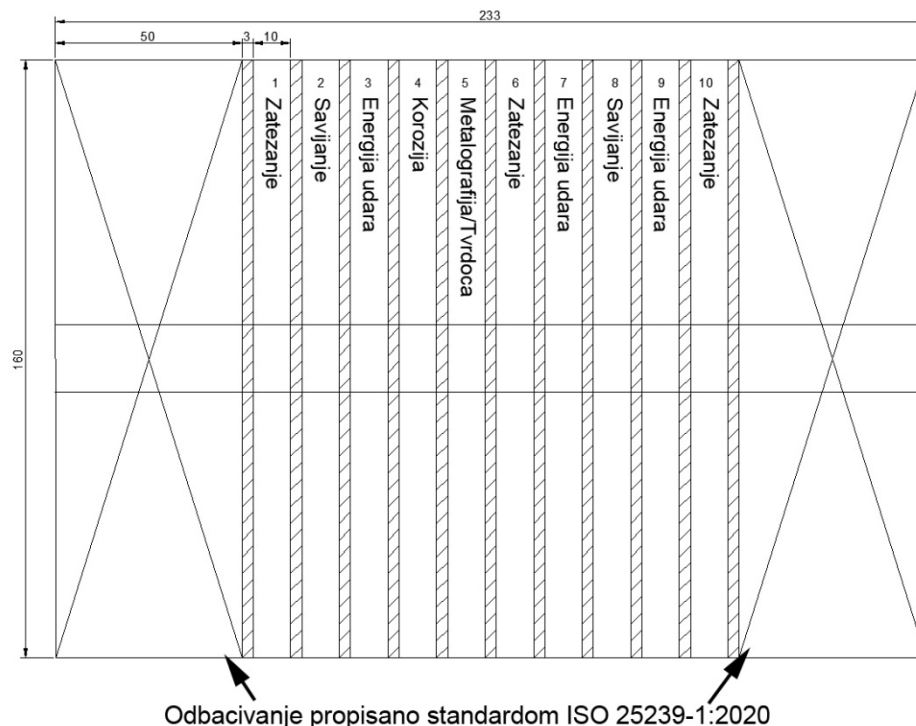
Drugi set eksperimenata (odnosno zavarivanje pomoću konvencionalnog ZTM alata) je vršen u Trsteniku (alatnica MIR) na CNC vertikalnoj glodalici Deckel Maho FP3-50 sa ciljem izrade zavarenih spojeva koji bi bili međusobno uporedivi sa prethodno izvedenim spojevima. Postavka oba eksperimenta je bila ista kao kod zavarivanja bobin alatom i data je na slici 84.

Tabela 8. Parametri zavarivanja kroz eksperimente

Parametri zavarivanja sa bobin alatom za ZTM pomoću Prvomajska FSSGVK-3			
Oznaka uzorka	Brzina obrtanja alata [°/min]	Brzina zavarivanja (pomak) [mm/min]	Debljina OM [mm]
BA 1.1.	1120	16	4,8
BA 1.2.		20	
BA 1.3.		26	
BA 2.1	1400	16	
BA 2.2		20	
*BA 2.3		26	
Parametri zavarivanja sa konvencionalnim alatom za ZTM pomoću Deckel Maho FP3-50			
Oznaka uzorka	Brzina obrtanja alata [°/min]	Brzina zavarivanja (pomak alata) [mm/min]	Debljina OM [mm]
KA 1.1.	1120	16	4,8
KA 1.2.		20	
KA 1.3		26	
KA 2.1	1400	16	
KA 2.2		20	
KA 2.3		26	

***Lom alata tokom izvođenja eksperimenta**

Nakon zavarivanja je usledilo isecanje epruveta za potrebnu karakterizaciju zavarenih spojeva (metalografska analiza, ispitivanje zatezanjem, savijanjem, tvrdoće i energije udara), prema šemi prikaza datoj na slici 86.



Slika 86. Šematski prikaz rezanja zavarene ploče

3.2.4. Karakterizacija materijala i spojeva

Nakon procesa zavarivanja izvršena karakterizacija zavarenih spojeva koja je obuhvatila: metalografsku analizu, ispitivanje zatezanjem, savijanjem i energije udara, mapiranje mikrotvrdoće, ispitivanje korozione postojanosti, kao i SEM analizu površina loma i korodiranih površina.

3.2.4.1. Svetlosna mikroskopija

Metalografska priprema se sastoji iz: isecanja uzorka, zatapanja (montiranja), brušenja, poliranja i na kraju nagrivanja uzorka [130]. Isecanje uzorka je izvršeno na uređaju MEP Shark 282 uz intenzivno hlađenje sa rashladnim sredstvom, a hladno zatapanje je obavljeno pomoću Buehler Cast N' Vac 1000. Na uređaju Buehler Phoenix 4000 (slika 87) izvršena je priprema uzorka za metalografiju: brušenje sa SiC brusnim papirom (P100÷P3000) uz hlađenje vodom, nakon čega je vršeno poliranje uzoraka sa dijamantskim česticama ($9\mu\text{m} \div 1\mu\text{m}$). Na kraju je izvršeno finalno poliranje sa oksidnim rastvorom za poliranje – OPS sredstvo (*engl.* Oxide Polishing Solution). Uzorci zavareni pomoću konvencionalnog alata su nakon isecanja toplo zatapani na uređaju QATM Qpress50 koji se nalazi u pogonu fabrike BMTS u Novom Sadu. Procedura pripreme pomenutih uzoraka u potpunosti odgovara postupku za predeksperimente, koji je opisan u poglavlju 3.1.4, uz dodatak završnog poliranja OPS-om.



Slika 87. Uređaj za brušenje i poliranje Buheler Phoenix 4000

Nakon analize poliranih uzoraka, izvršeno je elektrolitičko nagrivanje, nakon kojeg je vršena analiza nagrivenih uzoraka. Za razvijanje mikrostrukture zavarenog spoja korišćeno je elektrolitičko nagrivanje uzoraka Barkersovim reagensom pomoću uređaja Lectropol – 5 Automatic (slika 89). Parametri korišćeni tokom nagrivanja su: struja 35 V, a vreme nagrivanja je iznosilo 35 sekundi. Metalografska analiza je izvršena pomoću svetlosnih mikroskopa Zeiss AxioScope.A1 na kojem je postavljena kamera AxioCam ICc3 (Tehnički univerzitet u Ilmenau – slika 88) i Leitz Orthoplan (Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad).

Prilikom metalografske analize nagrivenih uzoraka, korišćena je polarizovana svetlost. Primena polarizovane svetlosti omogućava pojavu različitih boja svakog zrna na površini uzorka, što značajno olakšava analizu, kao i uočavanje različitih zona i veličina zrna unutar zavarenog spoja.



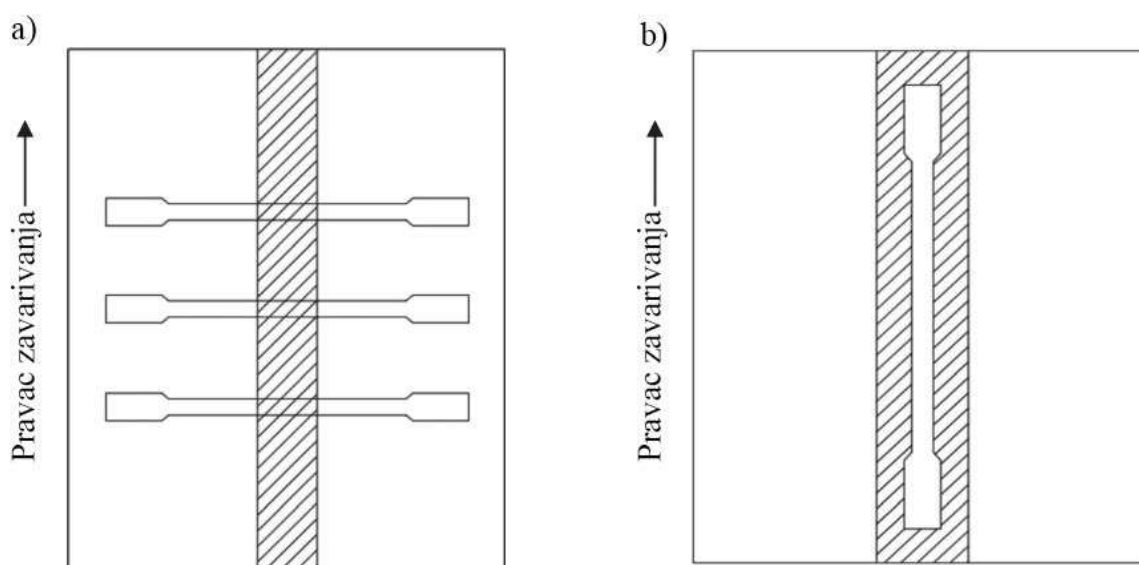
Slika 88. Svetlosni mikroskop Zeiss AxioScope.A1 sa AxioCam ICc3



Slika 89. Uređaj za elektrolitičko nagrizanje Lectropol-5 Automatic [131]

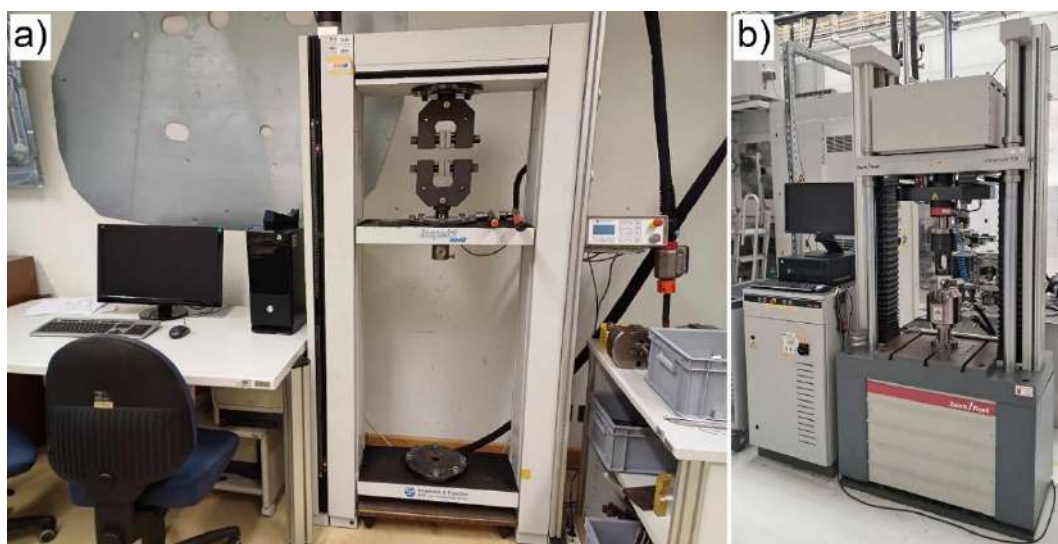
3.2.4.2. Ispitivanje zatezanjem

Ispitivanje zavarenih spojeva zatezanjem definisano je posebnim standardom ISO 4136:2022 [132]. Epruvete za ispitivanje mogu uzorkovati poprečno, tako da se zavareni spoj nalazi u sredini paralelnog dela epruvete (slika 90a, što je primenjeno u ovom radu) ili tako da se kompletna epruveta izreže iz zavarenog spoja (slika 90b).



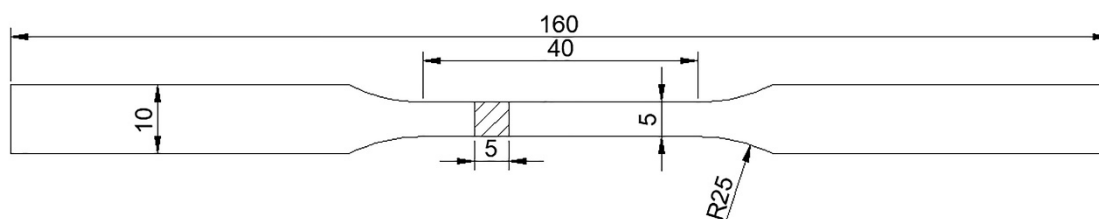
Slika 90. Prikaz poprečnog (a) i uzdužnog (b) uzorkovanja [9]

Određivanje zateznih karakteristika osnovnog materijala i spojeva zavarenih pomoću bobin alata je izvršeno na Tehničkom univerzitetu u Ilmenau, Savezna republika Nemačka. Ispitivanje je sprovedeno na univerzalnoj kidalici Hegewald & Peschke, Inspect Retrofit koja je prikazana na slici 91a. U skladu sa ISO 6892 – 1:2020 [126]. Uzorci zavareni konvencionalnim postupkom ZTM su ispitani u pogonu fabrike BMTS (Novi Sad, Republika Srbija) na univerzalnoj kidalici Zwick Roell Vibrophore 100 (slika 91b).



Slika 91. Prikaz univerzalnih kidalica: a) Hegewald & Peschke, Inspect Retrofit;
b) Zwick Roell Vibrophore 100

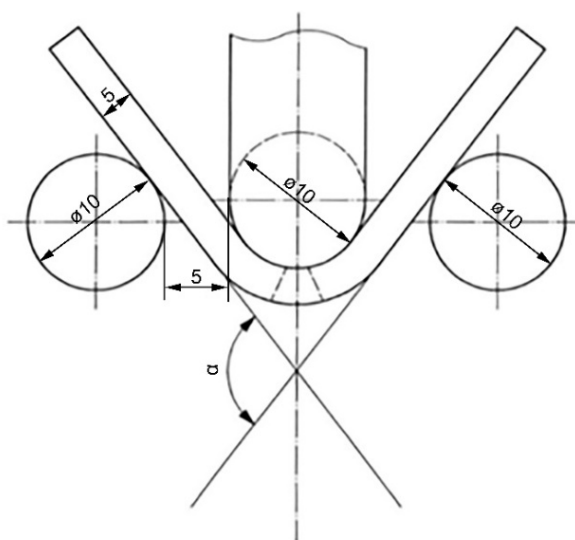
Crtež epruvete za ispitivanje zatezanjem je dat na slici 92.



Slika 92. Crtež epruvete za ispitivanje zatezanjem

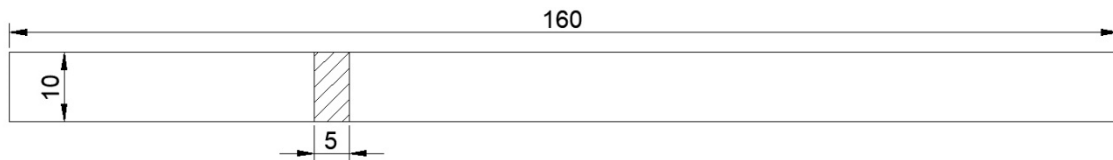
3.2.4.3. Ispitivanje savijanjem

Postupak ispitivanja savijanja je definisan standardom ISO 5173:2023 [133]. Ispitivanje savijanjem vrši se metodom savijanja u tri tačke (slika 93).



Slika 93. Šematski prikaz ispitivanja savijanjem u tri tačke [133]

Ispitivanje zavarenih spojeva savijanjem izvršeno je u Laboratoriji za ispitivanje materijala, Departmana za proizvodno mašinstvo, Fakulteta tehničkih nauka. Uređaj na kojem je vršeno ispitivanje je univerzalna kidalica VEB ZDM5/91 Leipzig. Ispitivanje je izvršeno uz primenu pribora za savijanje u tri tačke. Vršeno savijanje preko lica i preko korena zavarenog spoja. Crtež epruvete za ispitivanje savijanjem je dat na slici 94.



Slika 94. Crtež epruvete za ispitivanje savijanjem

3.2.4 4. Mapiranje mikrotvrdoće

Merenje (mapiranje) mikrotvrdoće na poprečnim presecima zavarenih spojeva realizovano je primenom automatskog uređaja Struers DuraScan 70 (slika 95). Uređaj se nalazi na Tehničkom univerzitetu u Ilmenau, Savezna republika Nemačka. Tokom ispitivanja primenjeno je opterećenje od 100 gf, dok je razmak između otisaka iznosio 30 μm . Rastojanje otisaka od ivice uzorka i ivice grešaka iznosilo je oko 90 μm .



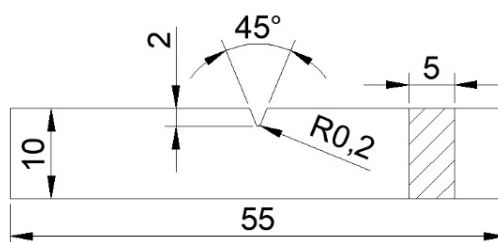
Slika 95. Uređaj za merenje mikrotvrdoće Struers DuraScan 70 [134]

3.2.4.5. Ispitivanje energije udara

Energija udara je ispitana na instrumentiranom Šarpijevom klatnu JWT-450 (slika 96) koje se nalazi u Laboratoriji za ispitivanje materijala, Departmana za proizvodno mašinstvo, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Epruveta za ispitivanje je izrađena u skladu sa standardom ISO 148-1:2016 [135] i prikazana je na slici 97.



Slika 96. Instrumentirano Šarpijevo klatno JWT-450



Slika 97. Crtež epruvete za ispitivanje energije udara

Korišćena je modifikovana epruveta za energiju udara (slike 97) kod koje je redukovana debljina epruvete na 5 mm, u skladu sa zahtevima prethodno navedenog standarda.

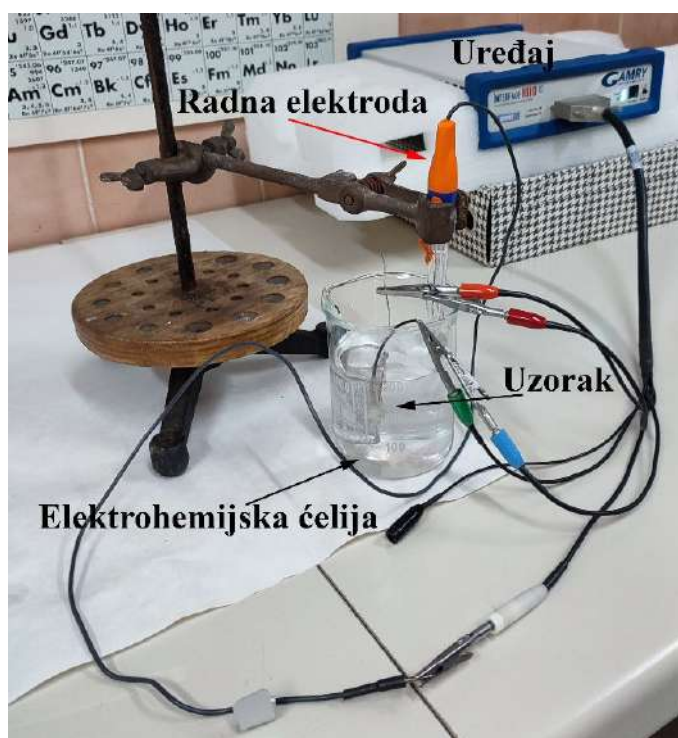
3.2.4.6. Ispitivanje korozijske otpornosti spoja

Ispitivanje korozijske postojanosti je vršeno na Vojno-tehničkom institutu (VTI) u Beogradu, u laboratoriji Sektora za materijale i zaštitu. Ispitani su reprezentativni uzorci zavareni pomoću bobin (BA 1.2) i konvencionalnog alata (KA 1.2). Iz reprezentativnih uzoraka je isečen grumen i vršeno je ispitivanje uzoraka sa korena, i izvršeno je poređenje sa uzorkom zavarenim bobin alatom sa takođe korene strane (ali koja je „obrađena“ donjim ramenom), kao i korozijske postojanosti osnovnog materijala. Razlog ispitivanja korene strane zavarenih spojeva jeste suštinska razlika između konvencionalnog i bobin ZTM postupka, kao i namera da se ta razlika kvantifikuje elektrohemijским ispitivanjem korozijske postojanosti. Za ispitivanje je korišćen uređaj Interface 1010 E od proizvođača Gamry Instruments, prikaz uređaja je dat na slici 98.



Slika 98. Uređaj za elektrohemijsko ispitivanje

Uzorci su uronjeni u rastvor vode sa 3 mas.% NaCl i držani su 72 h na sobnoj temperaturi u uslovima otvorenog kola, nakon čega je sprovedeno ispitivanje primenom Tafelove metode (destruktivna metoda). Postavka eksperimenta prikazana je na slici 99.



Slika 99. Postavka eksperimenta elektrohemijskog ispitivanja korozijske postojanosti

Nakon sprovedenog eksperimenta izvršena je analiza polarizacionih krivih i određivanje brzine korozijske prema sledećoj formuli:

$$v_{kor} = C \cdot \frac{j_{kor} \cdot EW}{\rho} \quad (11)$$

Gde je: C – konstanta (specifična za seriju legura 6XXX koja iznosi 0,00327); j_{kor} – Gustina struje očitana sa dijagrama; EW – Ekvivalentna težina aluminijuma ($8,99 \frac{g}{eq}$) i ρ – Gustina materijala (za aluminijum $2,7 \frac{g}{cm^3}$).

3.2.4.7. Skenirajuća elektronska mikroskopija

Nakon ispitivanja uzoraka zatezanjem, savijanjem, udarom (određivanje energije udara) i ispitivanja korozijske postojanosti izabrani su reprezentativni uzorci koji će biti posmatrani i analizirani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa JEOL JSM 6460LV. Prikaz uređaja SEM mikroskopa je ranije dat na slici 77. Uzorci su isečeni na adekvatnu dimenziju (izdvojen zavareni spoj) kako bi mogli stati u vakumsku komoru. Uzorci su takođe prethodno isprani u alkoholu pomoću ultrazvučne kade.

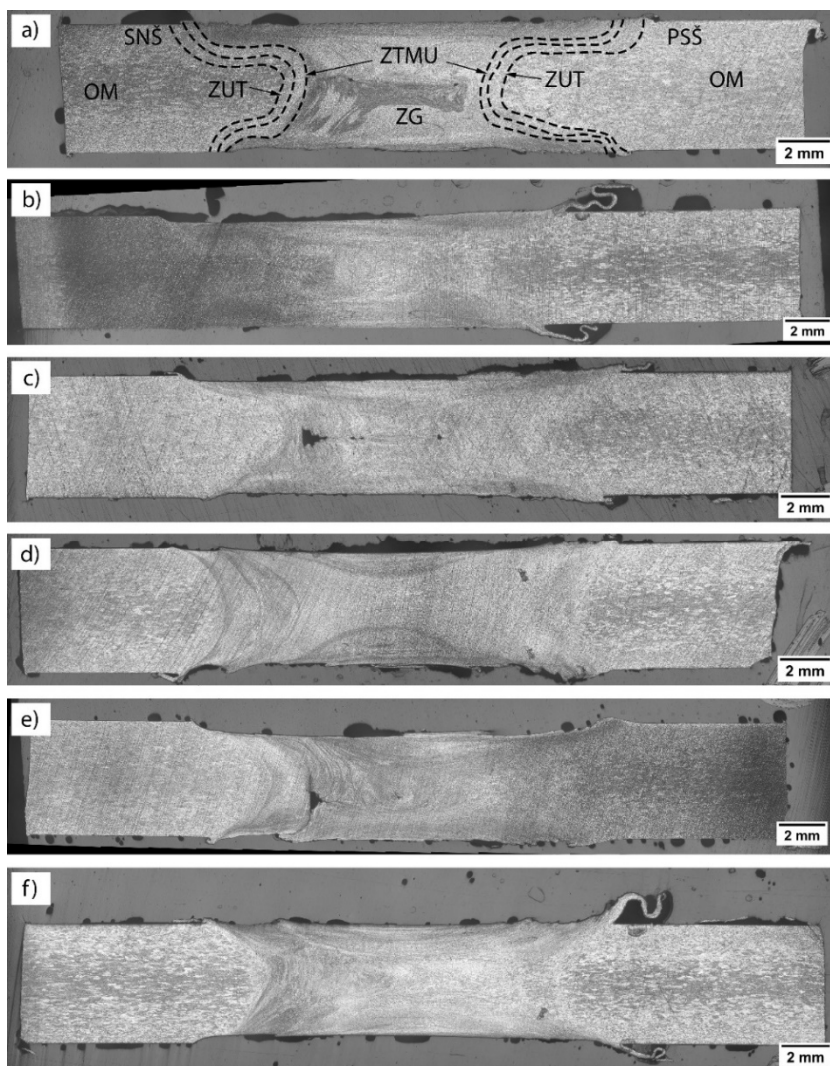
4. Rezultati

U ovom poglavlju prvo su prikazani objedinjeni rezultati dva predeksperimenta, nakon čega su predstavljeni rezultati glavnog eksperimenta.

4.1 Rezultati prvog i drugog predeksperimentalnog istraživanja

4.1.1 Rezultati prvog predeksperimenta

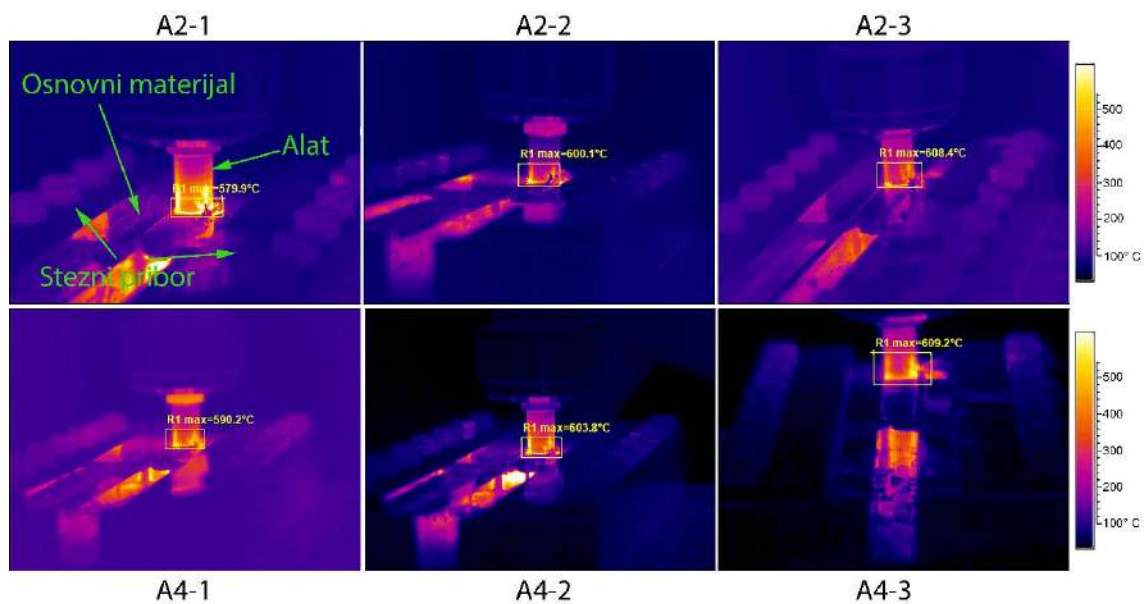
Makrostrukture zavarenih spojeva prikazane su na slici 100. Na osnovu pomenute slike može se konstatovati da se na uzorcima A2-1, A2-3 i A4-2 pojavljuju tunelski defekti. Kod uzorka A4-2 tunelski defekt se prostire duž celog zavarenog spoja, zbog čega se može klasifikovati kao crvotočina. Na osnovu izgleda makro uzorka može se zaključiti da crvotočina dopire do korena šava u obliku prsline.



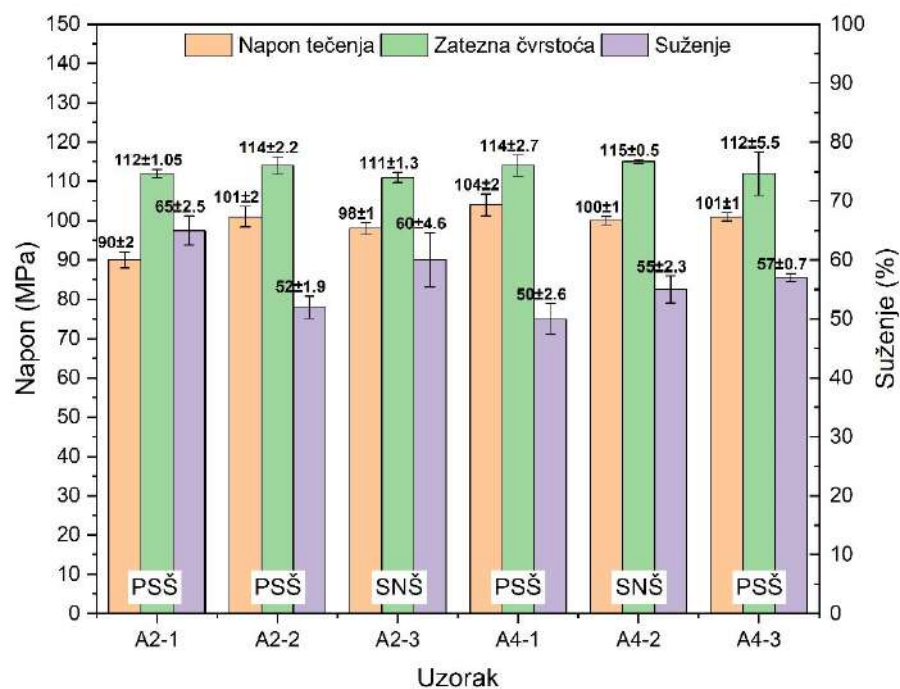
Slika 100. Makro strukture zavarenih spojeva (a) A2-1; (b) A2-2; (c) A2-3; (d) A4-1; (e) A4-2 i (f) A4-3

Na slici 101 su dati termogrami koji su snimljeni tokom procesa zavarivanja. Upotrebom alata sa nagibom ramena od 4° postiže se viša temperatura procesa zavarivanja u odnosu na alat sa uglom nagiba ramena 2° . Ovo je uzrokovano većim stepenom deformacije materijala usled većeg nagiba ugla ramena alata. Osim toga, što je veća brzina obrtanja alata, temperatura je takođe viša.

Sumiran grafički prikaz rezultata ispitivanja uzoraka zatezanjem dat je na slici 102, dok su svi rezultati dati u prilogu 1.1. Na osnovu dijagrama sa slike 102 se može konstatovati da uzorci zavareni pomoću alata sa nagibom ramena od 4° imaju povoljnije zatezne karakteristike u odnosu na alat sa nagibom ramena od 2° .



Slika 101. Prikaz termograma procesa zavarivanja



Slika 102. Rezultati ispitivanja zatezanjem

Analizom rezultata sa slike 102 uočava se da u okviru serije A2, uzorak A2-1 pokazuje najnižu vrednost napona tečenja od $90 \pm 2,4$ MPa, ali istovremeno i najveće suženje preseka od $68 \pm 2,5$ %, što ukazuje na izraženiju duktilnost u odnosu na uzorke A2-2 i A2-3. Zatezna čvrstoća u seriji A2 je ujednačena i kreće se u uskom intervalu od 111 do 114 MPa. Kod serije A4 naponi tečenja su generalno nešto viši nego kod A2 i kreću se oko $100 \div 104$ MPa. Zatezna čvrstoća je takođe blago viša, pri čemu uzorak A4-2 dostiže najveću vrednost u celom skupu, oko $115 \pm 0,5$ MPa u odnosu na seriju A2. Suženje preseka kod A4 uzoraka nalazi se u opsegu od približno $55 \div 59$ %, što je niže od maksimalne vrednosti zabeležene kod A2-1. Poređenjem makrostruktura sa slike 100 i rezultata sa dijagrama (slika 102) može se konstatovati da makrostrukturni tunel uočen kod uzorka A4-2 nije zahvatao zonu iz koje je izdvojena epruveta za zatezanje, niti se protezao duž celog spoja.

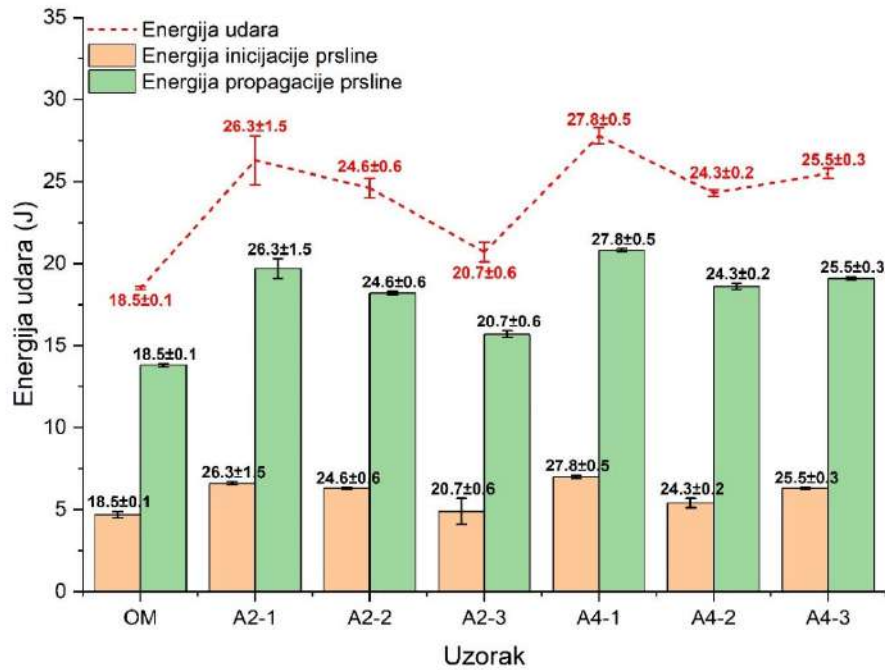
Nakon ispitivanja zatezanjem, sprovedeno je i ispitivanje savijanjem u tri tačke preko lica i korena zavarenog spoja. U tabeli 9 su prikazani rezultati ispitivanja zavarenih spojeva na savijanje preko lica i korena zavarenog spoja do ugla od 180° .

Tabela 9. Rezultati ispitivanja spojeva na savijanje

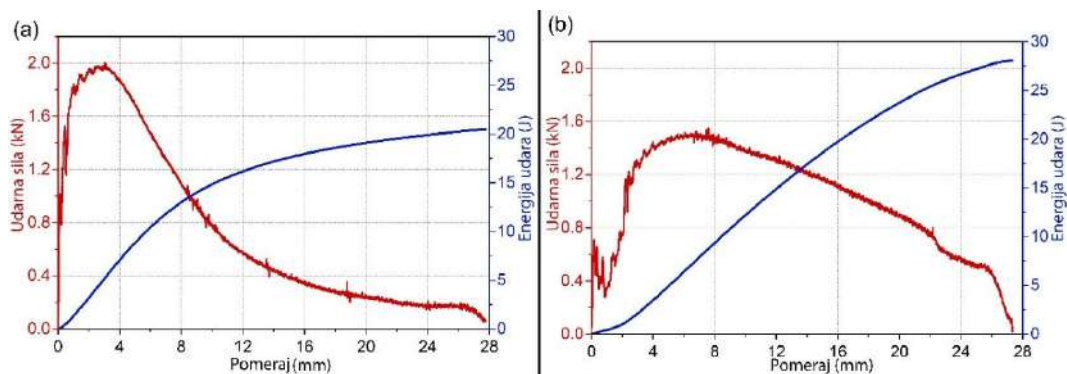
Uzorak	Savijanje preko korena		Savijanje preko lica	
	Pojava prve prsline [°]	Savijanje do 180°	Pojava prve prsline [°]	Savijanje do 180°
A2-1	Bez pojave prsline	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma
A2-2	Bez pojave prsline	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma
A2-3	Bez pojave prsline	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma
A4-1	Bez pojave prsline	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma
A4-2	14,3	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma
A4-3	Bez pojave prsline	Bez loma	Bez pojave prsline	Bez loma

Na osnovu rezultata iz tabele 9, može se konstatovati da svi uzorci mogu da se saviju do ugla od 180° bez pojave loma, jedino je kod uzorka A4-2 uočena prsline pri uglu od $14,3^\circ$ što je najverovatnije posledica prisutne crvotočine unutar tog dela zavarenog spoja.

Na kraju je izvršeno ispitivanje energije udara na instrumentovanom Šarpijevom klatnu. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 103 (dijagram formiran na osnovu priloga 1.2), dok su na slici 104 prikazana 2 reprezentativna dijagrama promene energije udara. Na osnovu tih rezultata može se zaključiti da zavarivanjem dobijeni uzorci pokazuju veću energiju udara u odnosu na osnovni materijal. Pored toga, uzorci izrađeni sa nagibom ramena od 4° imaju veću energiju udara u poređenju sa uzorcima zavarivanja izvedenim alatom sa nagibom ramena od 2° .



Slika 103. Rezultati ispitivanja energije udara



Slika 104. Dijagrami energije udara: a) osnovni materijal, b) zavareni spoj A2-1

4.1.2. Sumiranje nalaza nakon prvog predeksperimenta

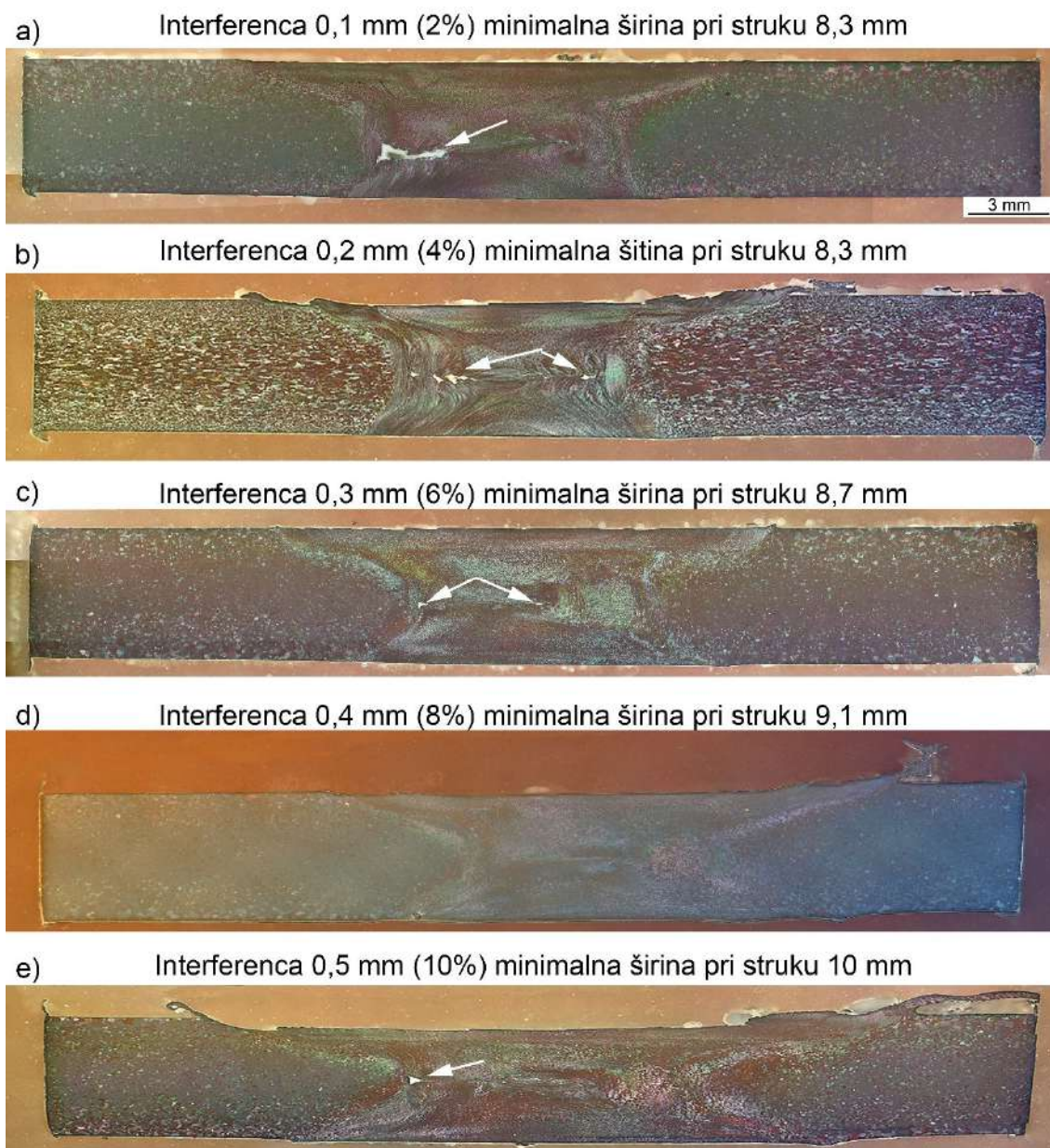
Obzirom na pojavu loma alata koja je uočena kod uzorka A4-1 (slika 105), smatra se da je nagib ramena od 4° prevelik, odnosno da je alat (trn) bio preopterećen. Iz tog razloga, dalji eksperimentalni rad nastavljen je sa nagibom ramena na alatu od 2° , jer je u tom slučaju dobijen optimalan uzorak sa stanovišta makroizgleda (bez pojave tunela ili crvotočine, uz relativno mali fleš), kao i prema rezultatima ispitivanja zatezanjem i energije udara uzorka A2-3.



Slika 105. Prikaz prelomljenog alata

4.2.1 Rezultati drugog predeksperimenta

Na slici 106 su dati makro prikazi zavarenih spojeva iz drugog predeksperimenta. Sa slike 106 se može videti da postoje tuneli (obeleženo belim strelicama) u zavarenim spojevima na svim uzorcima, osim na uzorku 4.



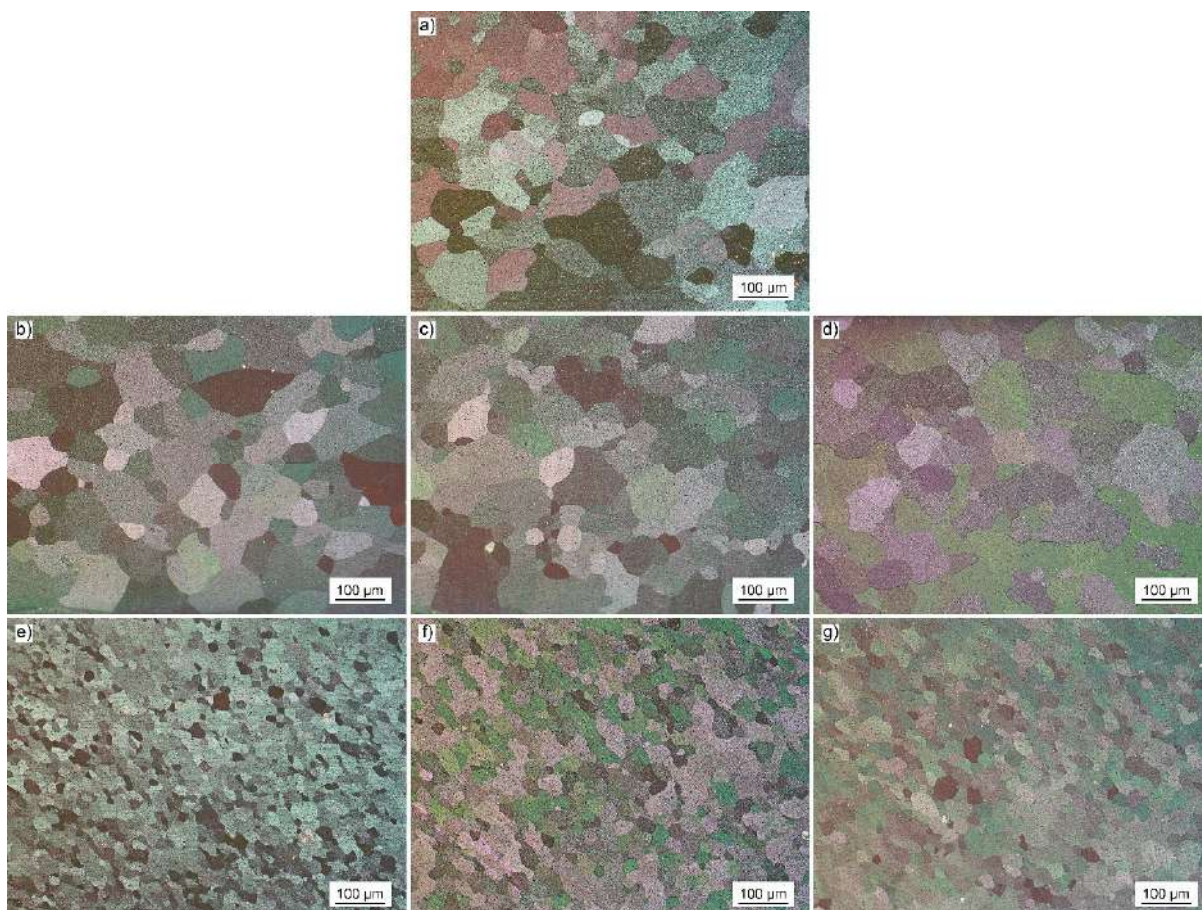
Slika 106. Makropreseći zavarenih spojeva; a) uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3, d) uzorak 4, e) uzorak 5 (tuneli su označeni strelicama)

U okviru metalografske analize izvršeno je i određivanje veličine zrna metodom linearnog preseka prema standardu ASTM E112-25 [136]. Rezultati su prikazani u tabeli 10, dok su pojedinačne reprezentativne mikrostrukture date na slici 107.

Tabela 10. Veličina zrna prema ASTM E112-25 [136]

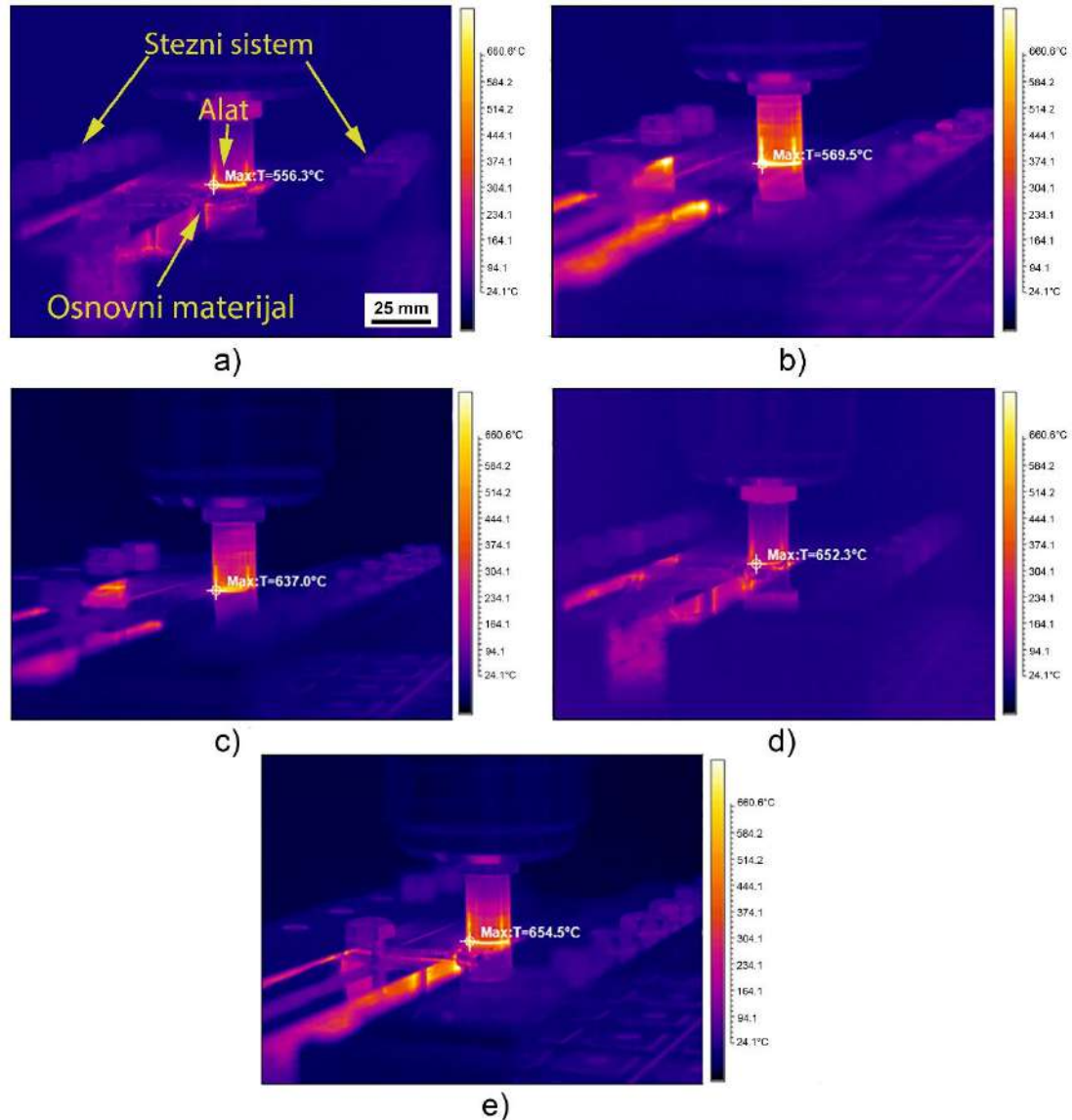
Uzorak	Zona uticaja toplote		Grumen	
	Veličina zrna G	Prosečni prečnik [μm]	Veličina zrna G	Prosečni prečnik [μm]
1	4	89,8	10	11,2
2	3	127	9	15,9
3	3	127	8,5	18,9
4	2,5	151	7,5	26,7
5	2,5	151	7	31,8

Na osnovu tabele 10 i mikrostruktura datih na slici 107, može se konstatovati da sa smanjenjem međuramenog prostora povećava veličina zrna kako u grumenu (zoni mešanja), tako i u zoni uticaja toplote. Navedena pojava povezana je sa višim temperaturama tokom procesa zavarivanja, koje pogoduju rastu i zadržavanju krupnijeg zrna tokom dinamičke rekristalizacije.



Slika 107. Prikaz reprezentativnih mikrostrukture uzoraka: a) osnovni materijal; b) uzorak 1; c) uzorak 4; d) uzorak 5; Zona mešanja/grumen: e) uzorak 1; f) uzorak 4; g) uzorak 5

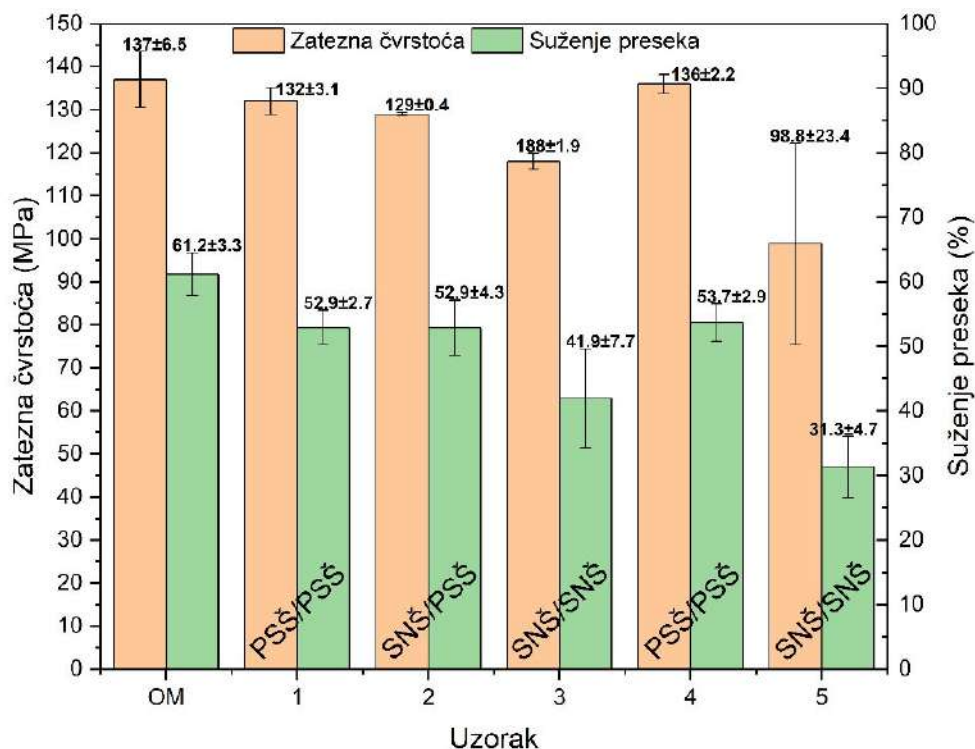
Termogrami procesa zavarivanja, ilustrovani na slici 108, jasno ukazuju na to da je najviša temperatura zabeležena tokom procesa zavarivanja uzorka 5. Generalno, smanjenjem međuramenog prostora, odnosno povećanjem interferencije, dolazi do porasta temperature, što je posledica intenzivnijeg trenja i većeg pritiska alata na osnovni materijal tokom zavarivanja.



Slika 108. Prikaz temperatura tokom procesa zavarivanja; a) uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3, d) uzorak 4 i e) uzorak 5

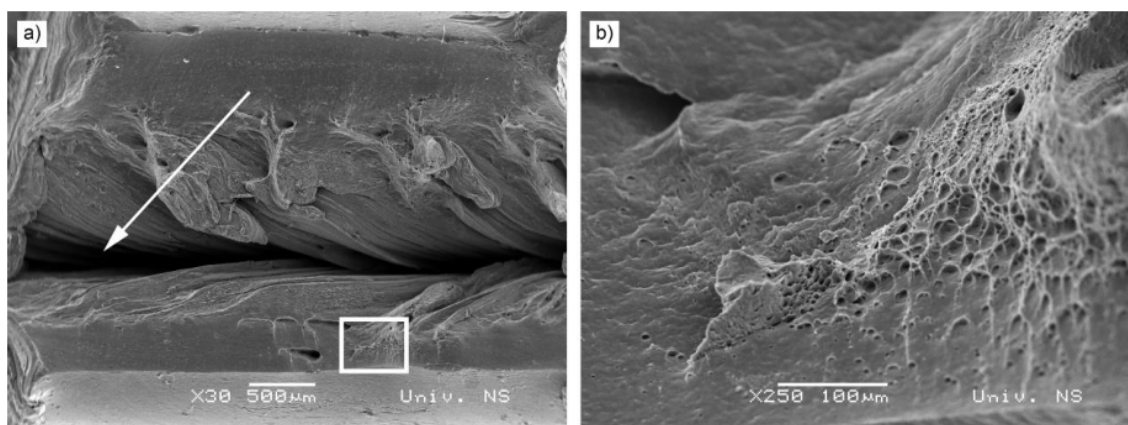
Sumirani grafički prikaz rezultata ispitivanja zatezanjem dat je na slici 109, dok su svi rezultati su dati u prilogu 2.1. Sa dijagrama na slici 109 se može konstatovati da uzorak 4 ima najveću vrednost zatezne čvrstoće što se pripisuje odsustvu tunela/crvotočine u zavarenom spoju, kao i finostrukturnoj strukturi zavarenog spoja. Manja interferencija (uzorci 1÷3) rezultuje nižom temperaturom procesa čime se postiže intenzivnije usitnjavanje zrna, a samim tim i povoljnije mehaničke osobine spoja. Kod uzorka 5, usled veće interferencije, dolazi do viših temperatura tokom procesa zavarivanja i izraženije rekristalizacije. To dovodi do formiranja krupnijeg zrna u ZUT-u, koje u kombinaciji sa prisutnim defektima (tunel/crvotočina) rezultuje smanjenjem

mehaničkih osobina zavarenog spoja. Uzorak 5 pokazuje najniže mehaničke karakteristike, usled prisustva tunela u strukturi spoja koji se i vidi na slici 106e.



Slika 109. Rezultati ispitivanja zatezanjem

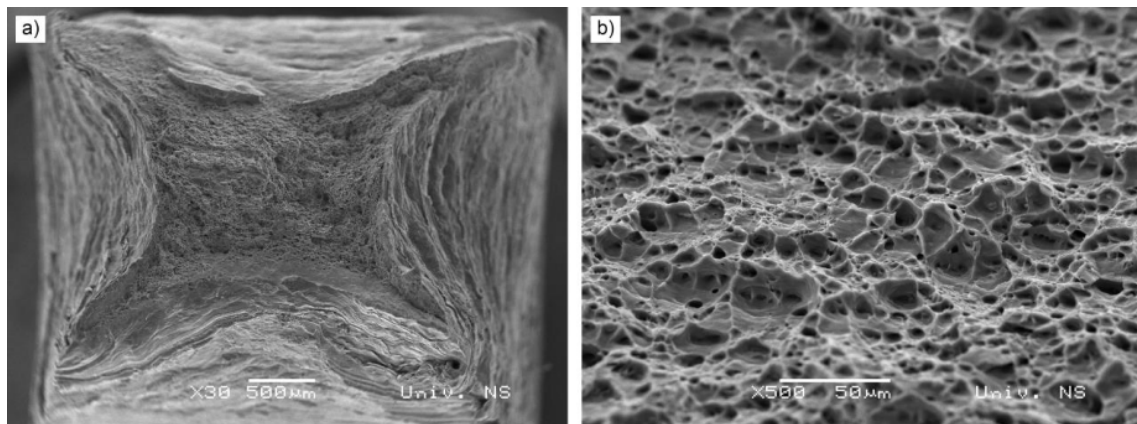
Nakon ispitivanja zatezanjem izvršena je analiza površina loma uzoraka pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Reprezentativni prikazi površina loma dati su na slikama 110 i 111.



Slika 110. Prikaz analize površine loma (uzorak 1, savijanje); a) makro (strelica pokazuje tunel); b) detalj označen sa belim kvadratom sa slike a

Na slici 110a prikazan je makroizgled površine loma uzorka 1 nakon ispitivanja savijanjem. Uočava se izražena plastična deformacija, naročito u zoni ivica uzorka i u blizini tunela, koji je označen belom strelicom. Na istoj slici naznačeno je mesto sa kog je snimljen detalj prikazan

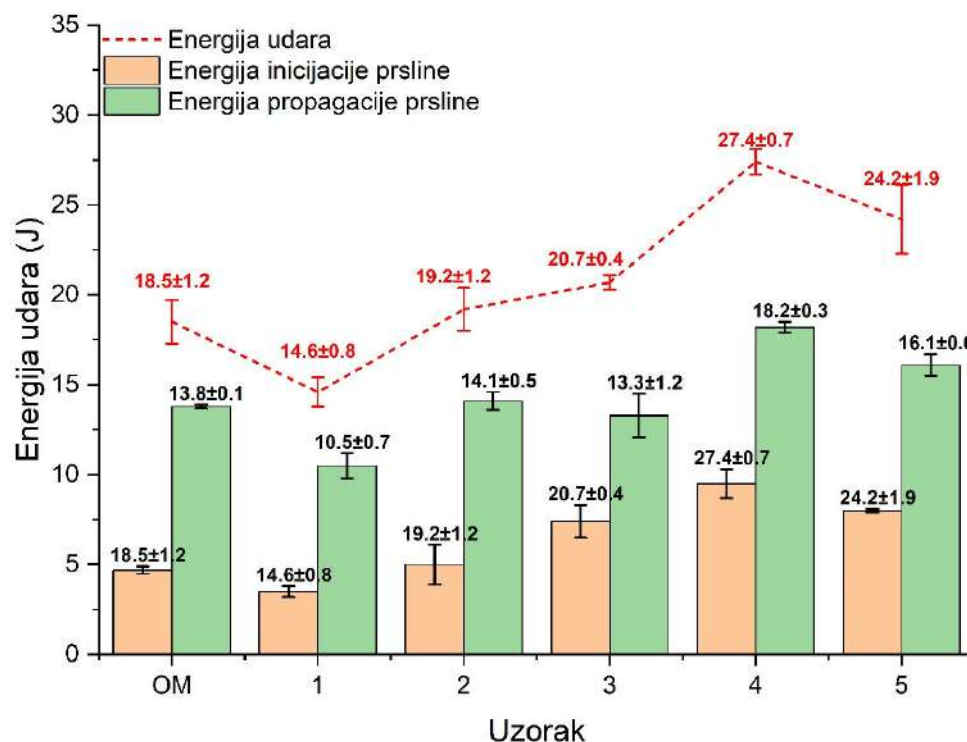
na slici 110b. Analizom površine loma uočava se duktilni karakter loma, sa izraženim jamicama nastalim usled koalescencije mikrošupljina.



Slika 111. Površina loma uzorka 4 (zatezanje). a) makro prikaz; b) jamičasta regija iz sredine uzorka

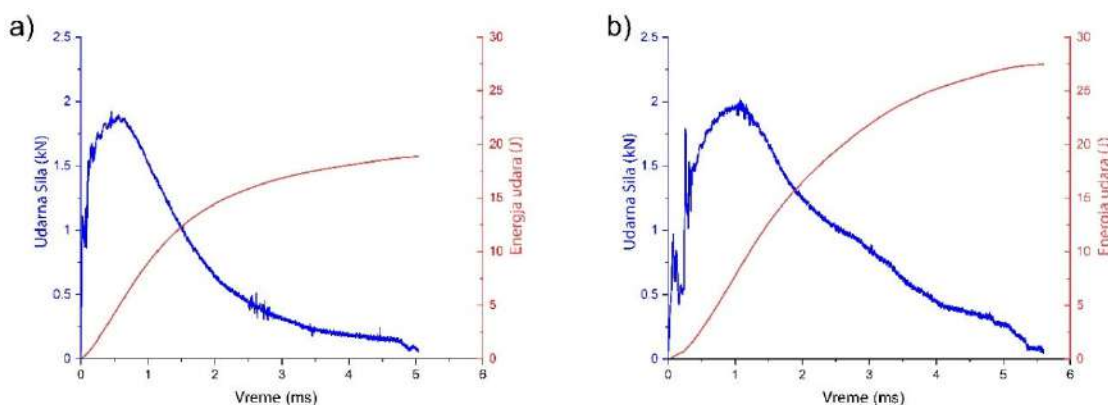
Na slici 111a prikazana je tipična površina loma u obliku slova X, koja je karakteristična za epruvete pravougaonog poprečnog preseka koje se ispituju zatezanjem. Na slici 111b je dat prikaz središnjeg dela površine loma na kojem se jasno uočava jamičasta morfologija, karakteristična za duktilni mehanizam loma.

Nakon ispitivanja zatezanjem, izvršeno je ispitivanje energije udara na instrumentiranom Šarpijevom klatnu. Rezultati ispitivanja su sumirani i grafički prikazani na slici 112 (svi rezultati su dati u prilogu 2.2).



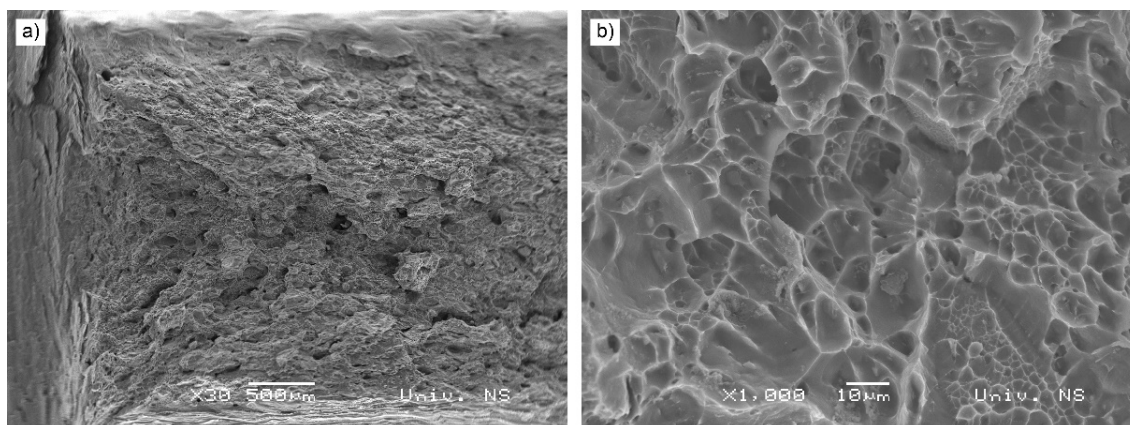
Slika 112. Rezultati ispitivanja energije udara

Analizom dijagrama (slika 112) može se zaključiti da uzorak 4 pokazuje najbolje vrednosti energije udara, što se pripisuje odsustvu tunela u zavarenom spoju. Zavareni uzorci imaju generalno bolje rezultate energije udara u odnosu na osnovni materijal, osim uzorka 1 koji ima nižu vrednost energije udara (usled prisustva tunela). Na slici 113 prikazani su dijagrami energije udara osnovnog materijala i zavarenog spoja uzorka 5. Dobijeni rezultati nalaze se u pozitivnoj korelaciji sa izraženim usitnjavanjem mikrostrukture u grumenu (zoni mešanja) u odnosu na osnovni materijal, što je prikazano na slici 107.

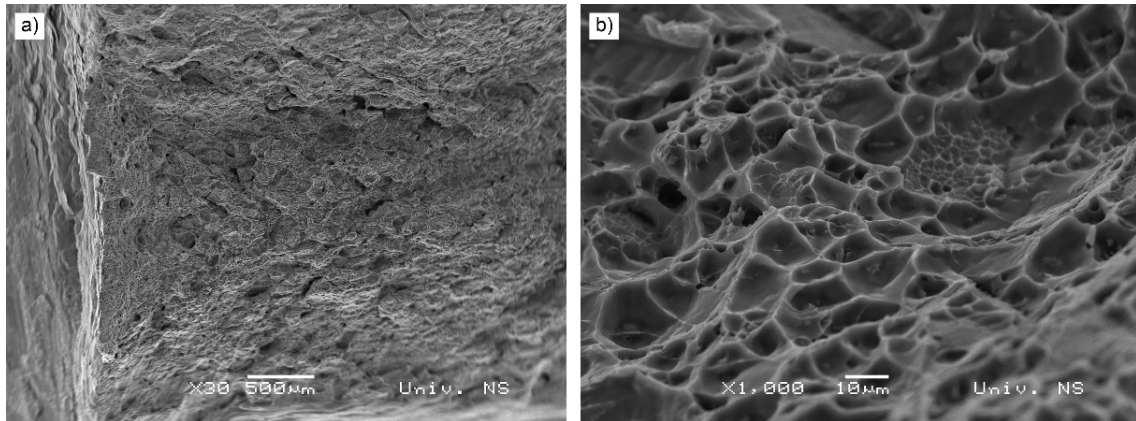


Slika 113. Dijagrami energije udara (a) osnovni materijal; (b) zavareni spoj (uzorak 5)

Nakon ispitivanja energije udara izvršena je SEM analiza površina loma Šarpijevih epruveta. Reprezentativni izgled površina loma dat je na slikama 114 i 115.



Slika 114. Površina loma Šarpijeve epruvete uzorka 1: a) makroizgled; b) jamičasta morfologija loma



Slika 115. *Površina loma Šarpijeve epruvete uzorka 4: a) makroizgled; b) jamičasta morfologija loma*

Na osnovu slika 114 i 115 može se zaključiti da površine loma ovih uzoraka imaju izraženu jamičastu morfologiju, što ukazuje na duktilni karakter loma epruveta. Međutim, poređenjem jamičastih regija, može se uočiti se da su jamice na uzorku 1 pliće u odnosu na jamice kod uzorka 4, što ukazuje na nižu duktilnost uzorka 1 što je u skladu sa literaturom [137,138]. Ovo je u skladu sa rezultatima prikazanim na dijagramu sa slike 112.

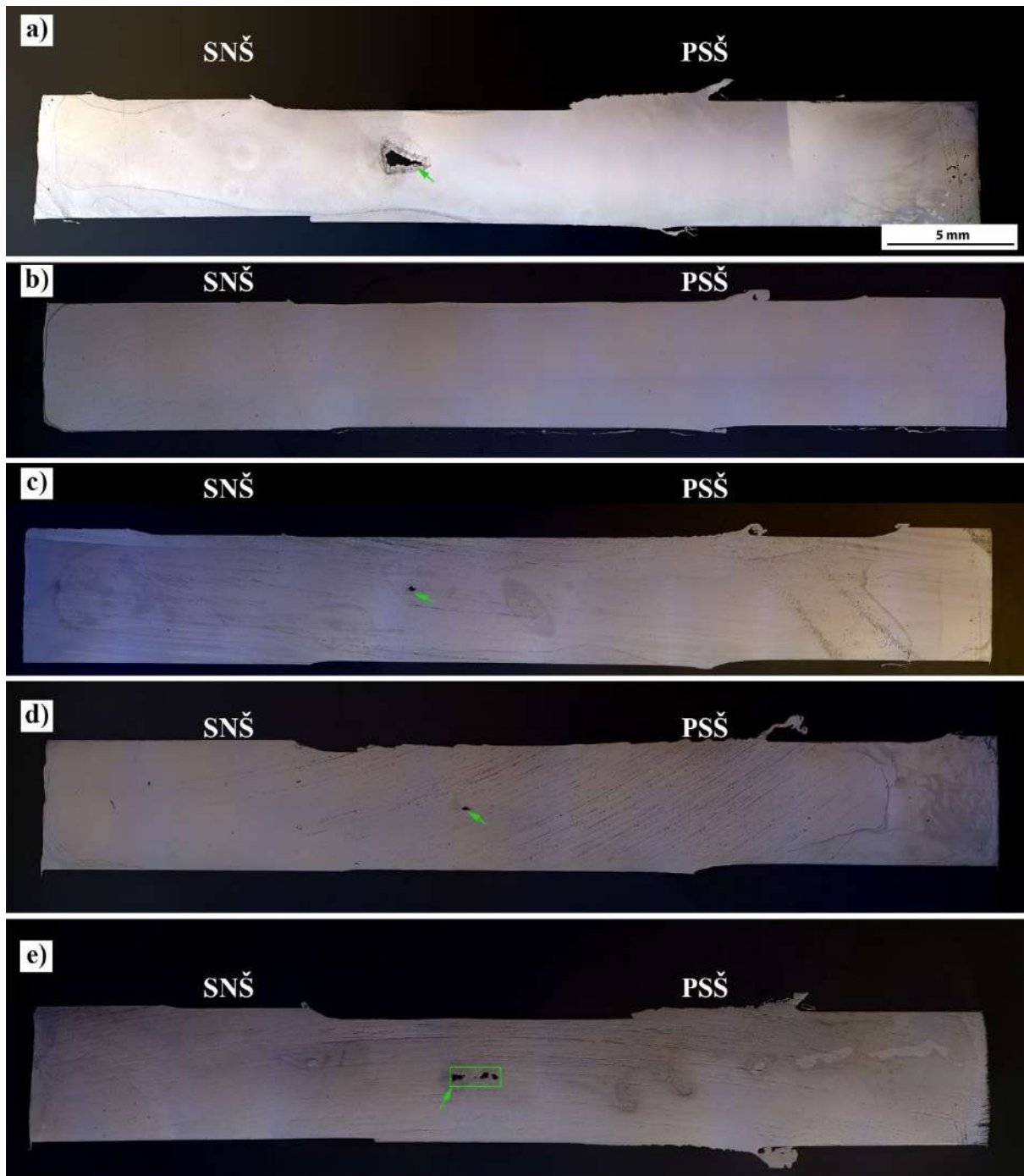
4.2.2. Sumiranje nalaza nakon drugog predeksperimenta

U predeksperimentu se posmatrao uticaj dimenzije međuramenog prostora na osobine zavarenog spoja. Utvrđeno je da smanjenje međuramenog prostora dovodi do porasta temperature tokom procesa zavarivanja, što za posledicu ima povećanje širine zavarenog spoja i rast veličine zrna. Najbolje mehaničke osobine ima uzorak 4 sa međuramenim prostorom od 4,8 mm, te je takva geometrija, tj. odnos međuramenog rastojanja i osnovnog materijala je usvojena za glavni eksperiment.

4.3. Rezultati glavnog eksperimenta

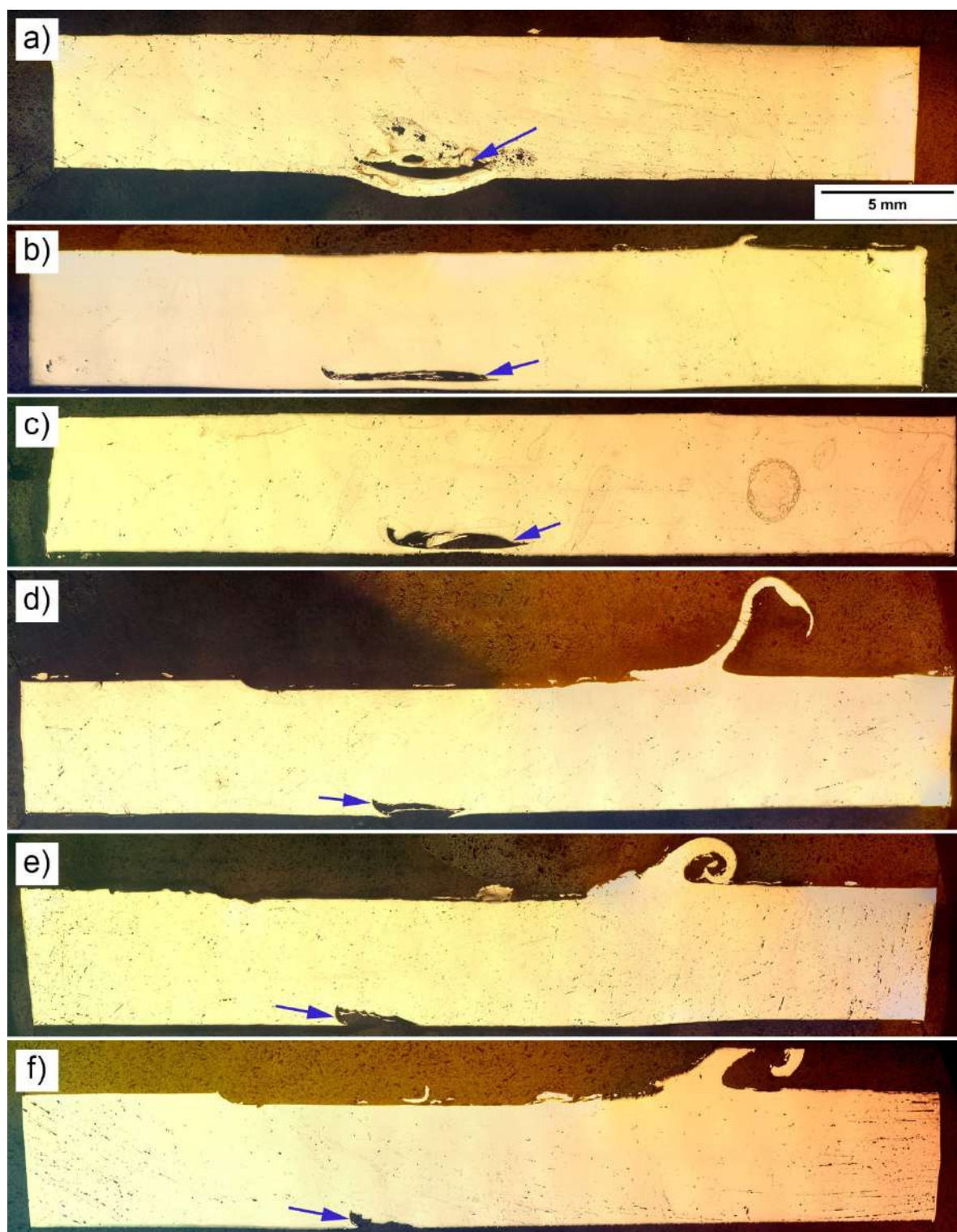
4.3.2. Rezultati metalografske analize

Na slici 116 prikazani su makro prikazi poliranih uzoraka zavarenih pomoću bobin alata, dok je na slici 117 prikazan makro prikaz poliranih spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata.



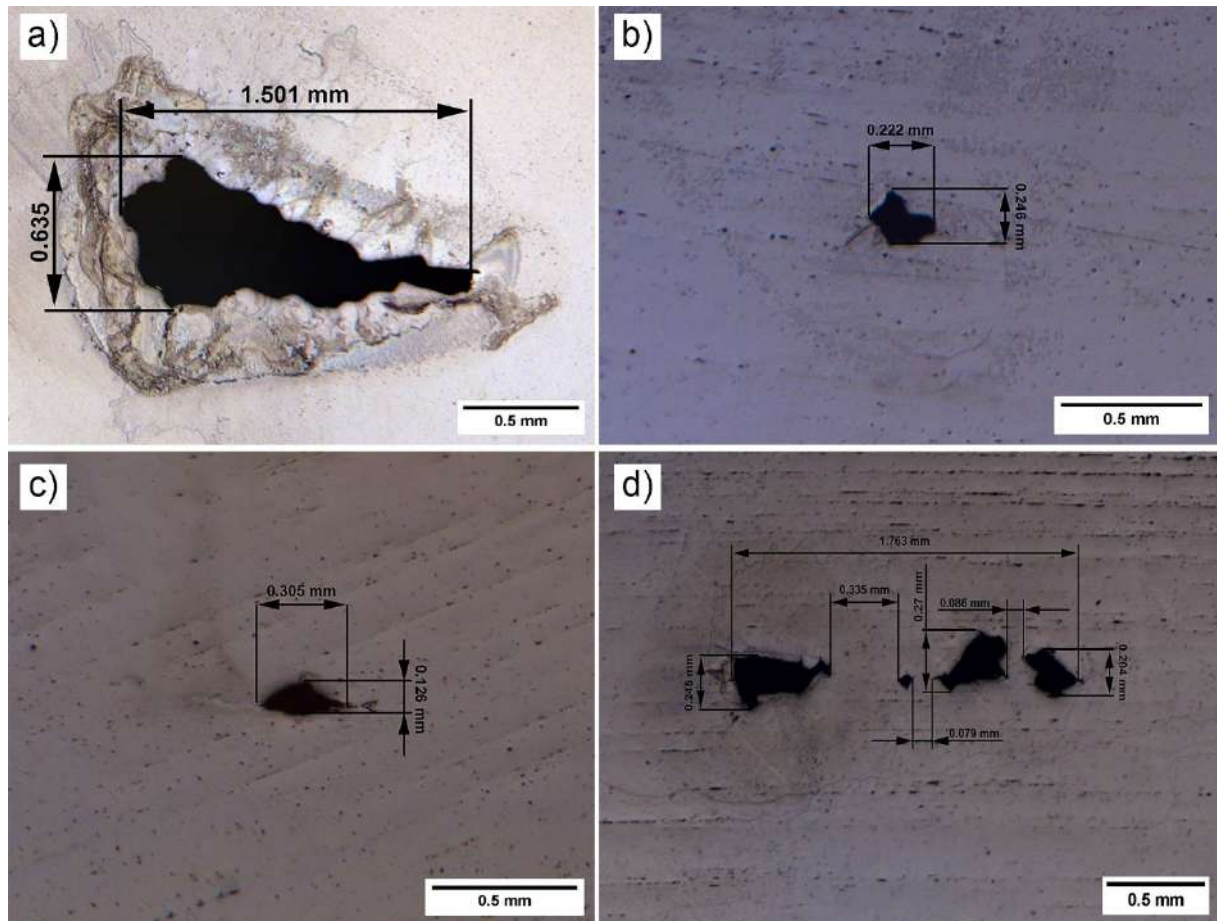
Slika 116. Makrostruktura poliranih poprečnih preseka zavarenih pomoću bobin alata (strelice pokazuju na tunele): a) BA 1.1; b) BA 1.2; c) BA 1.3; d) BA 2.1; e) BA 2.2.

Sa slike 116 se uočava da jedino uzorak BA 1.2 nema nikakve unutrašnje defekte, kao što su tunel ili crvotočina. Sa druge strane, svi ostali uzorci imaju zatvorene tunele. Zatvoreni tuneli se prevashodno nalaze na strani napredovanja šava.



Slika 117. Makro prikaz poliranih zavarenih spojeva pomoću konvencionalnog alata (tuneli su obeleženi plavim strelicama): a) KA 1.1; b) KA 1.2; c) KA 1.3; d) KA 2.1; e) KA 2.2; f) KA 2.3.

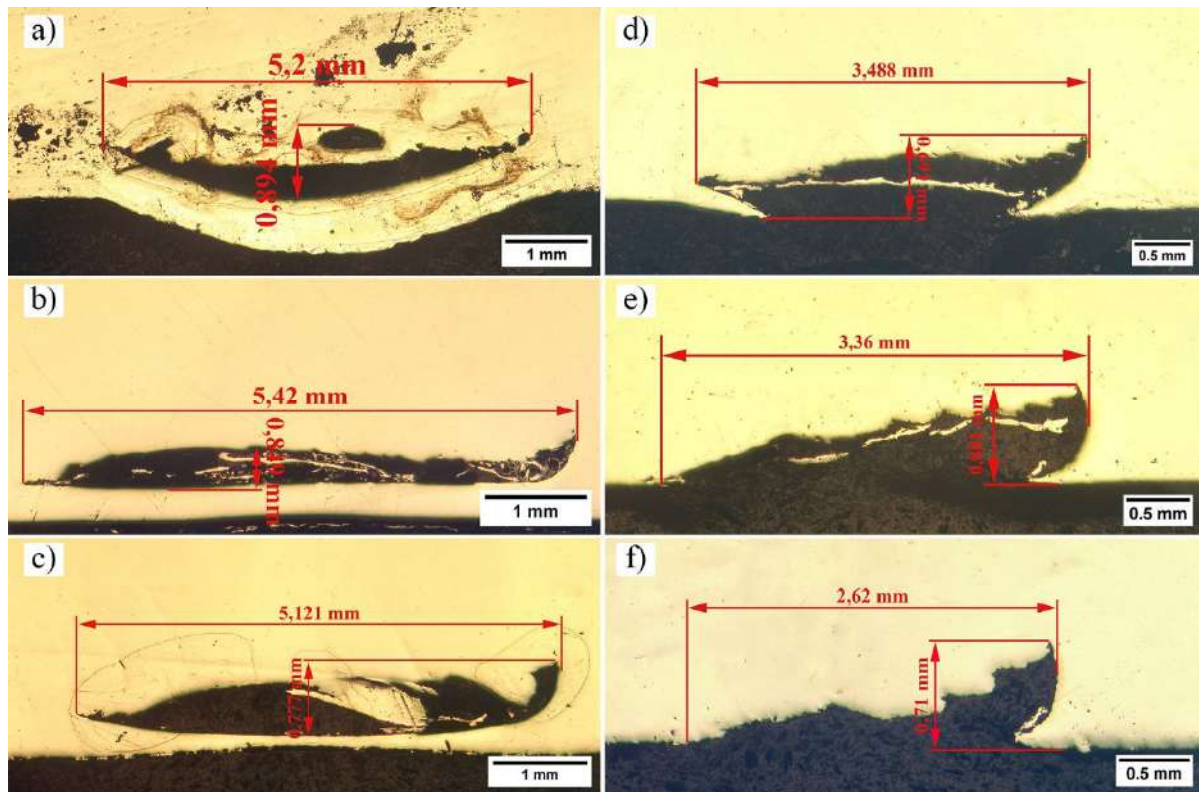
Analiza slike 117 ukazuje da svi uzorci imaju defekt u korenu zavora. Uzorci KA 1.1, KA 1.2 i KA 1.3 imaju zatvorene tunele, dok su kod uzoraka KA 2.1, KA 2.2 i KA 2.3 uočeni otvoreni tuneli. Pojedinačni prikazi defekata kod spojeva zavarenih pomoću bobin alata, sa prikazanim dimenzijama, dati su na slici 118.



Slika 118. Defekti u spojevima zavarenih pomoću bobin alata: a) BA 1.1; b) BA 1.3; c) BA 2.1; d) BA 2.2.

Analizom standarda ISO 25239-5:2021 [53] i rezultatima prikazanim na slici 118, konstatuje se da jedino uzorak BA 1.2 zadovoljava „B“ nivo prihvatljivosti prema kojem prisustvo tunela/crvotočina u zavarenom spoju nije dozvoljeno. Preostali uzorci kod kojih su uočeni defekti (BA 1.1, BA 1.3, BA 2.1 i BA 2.2) se ne mogu svrstati u „B“ nivo prihvatljivosti, ali mogu biti prihvatljivi prema „C“ nivou prihvatljivosti, jer dimenzije registrovanih defekata zadovoljavaju uslov $d \leq 0,2 \cdot s$, gde je d – najveća dimenzija tunela/crvotočine, s – debljina osnovnog materijala, odnosno uslov $d \leq 4$ mm, pri čemu se usvaja stroži od navedena dva kriterijuma.

Na slici 119 prikazani su pojedinačni defekti sa izmerenim dimenzijama kod spojeva zavarenih primenom konvencionalnog alata.

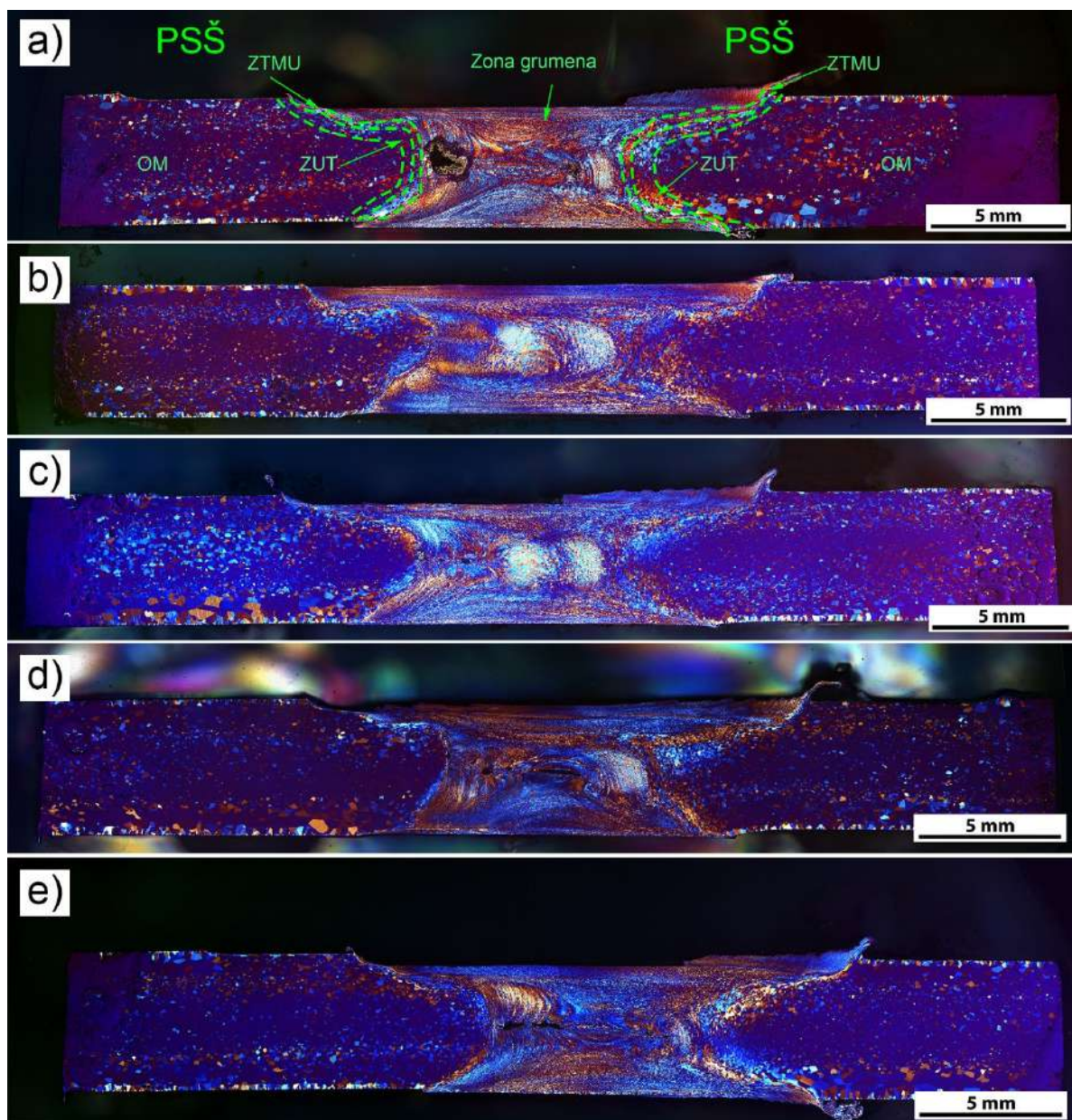


Slika 119. Defekti kod spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata: a) KA 1.1; b) KA 1.2; c) KA 1.3; d) KA 2.1; e) KA 2.2; f) KA 2.3.

Sa slike 119 uočavaju kotirani defekti u spojevima zavarenim pomoću konvencionalnog alata. Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati da veličina tunela pokazuje tendenciju smanjenja sa povećanjem brzine zavarivanja (pomaka), naročito pri većim brzinama obrtanja alata. Takođe, može se zaključiti da uzorci KA 1.1, KA 1.2 i KA 1.3 ne zadovoljavaju kriterijume prihvatljivosti za tunele prema standardu ISO 25239-5:2020 [53], dok preostali uzorci zadovoljavaju „B“ nivo prihvatljivosti zavarenog spoja.

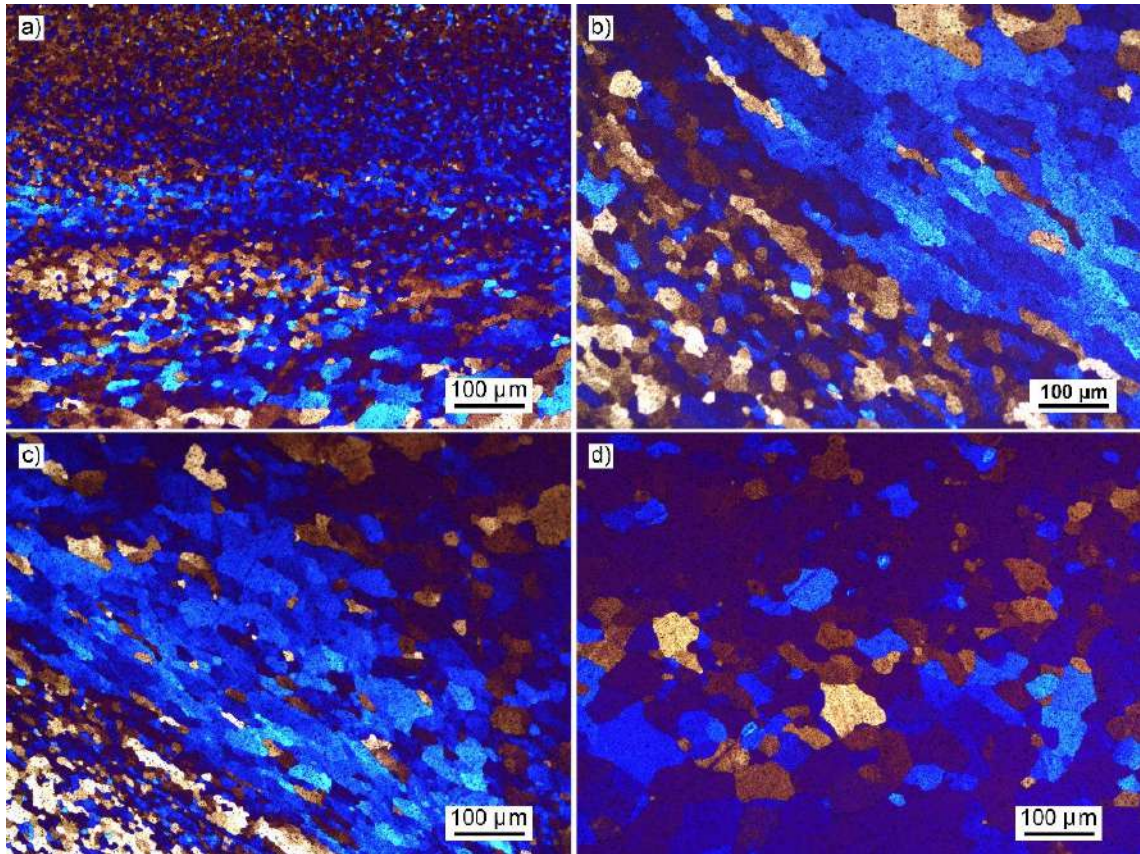
Sveukupno posmatrano, konvencionalni ZTM spojevi pokazuju prisustvo dominantno velikih tunela u korenu koji zauzimaju značajan deo poprečnog preseka i po svojim dimenzijama prevazilaze vrednosti očekivane za više nivoe kvaliteta prema standardu ISO 25239-5:2020 [53]. Nasuprot tome, bobin spojevi uglavnom sadrže izolovane ili relativno male tunele, znatno manjih dimenzija, pa se mogu svrstati u viši nivo kvaliteta u odnosu na konvencionalno zavarene spojeve, uz napomenu da uzorak BA 1.1 predstavlja najkritičniji slučaj u okviru bobin serije zavarenih spojeva.

Na slici 120 je dat makro prikaz zavarenih spojeva zavarenih pomoću bobin alata nakon elektrolitičkog nagrizanja uzoraka.



Slika 120. Makro prikaz nagriženih spojeva zavarenih pomoću bobin alata; a) BA1.1; b) BA 1.2; c) BA 1.3; d) BA 2.1; e) BA2.2.

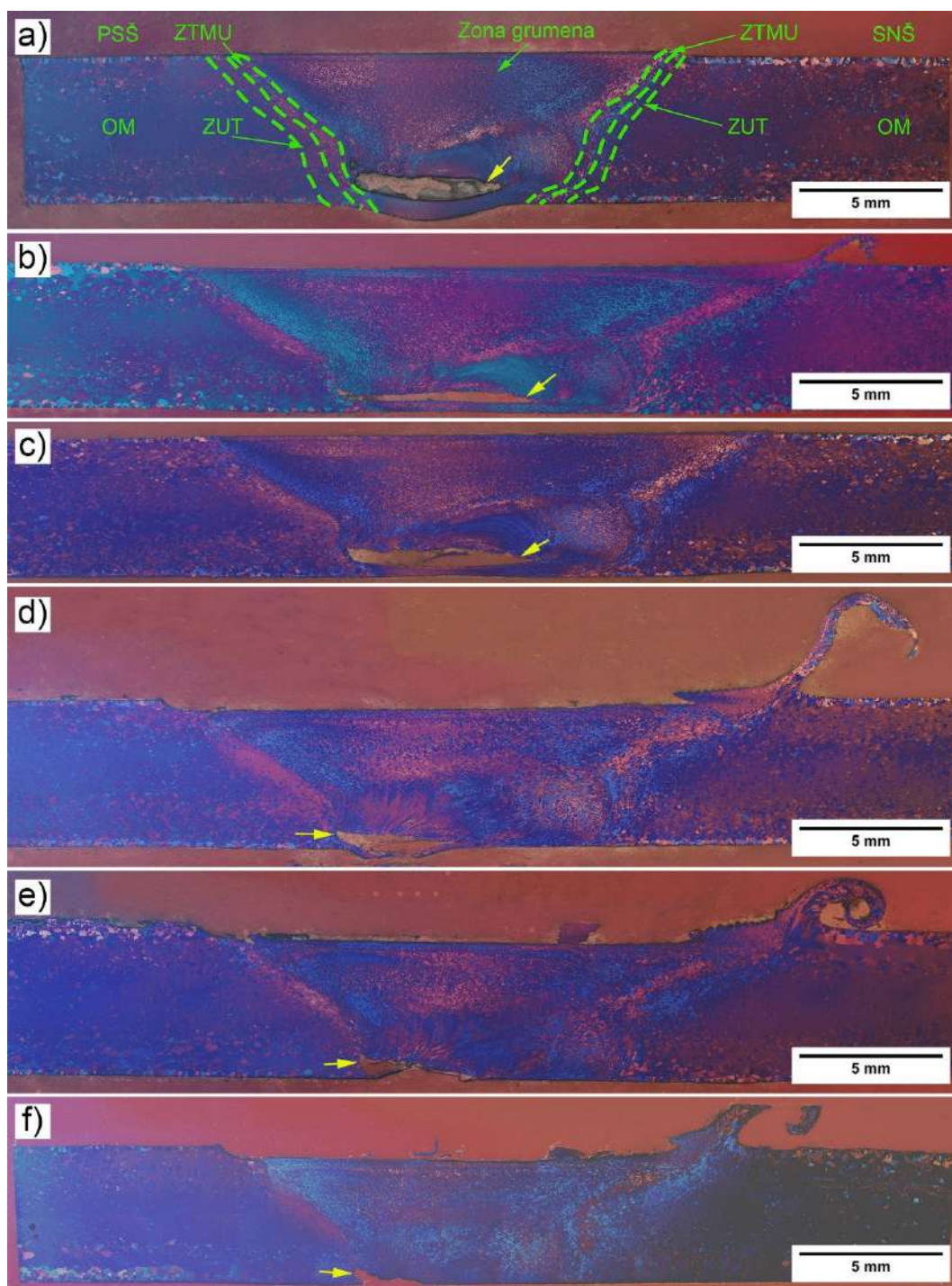
Uvidom u sliku 120, uočava se da makrostruktura spojeva ima karakterističan profil peščanog sata, koji je morfološki podeljen na sledeće karakteristične regije: zona grumena u središnjem delu spoja, zona termo-mehaničkog uticaja, zona uticaja toplote i osnovni materijal. Pojedinačne mikrostrukture grumena prikazane su na slici 121.



Slika 121. *Prikaz pojedinačnih struktura spoja (uzorak BA 1.2) zavarenog pomoću bobin: a) grumen; b) prelaz iz grumena u TMZU; c) prelaz iz TMZU u ZUT i d) osnovni materijal*

Na slici 121a uočava da grumen (zona mešanja) ima izraženu sitnozrnu mikrostrukturu, nastalu usled intenzivne plastične deformacije i dinamičke rekristalizacije tokom procesa zavarivanja što ukazuje na mogućnost poboljšanja mehaničkih svojstava. Granice zrna su jasno definisane, a struktura je homogena, bez vidljivih pora i makrostrukturnih nehomogenosti, što ukazuje na kvalitetno formiran grumen. Jasan prelaz iz grumena u zonu termo-mehaničkog uticaja (ZTMU) prikazan je na slici 121b. Prelaz iz sitnozrne strukture grumena u deformisana i izdužena zrna karakteristična za ZTMU. Izdužen oblik zrna predstavlja posledicu intenzivne plastične deformacije i delimične rekristalizacije u ovoj oblasti. Na slici 121c prikazana je prelazna oblast između ZTMU i zone uticaja toplote (ZUT). U donjem delu se uočavaju blago izdužena zrna iz ZTMU, dok prema gornjem delu slike dominiraju nešto krupnija i „globularnija“ zrna. Na slici 121d prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala. Zrna su приметно krupnija i homogenije raspoređena u odnosu na zonu mešanja, što je karakteristično za početno stanje materijala pre procesa zavarivanja.

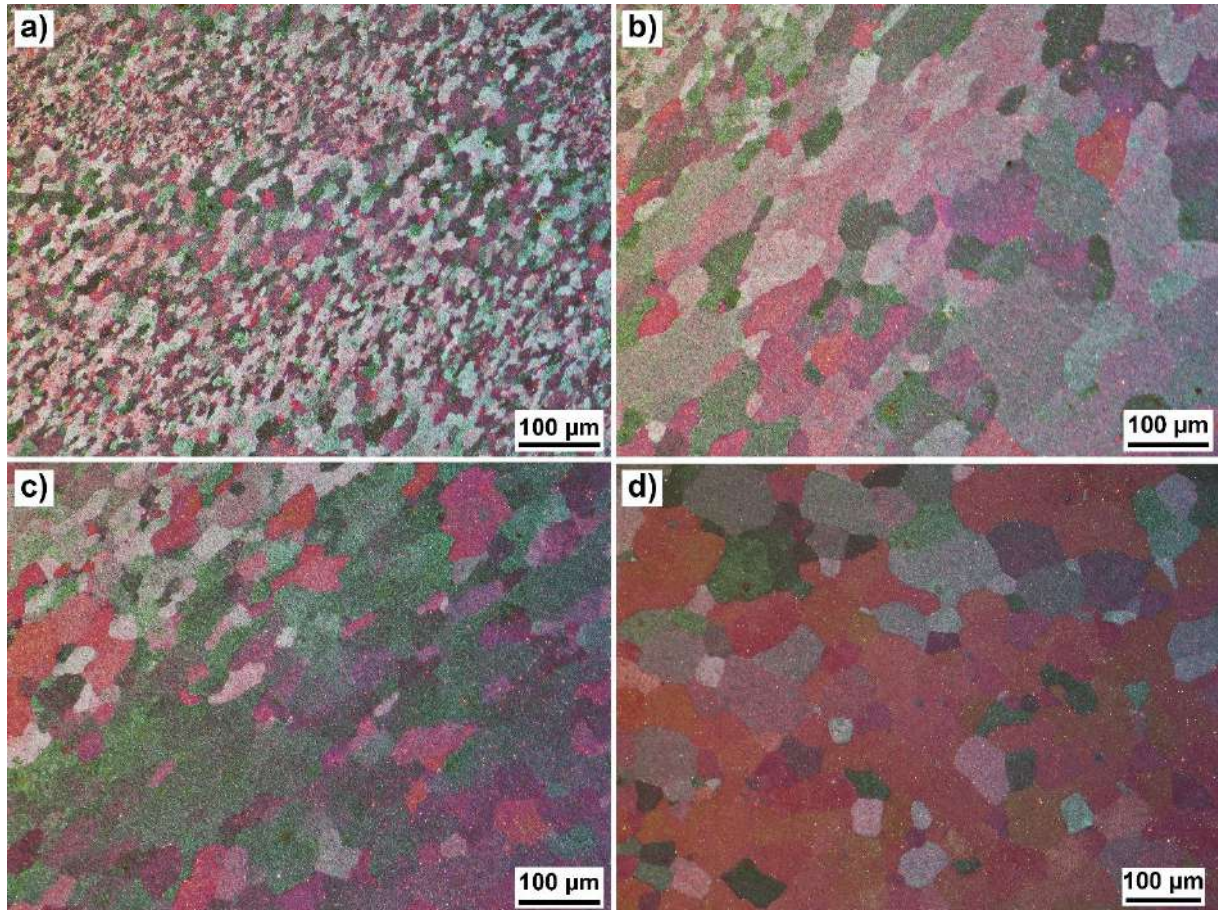
Na slici 122 date su makrostrukture zavarenih spojeva pomoću konvencionalnog alata.



Slika 122. Makro prikaz nagriženih spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata (žutim strelicama su označeni tuneli); a) KA1.1; b) KA 1.2; c) KA 1.3; d) KA 2.1; e) KA2.2.; f) KA2.3

Prvo što se može uočiti na slici 122 je da svi zavareni spojevi imaju karakterističan profil šava u obliku latiničnog slova V, što je uobičajeno za spojeve zavarene konvencionalnim postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Na slici 122a obeleženi su prelazi iz zone grumena (zone

mešanja) u zonu termo-mehaničkog uticaja, zatim u zonu uticaja toplote i na kraju u osnovni materijal. Pored toga, na svim uzorcima su prisutni i tuneli (označeni žutim strelicama). Na slici 123 su prikazane su karakteristične mikrostrukture spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata.



Slika 123. Prikaz pojedinačnih struktura spoja (uzorak KA 1.2) zavarenog pomoću ZTM postupka: a) grumen; b) prelaz iz grumena u TMZU; c) prelaz iz TMZU u ZUT i d) osnovni materijal

Analiziranjem slike 123 se konstatuje da regije zavarenih spojeva imaju mikrostrukturu sličnu mikrostrukturi spojeva zavarenih pomoću dvostranog (bobin) alata. Sitnija zrna su prisutna u zoni grumena, dok se u zoni termo-mehaničkog uticaja (ZTMU) i zoni uticaja toplote (ZUT) uočavaju izdužena i krupnija zrna. Zrna u ZUT su nešto veća u odnosu na zrna u ZTMU. Nakon metalografske analize određena je prosečna veličina zrna metodom linearnog preseka, prema standardu ASTM E112-25 [136] za regije grumena, ZTMU i ZUT. Rezultati su prikazani u tabeli 11.

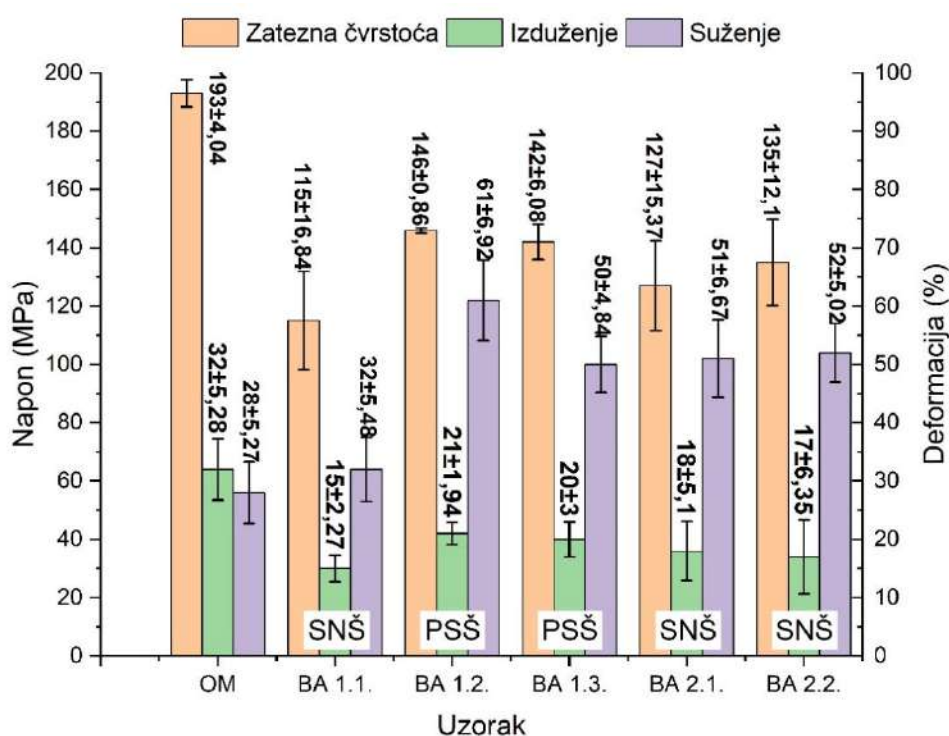
Tabela 11. Prosečna veličina zrna prema ASTM E112-25 [136]

	Grumen		ZTMU		ZUT	
	Veličina zrna G	Prosečan prečnik [μm]	Veličina zrna G	Prosečan prečnik [μm]	Veličina zrna G	Prosečan prečnik [μm]
BA 1.2	10	11,2	8,5	19,9	7,5	26,7
KA 1.3	9,5	13,3	8	22,5	7,5	26,7

Na osnovu podataka iz tabele 11 se može konstatovati da je kod oba tipa alata slična raspodela veličine zrna kroz zavareni spoj. Drugim rečima, rezultati pokazuju da oba postupka zavarivanja dovode do formiranja znatno sitnijih zrna u zoni grumena u odnosu na ZTMU i ZUT, pri čemu je porast veličine zrna od grumena ka ZUT-u umeren. Kod uzorka dobijenog bobin alatom (BA1.2) dobijena su nešto sitnija zrna u grumenu i ZTMU u poređenju sa uzorkom zavarenim konvencionalnim alatom (KA1.3).

4.3.3 Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika

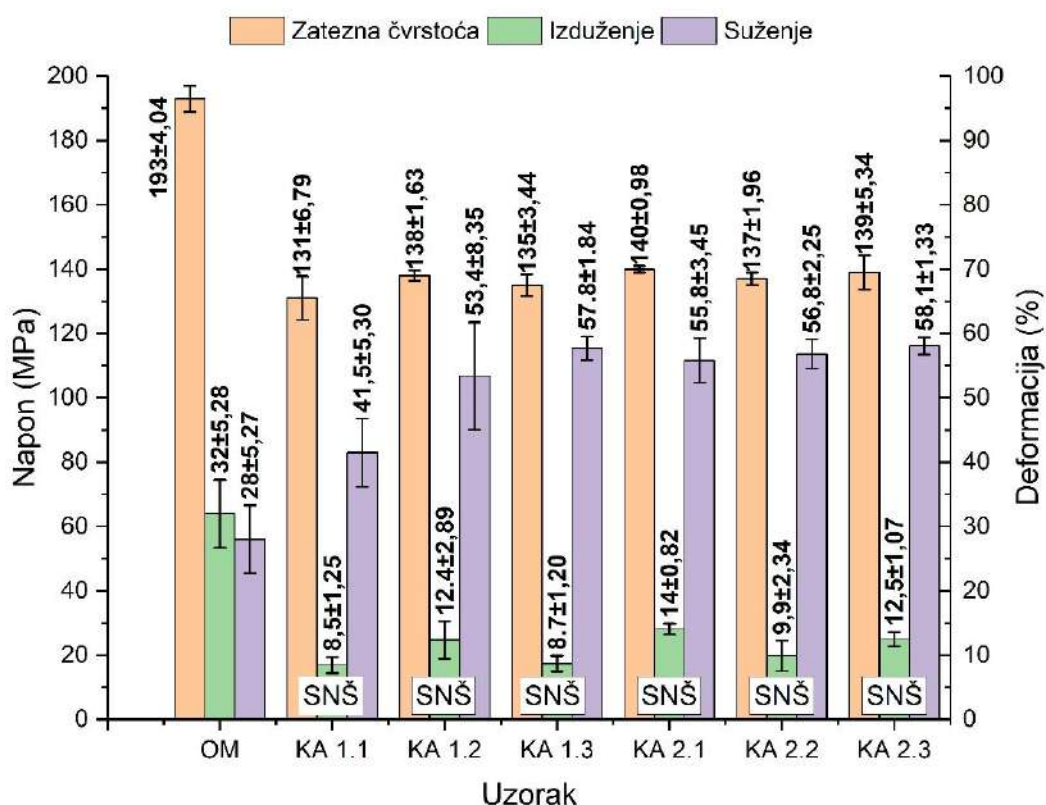
Rezultati ispitivanja zateznih svojstava spojeva zavarenih pomoću bobin alata grafički su prikazani na slici 124 (dok su svi rezultati dati u prilogu 3.1).

**Slika 124.** Rezultati ispitivanja zatezanjem uzoraka zavarenih pomoću bobin alata

Sa slike 124 se vidi da zavareni spojevi imaju manju zateznu čvrstoću u odnosu na osnovni materijal. Međutim vrednosti procentualnog suženja su i dalje relativno visoke u poređenju sa

osnovnim materijalom. Lom tokom ispitivanja najčešće se javljao sa povratne strane šava (SNS), što se može dovesti u vezu sa prisustvom tunela u toj regiji. Može se konstatovati da su tuneli delovali kao koncentratori napona i time pogodovali iniciranju loma. Takođe se uočava značajno smanjenje procentualnog izduženja u odnosu na osnovni materijal.

Na slici 125 su sumirano i grafički prikazani rezultati ispitivanja (prilog 3.2) zatezanjem spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata. Kod spojeva zavarenih konvencionalnim alatom uočava se sličan trend. Zatezna čvrstoća svih zavarenih uzoraka niža je u odnosu na zateznu čvrstoću osnovnog materijala.



Slika 125. Rezultati ispitivanja zatezanjem uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata

Ono što se dodatno uočava sa dijagrama na slici 125 je da je suženje preseka mnogo manje u odnosu na osnovni materijal.

Na osnovu dijagrama sa slika 124 i 125, primećuje se da oba postupka ZTM dovode do sličnog nivoa zatezne čvrstoće (uglavnom između 130 i 145 MPa), ali da bobin alat pokazuje nešto više mehaničke osobine. Daljom analizom dijagrama uočava se da je najuspešniji uzorak zavaren bobin alatom BA1.2. On ima veću zateznu čvrstoću od najuspešnijeg uzorka zavarenog konvencionalnim alatom KR2.1. U isto vreme, izduženje i suženje su takođe veće kod uzorka BA1.2 zavarenog bobin alatom. Kod svih uzoraka lom se javio sa strane napredovanja šava u osnovnom materijalu, što ukazuje na dobar kvalitet zavarenih spojeva i činjenicu da zona zavarivanja nije predstavljala najslabije mesto spoja.

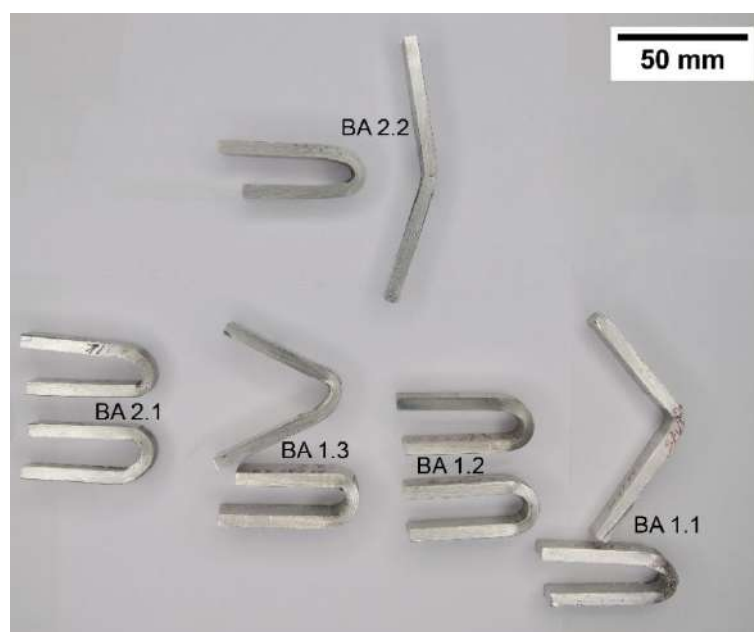
4.3.4 Rezultati ispitivanja savijanjem

Rezultati ispitivanja uzoraka zavarenih pomoću bobin alata, savijanjem u tri tačke, preko lica i korena, dati su u tabeli 12. Savijanje je vršeno u dva koraka: do ugla od 90° i do ugla od 180° uz vizuelno praćenje pojave prsline na površini uzoraka.

Tabela 12. Rezultati ispitivanja savijanjem spojeva zavarenih pomoću bobin alata

Oznaka	Pozicija	Savijanje do ugla 90°	Savijanje do ugla 180°
BA 1.1	Lice	Bez pojave prsline	175° – Bez loma
	Koren	73°	Bez loma
BA 1.2	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
BA 1.3	Lice	Bez pojave prsline	132° – Bez loma
	Koren	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
BA2.1	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
BA 2.2	Lice	19°	Bez loma
	Koren	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline

Posmatranjem rezultata iz tabele 12 se može uočiti da prilikom savijanja preko lica spoja svi uzorci pokazuju vrlo povoljno ponašanje i da se kod uzorka BA1.1 i BA 1.3 pojavila prsline pri uglu od 175° i 132° respektabilno, ali je dalje savijanje do ugla od 180° prošlo bez loma materijala. Savijanje sa strane korena kod spojeva zavarenih bobin alatom dodatno naglašava prednosti ove konfiguracije alata u pogledu kvaliteta formiranja i zatvaranja korena zavara u pogledu integriteta korena zavara. Prsline se manifestovala kod uzorka BA1.1 i BA2.2 pri uglu od 73° i 19° respektabilno. Prikaz ispitanih uzoraka je dat na slici 126.



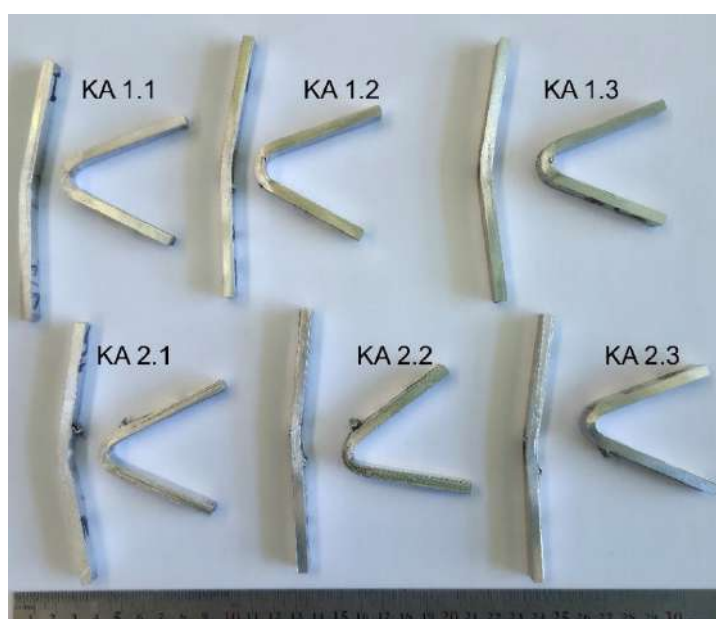
Slika 126. Sojevi zavareni pomoću bobin alata ispitani savijanjem

Rezultati savijanja epruveta zavarenih pomoću konvencionalnog alata su takođe prikazani u tabeli 13.

Tabela 13. *Rezultati ispitivanja savijanjem spojeva zavarenih pomoću konvenc. alata*

Oznaka	Pozicija	Savijanje do ugla 90°	Savijanje do ugla 180°
KA 1.1	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	16,9°	Bez loma
KA 1.2	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	12,7°	Bez loma
KA 1.3	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	12,9°	Bez loma
KA 2.1	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	20°	Bez loma
KA 2.2	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	9,5°	Bez loma
KA 2.3	Lice	Bez pojave prsline	Bez pojave prsline
	Koren	10,8°	Bez loma

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 13 može se zaključiti da spojevi pri savijanju sa strane lica zavara pokazuju zadovoljavajuće ponašanje. Ovakvi rezultati ukazuju na to da je gornja površina spoja, na koju direktno utiče rame alata, dobro konsolidovana i bez izraženih površinskih defekata. Međutim, pri savijanju sa strane korena zavara uočava se znatno nepovoljnije ponašanje. Kod svih spojeva zavarenih konvencionalnim alatom registrovana je pojava prsline već pri malim uglovima savijanja tokom ispitivanja do 90°, što ukazuje na prisustvo defekata ili nedovoljnu konsolidaciju u oblasti korena zavara. Ipak, svi uzorci uspešno su savijeni do ugla od 180° bez pojave potpunog loma, što se može videti na slici 127. Prikaz ispitanih uzoraka dat je na slici 127.

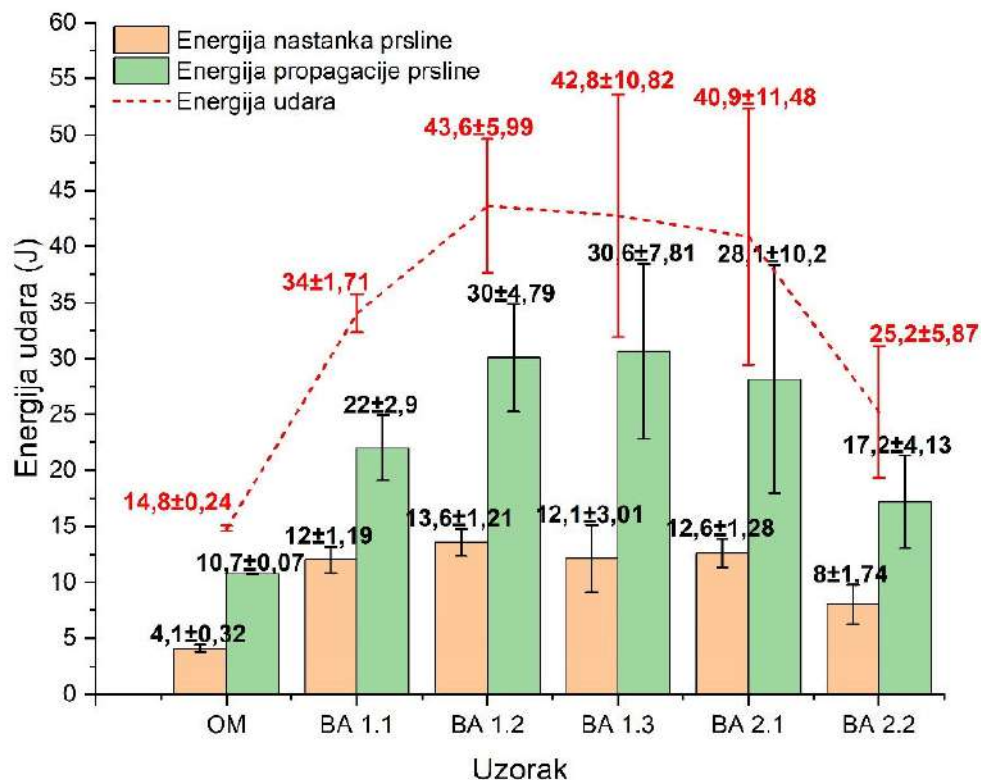


Slika 127. *Konvencionalno ZTM zavareni uzorci*

Na osnovu podataka prikazanih u tabelama 12 i 13 može se konstatovati da se pri ispitivanju savijanjem uzoraka zavarenih pomoću bobin alata prslina pojavila kod tri uzorka, ali bez pojave loma epruvete pri savijanju do ugla od 180° . Kod uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata pojava prslina na korenu zavora registrovana je kod svih uzoraka, pri čemu je najveći ugao do pojave prve prsline zabeležen kod uzorka KA2.1. Uporednom analizom rezultata može se zaključiti da bobin alat obezbeđuje znatno povoljnije karakteristike pri savijanju, naročito u pogledu integriteta korena zavora. Kod spojeva zavarenih konvencionalnim alatom prslina se inicira već pri malim uglovima savijanja preko korena, uglavnom pri uglovima manjim od 20° , dok se spojevi zavareni bobin alatom mogu savijati do uglova od 90° i 180° bez vidljivih prslina, sa izuzetkom uzorka BA1.1 kod kojeg je metalografskom analizom potvrđeno prisustvo tunelskog defekta. Dobijeni rezultati u potpunosti su u saglasnosti sa rezultatima metalografske analize.

4.3.5 Rezultati ispitivanja energije udara

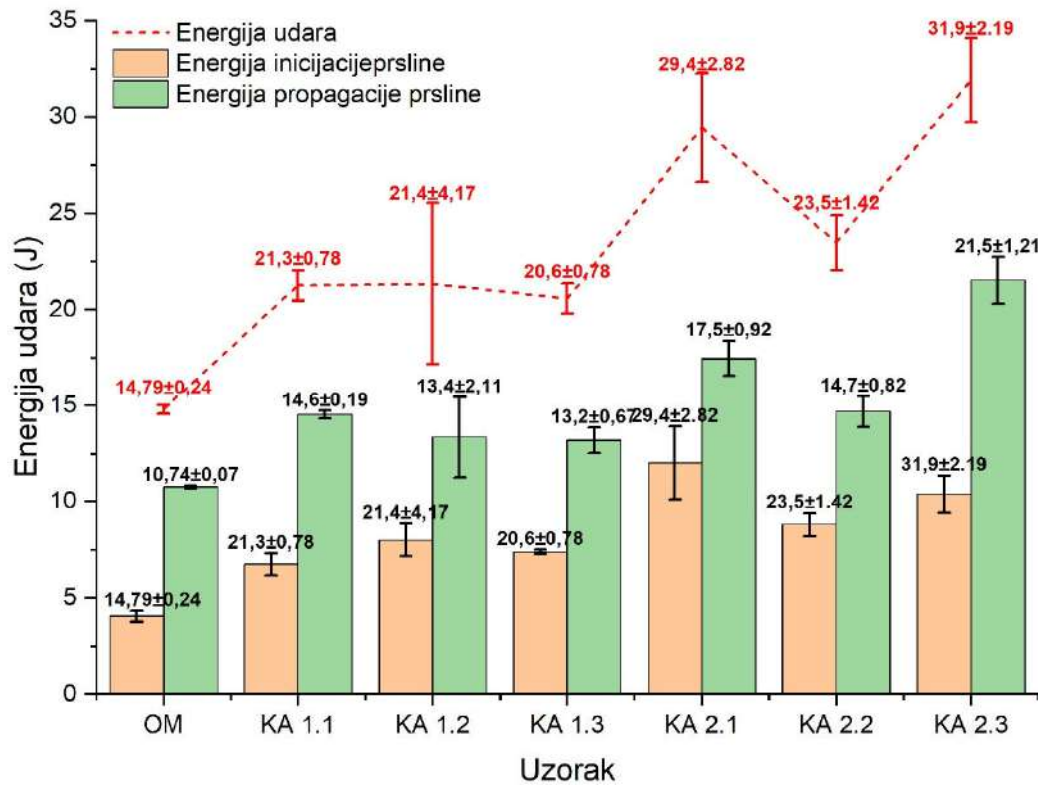
Rezultati energije udara za uzorke zavarene pomoću bobin alata (prilog 3.3) su grafički prikazani na slici 128, a rezultati energije udara za uzorke zavarene pomoću konvencionalnog ZTM postupka (prilog 3.4) grafički su sumirani na slici 129.



Slika 128. Rezultati energije udara uzoraka zavarenih pomoću bobin alata

Na osnovu rezultata prikazanih na dijagramu sa slike 128, može se konstatovati da svi zavareni uzorci imaju veću energiju udara u odnosu na osnovni materijal, pri čemu najveće vrednosti energije udara pokazuju uzorci BA 1.2 i BA 1.3. Sa slike 129 se može videti da spojevi zavareni

konvencionalnim alatom takođe imaju veću energiju udara u poređenju sa osnovnim materijalom, dok najbolje udarne karakteristike pokazuje uzorak KR2.3, a zatim uzorak KR2.1. Na dijagramu se vidi da kod većine spojeva zavarenih pomoću bobin alata, energija širenja prsline iznosi oko dve trećine ukupne energije udara. To ukazuje da nakon nastanka prsline spoj pruža značajan otpor njenom daljem širenju, što je u skladu sa prisustvom relativno malog broja i zapremine defekata u zavarenom spoju.



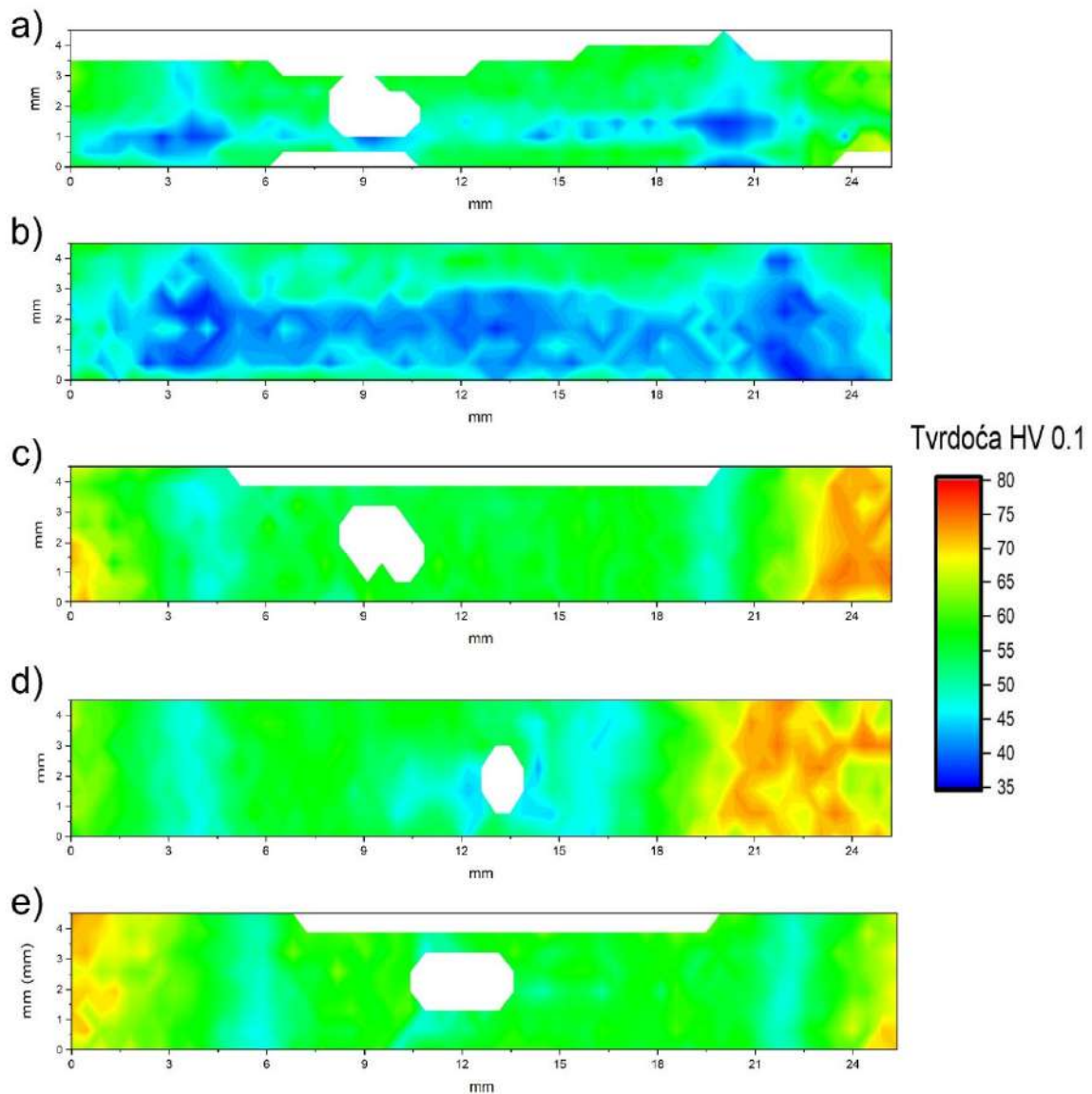
Slika129. Rezultati energije udara uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata

Kod spojeva zavarenih konvencionalnim alatom (slika 129, dijagram je izrađen na osnovu rezultata datih u prilogu 3.4) registrovane su vrednosti ukupne energije udara više od vrednosti osnovnog materijala, ali značajno niže u odnosu na spojeve zavarene bobin alatom. Ovako dobijena raspodela energije udara može se dovesti u vezu sa prisustvom zapreminskih defekata u korenu zavora.

4.3.6 Rezultati mapiranja mikrotvrdoće

Rezultati mapiranja tvrdoće zavarenih spojeva zavarenih pomoću bobin alata su dati u prilogima 4.1÷4.5. Grafički prikaz mapiranja tvrdoće je dat na slici 130. Mape mikrotvrdoće uzoraka zavarenih pomoću bobin alata odlikuju se izrazito homogenim vertikalnim profilom, što je u skladu sa simetričnim unosom toplote koji je karakterističan za ovu konfiguraciju alata. Pošto je bobin alat istovremeno u kontaktu sa gornjom i donjom površinom materijala, dolazi do ravnomernije raspodele toplote kroz čitav presek spoja, odnosno do formiranja približno simetričnih termičkih gradijenata. Na taj način smanjuju se razlike u razvoju mikrostrukture između površinskih i unutrašnjih zona materijala. Kod svih analiziranih uzoraka registrovan je očekivani pad mikrotvrdoće u neposrednoj blizini šava, što je posledica procesa rekristalizacije

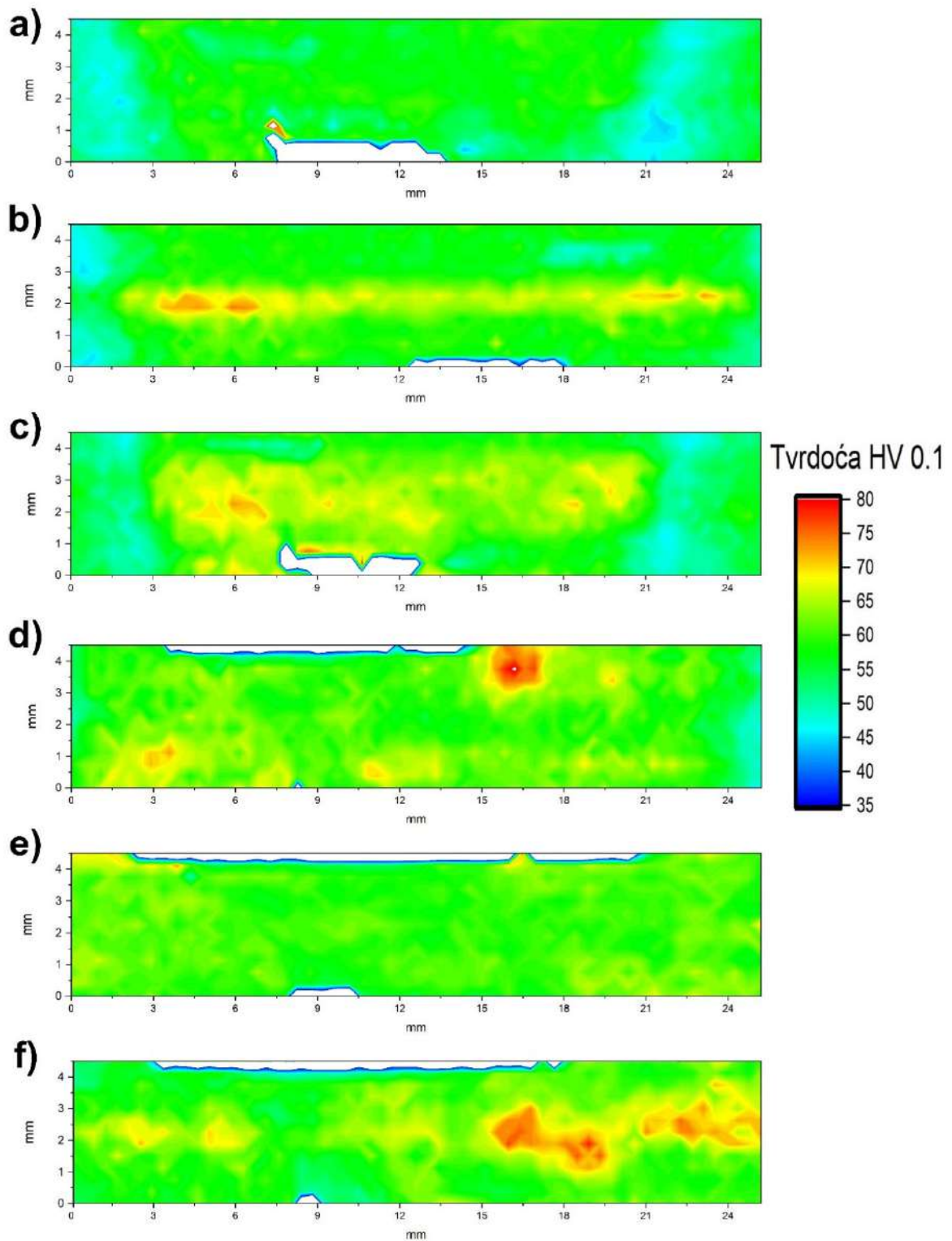
u zoni mešanja, kao i termičkog omekšavanja u ZTMU i ZUT-u. Ipak, raspodela tvrdoće ostaje relativno homogena i kontinuirana, bez naglih promena vrednosti i bez izražene asimetrije karakteristične za lokalne nestabilnosti procesa. U perifernim zonama preseka, udaljenim od oblasti tunelskih defekata, kod pojedinih uzoraka uočene su blago povećane vrednosti tvrdoće, koje se mogu pripisati deformacionom ojačavanju i ograničenom delovanju toplotnog ciklusa.



Slika 130. Mape tvrdoće zavarenih spojeva pomoću bobin alata: a) BA 1.1; b) BA 1.2; c) BA 1.2; d) BA 2.1; e) BA 2.2.

Rezultati mapiranja tvrdoće spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata su dati u prilogima 5.1÷5.6. Grafička interpretacija mapiranja mikrotvrdoće je sumirano prikazana na slici 131. Na osnovu pomenute slike se može konstatovati da raspodela mikrotvrdoće kod spojeva zavarenih konvencionalnim ZTM alatom pokazuje značajno drugačiji karakter u poređenju sa uzorcima zavarivanja bobin alatom. Kod konvencionalno ZTM zavarenih uzoraka prisutna je izražena asimetrija tvrdoće između strane napredovanja šava i povratne strane šava, što je posledica neravnomerne raspodele toplote i ekscentričnog delovanja zone mešanja. U

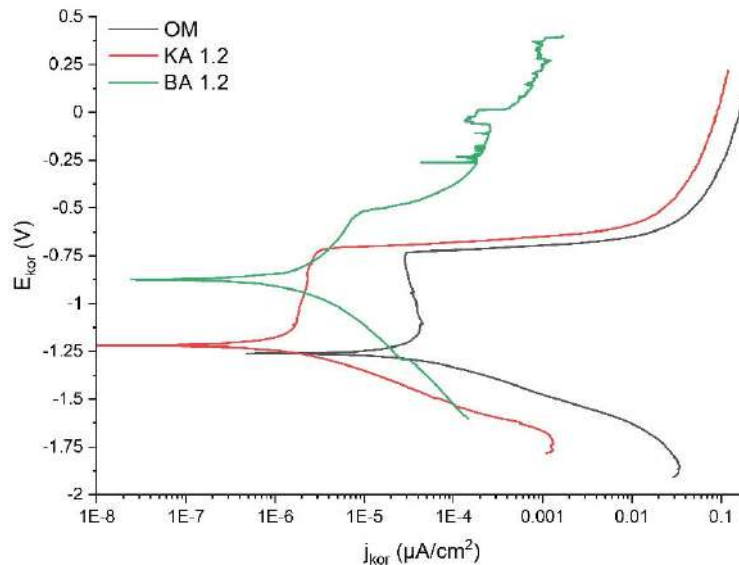
svim mapama (130a÷130f) jasno se uočava omekšana zona u donjem delu preseka, što ukazuje na moguće lokalno termičko otpuštanje usled koncentracije toplote u regiji oko trna alata.



Slika 131. Mape tvrdoće zavarenih spojeva pomoću konvencionalnog alata: a) BA 1.1; b) BA 1.2; c) BA 1.2; d) BA 2.1; e) BA 2.2.

4.3.7 Rezultati ispitivanja korozijske postojanosti

Rezultati elektrohemijskog ispitivanja (reprezentativnih uzoraka) na korozijsku postojanost po Tafelu (polarizacione krive) su grafički prikazani na slici 132.



Slika 132. Rezultati ispitivanja korozijske postojanosti po Tafelovoj metodi

Na osnovu dijagrama prikazanog na slici 132 uočava se da sve polarizacione krive imaju tipičan oblik karakterističan za aluminijum ispitan u sredini koja sadrži 3,5% rastvor NaCl u vodi. Kriva osnovnog materijala (crna) ima najnegativniji korozivni potencijal i relativno visoku gustinu struje u oblasti blizu E_{kor} , što ukazuje na najveću brzinu korozijske postojanosti. Anodna grana posle E_{kor} praktično pokazuje kontinualno povećanje gustine struje bez izražene pasivne oblasti (rastvaranje je dominantno aktivno), dok je eventualna pasivizacija slaba i nestabilna [139,140]. Kriva uzorka KA1.2 (crvena) je po obliku slična krivi osnovnog materijala, ali se vidi blago pomeranje E_{kor} ka nešto plemenitijim vrednostima i nešto niža gustina struje u anodnoj oblasti u odnosu na osnovni materijal. To ukazuje da je korozivna otpornost spoja zavarenog pomoću konvencionalnog alata nešto bolja u odnosu na osnovni materijal, ali i dalje bez jasno izražene široke pasivne oblasti, što pokazuje da formirani zaštitni film ne obezbeđuje dugotrajnu zaštitu [140,141]. Najveću razliku je prisutna kod uzorka BA 1.2 (zeleno). Korozivni potencijal je značajno pomeren ka plemenitijim vrednostima (oko -0,9 V), dok je gustina struje najmanja u odnosu na ostala dva slučaja. Anodna grana ima izrazitu „pasivnu oblast“, drugim rečima, širok opseg potencijala gustine struje ostaje niska i praktično konstantna, što upućuje na formiranje stabilnog zaštitnog pasivnog filma na površini zavarenog spoja. Tek pri višim potencijalima, u zoni približno od -0,3 V ka pozitivnijim vrednostima, kriva postaje neravna i struja naglo raste, što ukazuje na pojavu lokalizovane korozijske postojanosti (proboj pasivnog filma i nastanak piting korozijske postojanosti) [141,142]. Drugim rečima, uzorak BA 1.2 ima (termodinamički) najstabilniji pasivni film, nakon tog uzorka je osnovni materijal, koji ima slabiju pasivizaciju, dok najlošiju pasivizaciju ima uzorak KA 1.2. Ovo se može videti i iz tabele 14, gde se nalaze očitane vrednosti korozivnog potencijala i gustine struje, kao i brzina korozijske postojanosti (v_{kor}) [141,142].

Tabela 14. Vrednosti određene sa Tafelovih krivih

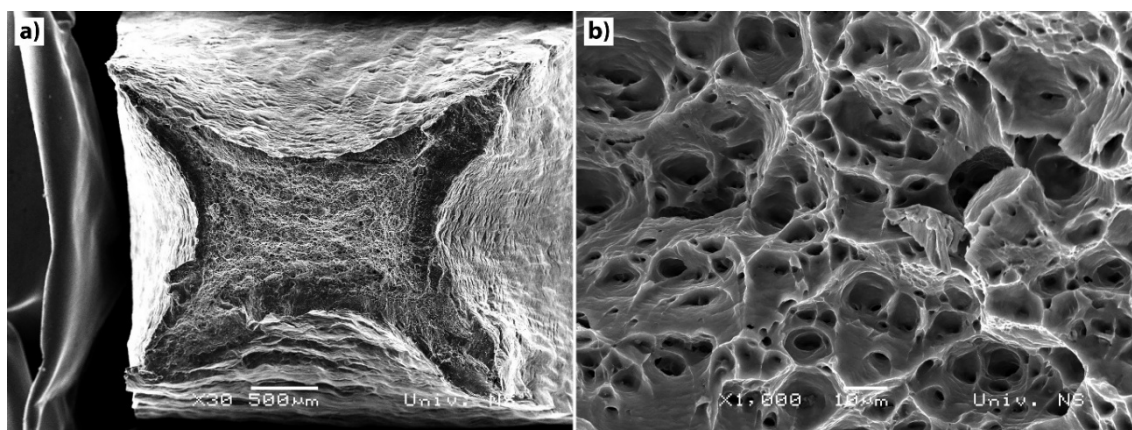
Uzorak	Elektrodni potencijal [V]	Gustina struje [$\frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$]	v_{kor} [$\frac{\text{mm}}{\text{god}}$]
OM	-1,25	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
KA 1.2	-1,22	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
BA 1.2	-0,87	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Ono što se može uočiti sa dijagrama na slici 132 i tabele 14 da uzorak BA 1.2. ima struju korozije koja je skoro 300 puta manja od OM i oko 15 puta manja od KA 1.2. Takođe se uočava da uzorak BA 1.2. u anodnoj oblasti (gornji segment krive) pojavljuju „stepeničaste“ promene [143]. To ukazuje na formiranje veoma stabilnog oksidnog sloja koji se „odupire“ rastvaranju pri većim potencijalima.

4.3.8 Rezultati SEM analize

Nakon obavljene karakterizacije zavarenih spojeva, vršena je analiza površina loma uzoraka ispitanih zatezanjem i ispitanih Šarpijevim klatnom (energija udara), kao i ispitivanje površina podvrgnutih elektrohemijskoj koroziji.

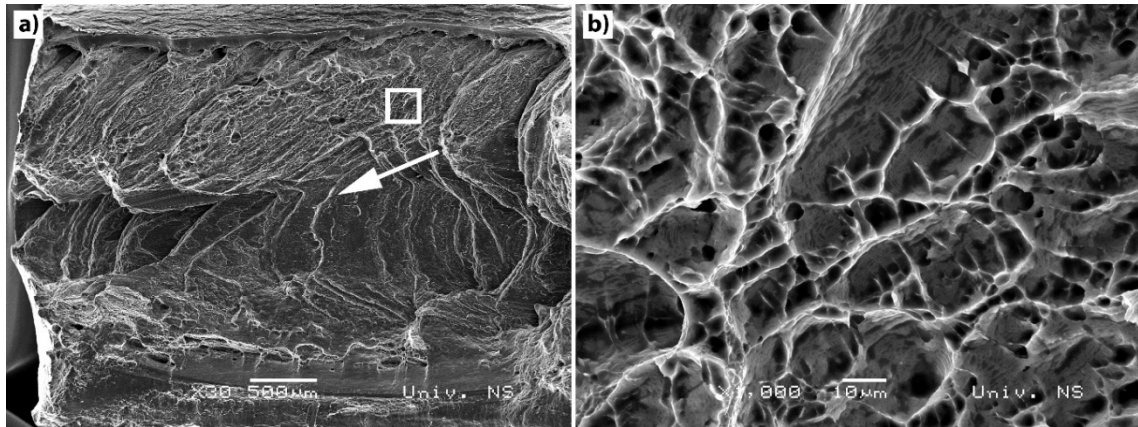
Na slici 133 je prikaz preloma uzorka (BA 1.2) zavarenog pomoću bobin alata i ispitano zatezanjem.



Slika 133. Površina loma uzorka BA 1.2, ispitanog zatezanjem; a) makro prikaz površine loma; b) centralni deo preloma sa karakterističnim jamicama

Analizom slike slike 133a se uočava kupast oblik površine loma na osnovu čega se može konstatovati da je reč o duktilnom lomu, sa jasno formiranom centralnom zonom intenzivne plastične deformacije. Na slici 133b (uveličana centralna regija preloma) koja predstavlja uvećani prikaz centralne oblasti preloma, vidi se izražena i homogena jamičasta struktura sa karakterističnim jamicama duktilnog loma.

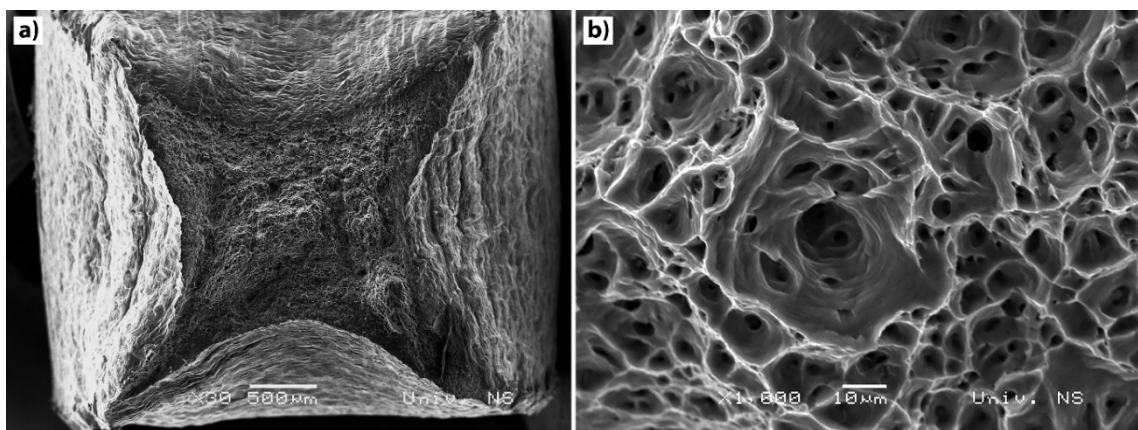
Na slici 134 je dat prikaz površine loma uzorka BA 1.1. Ovaj uzorak ima najlošije zatezne karakteristike, zbog čega je izabran kao reprezentativan za SEM analizu.



Slika 134. *Površina loma uzorka BA 1.1 ispitanog zatezanjem; a) makro prikaz površine loma (strelica pokazuje tunel); b) centralni deo preloma*

Sa slike 134a se uočava duktilni karakter loma sa nepravilnom geometrijom, uzrokovan prisustvom tunela koji je označen belom strelicom. Lom je verovatno iniciran u oblasti neposredno uz tunel, nakon čega se širio ka spoljašnjim površinama. Na slici 134b je dat deo (obežan belim kvadratom sa slike 134a), neposredno iznad tunela. Na slici se uočava prisustvo jamica, karakterističnih za duktilni lom. Dodatno se uočava da su jamice izdužene (dublje) što može biti posledica lokalne koncentracije napona u oblasti oko tunela [137,138,144].

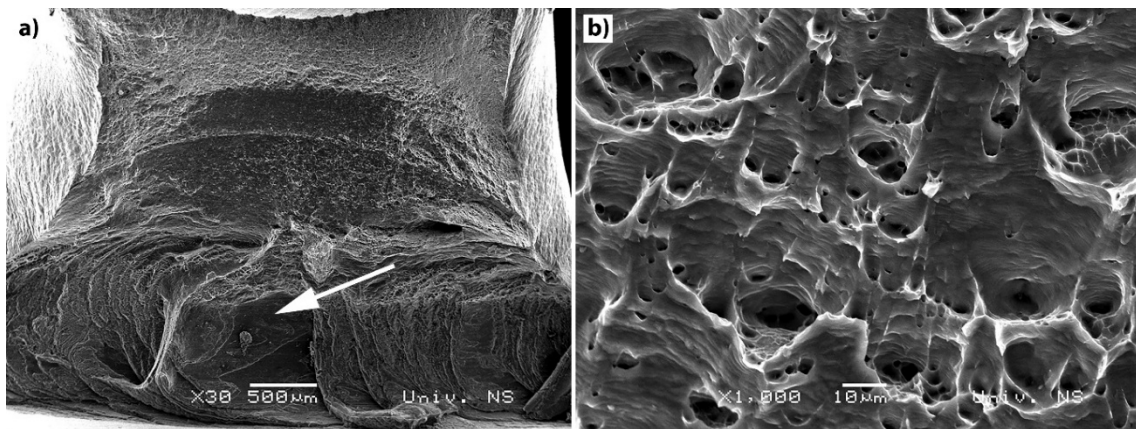
Na slikama 135 i 136 je dat prikaz površine loma uzoraka KA 1.2 i KA 2.2 zavarenih pomoću konvencionalnog alata, ispitivanih zatezanjem.



Slika 135. *Površina loma uzorka KA 1.2, ispitanog zatezanjem; a) makro prikaz površine loma; b) centralni deo preloma.*

Analizom površine loma uočeni su ključne karakteristike duktilnog loma materijala. Na makroskopskom nivou (slika 135a), to se ogleda u redukciji poprečnog preseka u oblik kupe, vlaknastoj centralnoj zoni i pojavi ivičnih zona smicanja (*engl. Shear lips*). Ovo zapažanje je dodatno potvrđeno na mikroskopskom nivou (Slika 135b) detekcijom izražene jamičaste strukture, čime se nedvosmisleno potvrđuje duktilni mehanizam loma. Takođe u centralnom delu fotografije uočava se jedna veća šupljina oko koje su raspoređene brojne manje šupljine. Zidovi šupljina su plastično deformisani i ne pokazuju znakove krtog loma. S obzirom da se

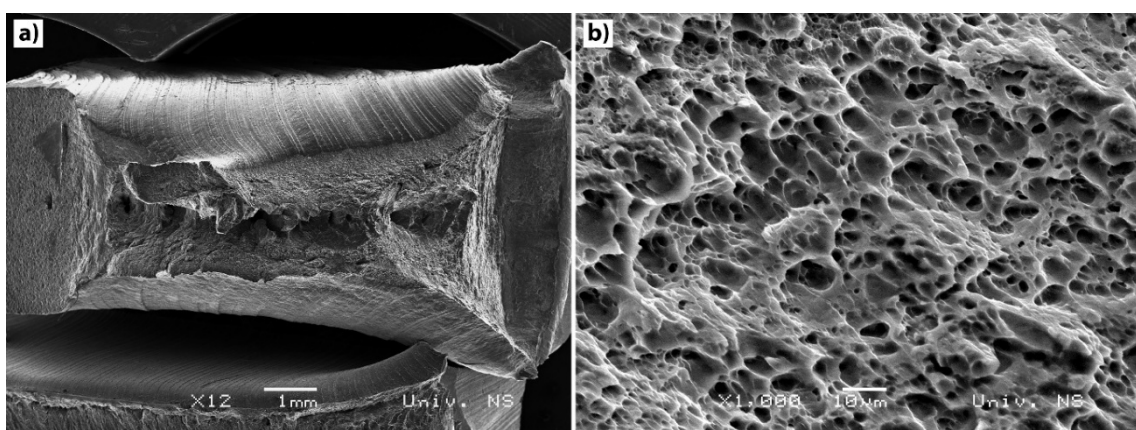
radi o istom osnovnom materijalu kao i kod ekvivalentnog uzorka na slici 133b, zavarenog bobin alatom, sitnije jamice verovatno ukazuju na finija zrna u zoni loma.



Slika 136. Površina loma uzorka KA 1.1, ispitanog zatezanjem; a) makro prikaz površine loma (strelica pokazuje tunel); b) centralni deo preloma

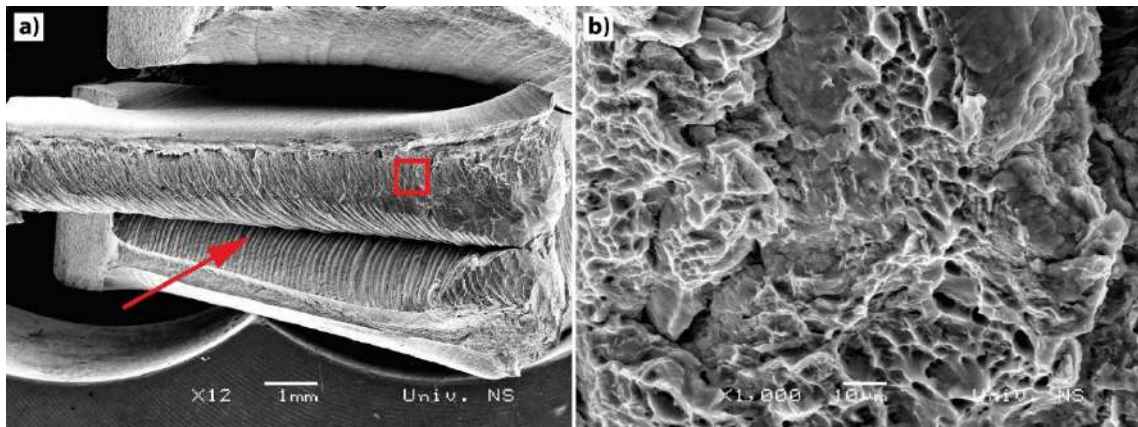
Na slici 136a uočava se izrazito asimetrična geometrija loma sa naglašenom plastičnom deformacijom. U donjem delu preseka je strelicom označen tunel nastao tokom procesa zavarivanja. U zoni oko tunela prisutan je prekid kontinuiteta loma i lokalna promena pravca vlaknastih linija, što ukazuje da je upravo taj defekt predstavljao mesto koncentracije napona i najverovatnije nastanka loma. Sa slike 136b uočava se pretežno duktilni karakter loma sa izraženom jamičastom morfologijom. Primećen je veliki broj međusobno povezanih mikrošupljina različitih dimenzija, sa plastično istegnutim zidovima, što ukazuje na mehanizam koalescencije, odnosno povezivanja mikrošupljina. Pojedine veće i dublje šupljine ukazuju na verovatno lokalno intenzivnije istezanje materijala.

Dalje su analizirane površine loma Šarpijevih epruveta korišćenih za određivanje energije udara. Izgled površine preloma je dat na slikama 137÷140.



Slika 137. Površina loma uzorka BA 1.2: a) makro prikaz površine loma; b) centralni deo preloma

Na osnovu slike 137a vidi se izrazito neravna, ali kontinualna površina loma uzorka BA 1.2, sa razvijenim zonama smicanja. Centralni deo preloma je usitnjen i hrapav, što može biti uzrokovano intenzivnom plastičnom deformacijom koja se manifestuje tokom ispitivanja energije udara, kao i visokog udela apsorbovane energije. Na slici 137b se vidi jamičasta struktura površine uzorka BA 1.2. Uočava se tipična struktura karakteristična za duktilni lom sa veoma izraženom jamičastom morfologijom. Površina je prekrivena gustim skupom dubokih i međusobno povezanih mikrošupljina različitih dimenzija, sa plastično deformisanim zidovima, što ukazuje na mehanizam koalescencije mikrošupljina tokom udara.

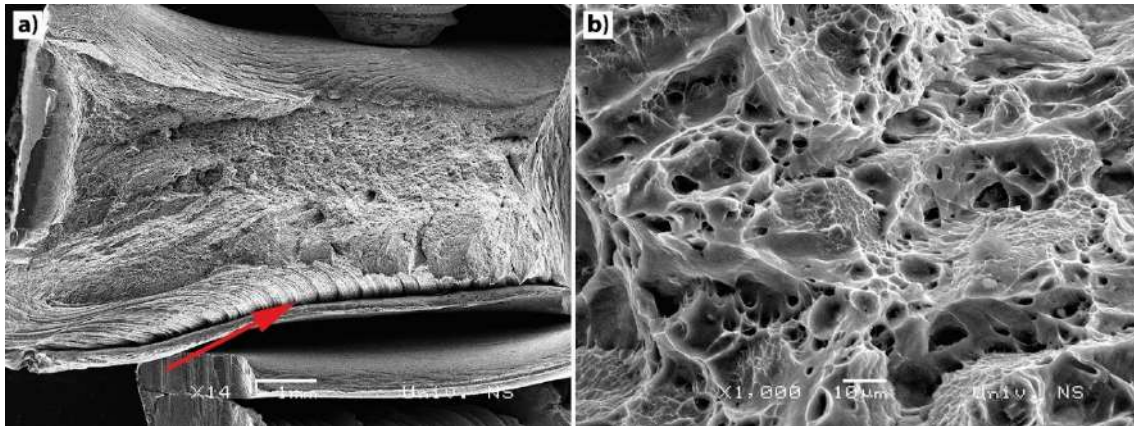


Slika 138. Površina loma uzorka BA 1.1: a) makro prikaz površine loma (strelica pokazuje tunel); b) deo označen crvenim kvadratom sa slike a

Sa slike 138a vidi se tipičan duktilni lom sa širokom zonom smicanja koja se prostire od mesta udara ka suprotnoj strani uzorka. Površina loma je izraženo neravna, sa vlaknastom strukturom. Strelicom je označen tunel koji je detektovan metalografskom analizom. U toj zoni je pravac loma poremećen, što ukazuje da je prisustvo tunela delovalo kao dodatni koncentrator napona i uticalo na lokalnu putanju prsline. Crveni kvadrat označava centralni deo preloma iz koga je izdvojen detalj 138b za detaljniju SEM analizu. Detaljniji prikaz loma pri uvećanju od 1000 $\times$ (slika 138b) pokazuje izrazito duktilnu morfologiju loma. Površina je prekrivena gustim skupom jamica različitih dimenzija, nastalih spajanjem mikrošupljina. Zidovi jamica su plastično deformisani, a pojedine jamice su blago izdužene u smeru smicanja, što odražava dinamički karakter opterećenja na Šarpijevom klatnu. Ne uočavaju se karakteristike krtog loma, pa se može zaključiti da i kod uzorka BA 1.1, uprkos prisustvu tunela, dominantni mehanizam loma ostaje duktilni lom putem koalescencije mikrošupljina. Pri tome, defekt prvenstveno utiče na nastanak i putanju prsline, ali ne i na promenu osnovnog mehanizma loma.

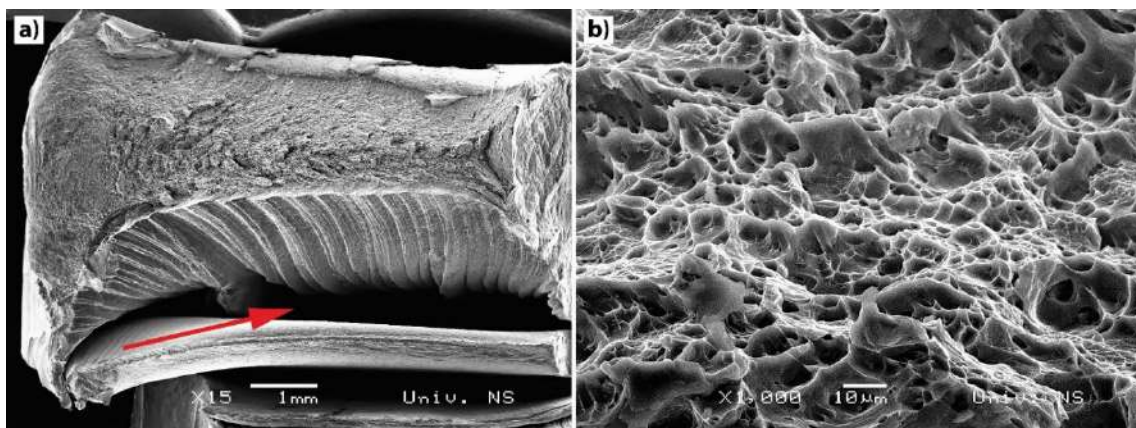
Na slici 139 je dat prikaz površine loma uzorka KA 1.2. Sa slike 139a se prvo uočava prisustvo tunela na strani korena šava koji je naznačen sa crvenom strelicom. U njegovoj neposrednoj okolini površina loma je „neravnija“, sa promenom nagiba i toka loma, što ukazuje da je tunel delovao kao dodatni koncentrator napona. Dodatno se uočava izraženo duktilan karakter loma, sa širokom zonom smicanja koja se pruža od V-zareza ka suprotnoj strani uzorka. Na slici 139b je dat prikaz površine loma, pri uvećanju od x1000 i na njoj se jasno može videti prisustvo jamičaste strukture površine loma, što je tipičan pokazatelj duktilnog loma. Zidovi jamica su

plastično deformisani, bez tragova krtog loma, što potvrđuje da je osnovni mehanizam preloma i pri udarnom opterećenju koalescencija mikrošupljina.



Slika 139. Površina loma uzorka KA 1.2: a) makro prikaz površine loma (strelica pokazuje tunel); b) centralni deo preloma

Na slici 140 je dat prikaz površine loma uzorka KA 1.1. Na slici 140a vidi se izraženo duktilan lom sa širokom zonom smicanja koja se pruža od V-zareza ka suprotnoj strani uzorka. Duž donjeg dela preseka, u zoni označenoj strelicom, prisutan je veliki tunel koji prati smer zavarivanja i jasno narušava kontinuitet preseka uzorka. U njegovoj okolini uočava se izraženiji reljef površine, sa promenom nagiba i pravca širenja loma, što ukazuje da je tunel delovao kao dominantan koncentrator napona i jedno od glavnih mesta nastanka loma. Kombinacija V-zareza i izraženog defekta logično dovodi do smanjenja apsorbovane energije udara i objašnjava asimetričan oblik preloma. Mikrostruktura centralne regije preloma (slika 140b) pri uvećanju 1000 $\times$ pokazuje pretežno duktilni karakter loma, sa vrlo izraženom jamičastom morfologijom. Površina je prekrivena mrežom plastično deformisanih kratera različitih dimenzija, koji su mestimično izduženi u smeru smicanja, što je posledica dinamičkog opterećenja i nehomogene raspodele napona usled prisustva tunela u preseku. Iako osnovni mehanizam loma ostaje duktilan, jasno je da veliki tunel značajno narušava integritet spoja i utiče na način nastanka i širenja prsline pri udaru.

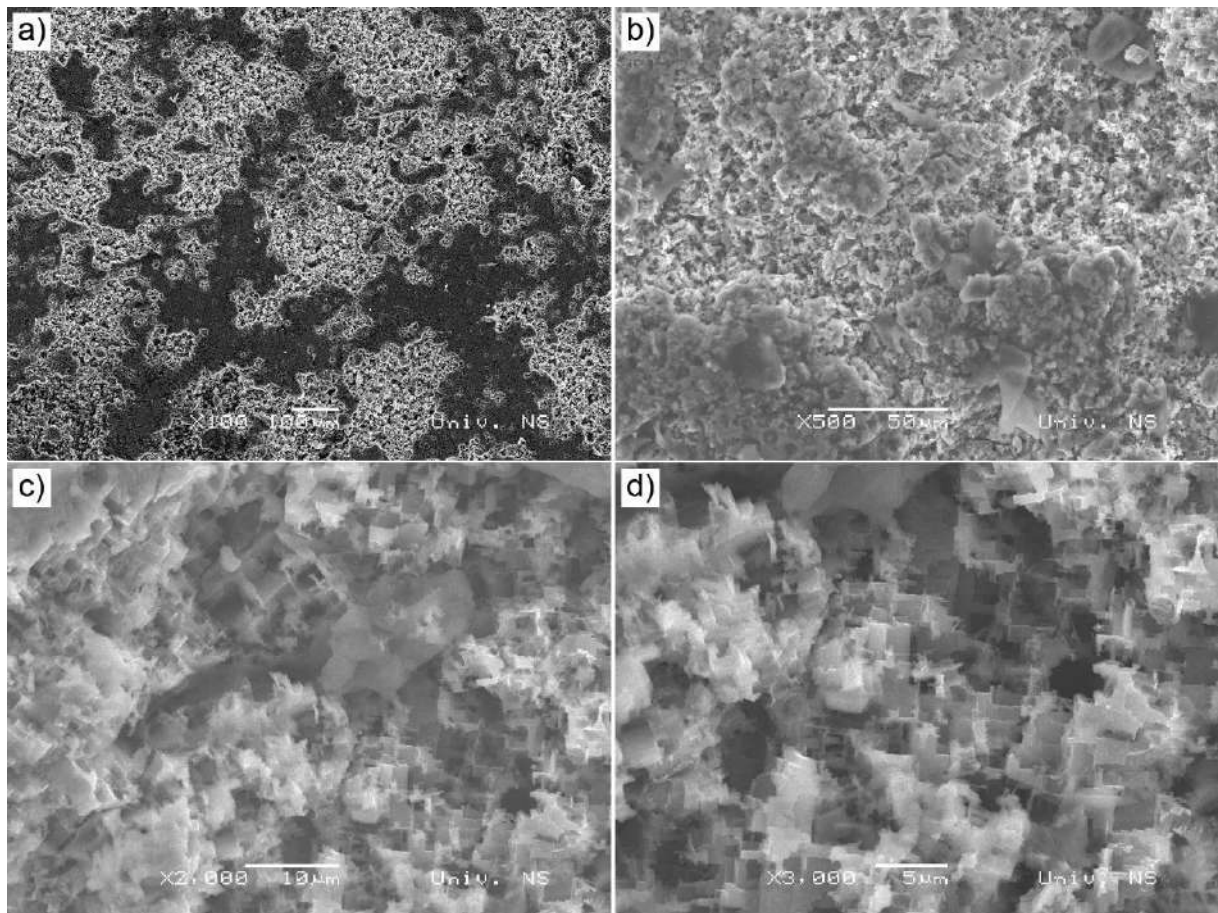


Slika 140. Površina loma uzorka KA 1.1: a) makro prikaz površine loma (strelica pokazuje tunel); b) centralni deo preloma

SEM analiza korodiranih površina

Analiziran je središnji deo korena zavarenih spojeva, jer kod uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata postoji uzak pojas u korenu (oko 2 μm) koji alat uslovno rečeno ne zahvata u potpunosti. Pretpostavlja se da će se na tom mestu javiti korozija u zazoru usled koje će eventualno doći do narušavanja strukture zavarenog spoja. Iz tog razloga je analiziran centralni deo šava, koji obuhvata zonu mešanja i neposredno okruženje korena, kako bi se uočile eventualne razlike u morfologiji korozije između osnovnog materijala i varijanti ZTM spojeva.

Kao polazna tačka ispitivanja, analizirana je površina osnovnog materijala kako bi se sagledale posledice korozije materijala na nemodifikovanom (neprocesiranom) materijalu (slika 141).

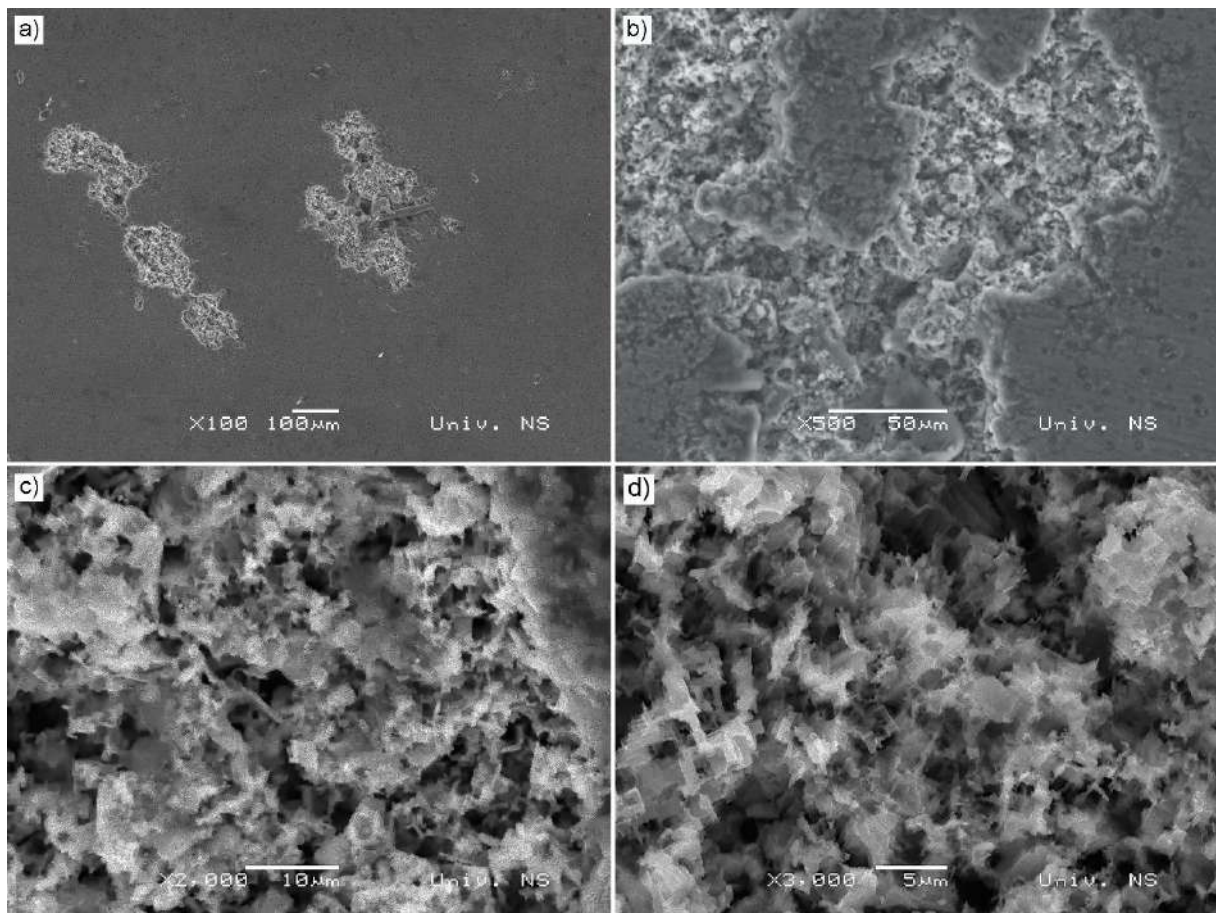


Slika 141. Prikaz korodirane površine na osnovnom materijalu pri različitim uvećanjima

Na slici 141a prikazan je makroprikaz korozionog oštećenja površine osnovnog materijala na kojoj se vidi da je kompletna površina osnovnog materijala prekrivena neravnomernim korozionim oštećenjem koji podseća na ostrva. Pri uvećanju od 500 $\times$ (slika 141b) površina uzorka deluje izrazito neravno i gotovo potpuno prekrivena korozijom. Vidi se gruba, porozna tekstura sa brojnim uzvisinama i udubljenjima, dok je podloga praktično sakrivena ispod nastalog sloja. Na pojedinim mestima uočavaju se krupnije, ljuspaste aglomeracije korozionog oštećenja što je karakteristična kristalografska piting korozija (engl. *Crystallographic pitting*) [123]. Na uvećanju 2000 $\times$ (slika 141c) i naročito 3000 $\times$ (slika 141d) vidi se da je korozionog

oštećenja izgrađenog od guste mreže pločastih kristalnih čestica nalik blokovima, naslaganih jedna preko druge i orijentisanih u različitim pravcima što dodatno potvrđuje manifestaciju kristalografske korozije. Između ovih kristala prisutne su sitne šupljine i kanali, što ukazuje da je koroziono oštećenje relativno porozno, ali ipak kontinualno. Drugim rečima, ne uočava se metalna osnova niti jasno izražene granice zrna.

Analiza površine korena uzorka zavarenog pomoću bobin alata (slika 142).

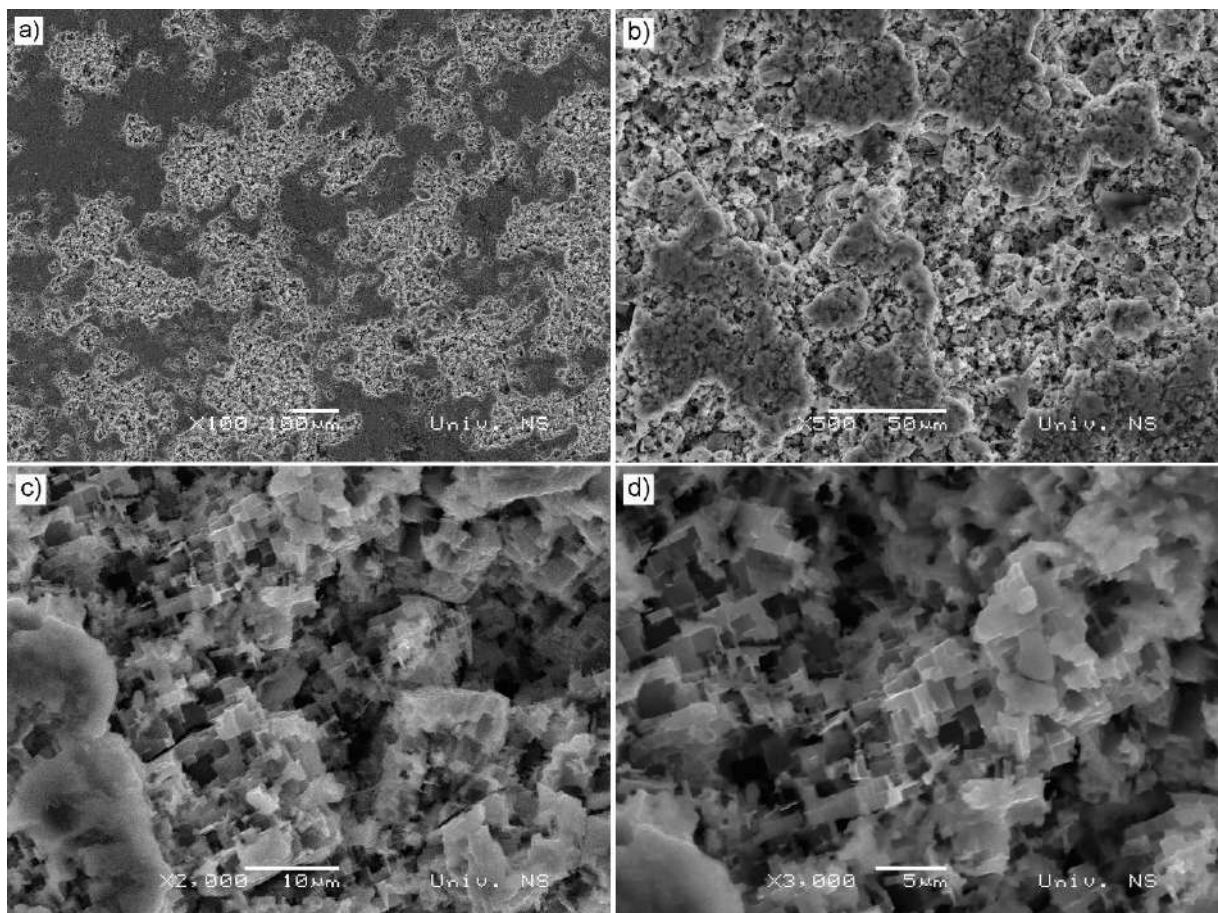


Slika 142. Prikaz korodirane površine na uzorku BA 1.2 pri različitim uvećanjima

Na slici 142a prikazan je makroprikaz korodirane površine uzorka na mestu površine korena uzorka zavarenog pomoću bobin alata. Uočava se da je površina u najvećem delu očuvana, sa svega nekoliko jasno izdvojenih „ostrva“ korozionog oštećenja. Ta ostrva imaju nepravilnu konturu i zauzimaju mali deo ukupne površine, dok je okolna oblast vizuelno homogena, glatka i bez izraženog reljefa. Na uvećanju 500× (slika 143b) prikazan je detalj jednog od tih ostrva. Uočava se neravan, porozan sloj korozije koji u potpunosti prekriva metalnu podlogu. Sloj je građen delimično aglomerisanih čestica, takođe se vidi difuzna granica između zone intenzivnog napada i okolne na kojoj se primećuju početne jamice. Takva morfologija sugerise da je korozija na ovom zavarenom uzorku pre svega lokalizovana. Lokalizovana korozija je verovatno vezana za prisustvo neke vrste druge faze, segregacije ili lokalnih nehomogenosti, dok je ostatak površine zaštićen relativno stabilnim filmom, pa ne dolazi do uniformnog rastvaranja kao kod osnovnog materijala. Na uvećanju 2000× (slika 142c) i 3000× (slika 142d)

vidi se da je i ovaj sloj građen od gustog sklopa sitnih, pločastih i kristalnih čestica nalik na blokove, vrlo slične morfologije kao kod osnovnog materijala, ali na pojedinim mestima deluje kompaktnije i ujednačenije. Između kristala postoje fine šupljine i kanali, što govori da je film produkata korozije porozan. U dubljim delovima reljefa uočavaju se nešto tamnije oblasti koje mogu odgovarati manjim jamama ili porama maskiranim produktima korozije, ali nema jasnih indikacija lokalizovanog korozionog oštećenja tipa piting. Ukupno gledano, koroziono oštećenje BA 1.2 manifestuje se kroz formiranje relativno homogenog sloja produkata na površini, bez izdvajanja pojedinačnih, dominantnih jama, što je u skladu sa rezultatima elektrohemijskog ispitivanja koji ukazuju na stabilniju pasivizaciju ovog spoja.

Na kraju jer izvršena analiza korodirane površine za uzorak KA 1.2 dobijenog konvencionalnim alatom (slika 143).



Slika 143. Prikaz korodirane površine na uzorku KA 1.2 pri uvećanjima: a) 500×; b) 2000× i c) 3000×

Sa slike 143a se može uočiti da površina uzorka zavarenog konvencionalnim FSW alatom deluje vrlo slično osnovnom materijalu. Granice između napadnutih i manje napadnutih područja nisu oštre, već korozija formira gotovo kontinualnu mrežu preko površine. Takav raspored ukazuje na uniformnu koroziju sa lokalnim zadebljanjima filma. Na uvećanju 500× (slika 143a) površina uzorka KA 1.2 praktično je u potpunosti prekrivena korozionim oštećenjem, ali je reljef nešto izraženiji u odnosu na uzorak BA 1.2. Vidi se sitnozrna, porozna

tekstura sa brojnim izbočenjima i međusobno povezanim udubljenjima, koja sugerišu kombinaciju opštijeg rastvaranja i lokalno intenzivnijeg napada korozije u pojedinim zonama. Površina nema jasno izdvojene pojedinačne, duboke jame velikog prečnika, ali je „izjedena“ na relativno kontinuiran način, uz prisustvo nekoliko krupnijih aglomerata korozionog oštećenja koji su izdignuti iznad okoline.

Na uvećanjima $2000\times$ i $3000\times$ (slika 143b i 143c) jasno se vidi da je film korozionog oštećenja građen od gusto zbijenih pločastih i kristalnih čestica nalik na blokove, naslaganih u više slojeva i orijentisanih u različitim pravcima. Između lamela prisutne su brojne fine šupljine i kanali, a lokalno se javljaju tamnije oblasti koje mogu odgovarati početnim jamama (pitovima) ili dubljim porama prekrivenim i delimično ispunjenim korozijom. U poređenju sa uzorkom BA 1.2, sloj na KA 1.2 deluje nešto manje homogen i sa izraženijom poroznošću, što je u skladu sa rezultatima elektrohemijskih ispitivanja koji ukazuju na slabiju pasivizaciju i veću sklonost ka lokalizovanom rastvaranju. Ipak, ni na najvećem uvećanju ne uočavaju se tipične karakteristike izrazito dubokog pitinga ili interkristalne korozije, već pre dominira rast poroznog filma i blago lokalizovana korozija ispod tog filma.

5. Diskusija

U ovom poglavlju razmatrani su dobijeni rezultati ispitivanja zavarenih spojeva legure EN AW 6060 T66 zavarenih postupkom ZTM primenom konvencionalnog i dvostranog „bobin“ alata. Cilj diskusije je povezivanje uočenih promena mikrostrukture sa mehaničkim osobinama spojeva (zatezna čvrstoća, savijanje, udarna žilavost i tvrdoća), kao i sa elektrohemijskim ponašanjem i morfologijom korozije, kako bi se procenila ukupna pogodnost oba alata za izradu zavarenih spojeva navedene legure. Poseban akcenat stavljen je na elektrohemijske karakteristike, s obzirom na to da se pri zavarivanju konvencionalnim alatom osnovni materijal deformiše i meša prvenstveno sa jedne strane (jedno rame alata), dok kod bobin alata postoji kontakt sa obe strane osnovnog materijala, odnosno sa gornjim i donjim ramenom alata.

5.1 Mikrostruktura

Mikrostruktura zavarenih spojeva kod oba tipa alata se može se podeliti na karakteristične zone koje se javljaju samo kod postupaka ZTM. A to su: Grumen (zona mešanja), zona termomehaničkog uticaja (ZTMU), zonu uticaja toplote (ZUT) i osnovni materijal (OM) [145,146]. Grumen se nalazi u osi simetrije zavarenog spoja i predstavlja zonu u zavarenom spoju u kojoj je najizraženiji uticaj intenzivne plastične deformacije i povišene temperature došlo do dinamičke rekristalizacije, što je rezultovalo rafinacijom, odnosno usitnjavanjem zrna [146]. Zone ZTMU i ZUT obuhvataju oblasti manjeg intenziteta deformacije i niže temperature u odnosu na grumen. Na nivou makrostrukture, raspored zona je veoma sličan za spojeve zavarene konvencionalnim i bobin alatom, što ukazuje da je ukupni unos toplote i deformacije pri izabranim režimima zavarivanja bio uporediv.

U zoni grumena kod uzoraka zavarenih pomoću bobin alata (reprezentativno BA 1.2) uočava se fina i ujednačena mikrostruktura, homogenog izgleda po celoj debljini šava. Kvantitativna analiza prema ASTM E112-25 [136] pokazala je da prosečna veličina zrna u ovoj zoni iznosi $G \approx 10$, što odgovara ekvivalentnom prečniku od oko 11 μm (tabela 11). Kod odgovarajućeg spoja zavarenog konvencionalnim alatom (KA 1.2) dobijena je vrlo slična, ali blago grublja struktura ($G \approx 9,5$; $d \approx 13 \mu\text{m}$). U poređenju sa ZTMU i ZUT-om i osnovnim materijalom, gde imamo krupnija zrna, jasno je da sam proces zavarivanja dovodi do izrazite rafinacije zrna u zoni mešanja, pri čemu je prosečan prečnik zrna u grumenu smanjen približno tri do četiri puta. Može se konstatovati da primenjeni režimi zavarivanja obezbeđuju efikasnu dinamičku rekristalizaciju bez značajnih razlika u granulaciji grumena između bobin i konvencionalnog alata, iako je kod bobin alata zrno nešto finije [136].

Prelaz iz grumena u ZTMU karakteriše postepen porast veličine zrna i promena oblika od finih i ujednačenih ka blago izduženim zrnima orijentisanim u pravcu toka materijala. Za ZTMU je određena veličina zrna $G \approx 8$ i $8,5$ ($d \approx 38 \mu\text{m}$) respektabilno za bobin i konvencionalni alat, što znači da su zrna u ovoj zoni krupnija nego u grumenu, ali i dalje dobijena nešto finija struktura u ZUT-u i osnovnom materijalu. Ovakav rezultat je u skladu sa očekivanim mehanizmom delimične rekristalizacije i istovremenog omekšavanja dejstvom toplote (otpuštanja) [52].

U ZUT-u, kod oba tipa alata, dobijena je prosečna veličina zrna $G = 7,5$ ($d \approx 40 \mu\text{m}$), praktično identična osnovnom materijalu. To ukazuje da termički ciklus ZTM postupka, pri korišćenim

parametrima nije doveo do izraženog rasta zrna u ovoj zoni, već pre do otpuštanja bez značajnijeg uticaja na prosečnu veličinu zrna.

Uporedna analiza mikrostruktura spojeva pokazuje da su prosečne veličine zrna po zonama vrlo slične za bobin i konvencionalni alat. Bobin alat daje nešto finije zrno u grumenu, dok su u tom pogledu ZTMU i ZUT gotovo identični [78].

5.2 Zatezne karakteristike

Rezultati ispitivanja zatezanjem osnovnog materijala i zavarenih spojeva pokazuju tipično ponašanje za leguru EN AW 6060 koja ojačava izlučivanjem taloga (starenjem) i koje su naknadno zavarene postupkom ZTM. Osnovni materijal u T66 stanju ima najveću zateznu čvrstoću i duktilnost, što je u skladu sa podacima iz literature za 6xxx seriju [110]. Nakon zavarivanja, kod svih spojeva dolazi do pada zatezne čvrstoće u odnosu na osnovni materijal, što se prvenstveno dovodi u vezu sa rastvaranjem i/ili koagulacijom taloga, kao i formiranjem omekšane zone u ZUT-u [79].

Uzorci zavareni pomoću bobin alata (slika 124) su prilikom određivanja zateznih karakteristika dosegli zateznu čvrstoću od: 115 MPa (BA 1.1), 146 MPa (BA 1.2), 142 MPa (BA 1.3), 127 MPa (BA 2.1) i 135 MPa (BA 2.2). Pri čemu se uzorak BA 1.2 izdvaja sa najvećom vrednosti zatezne čvrstoće od 146 MPa, takođe ima i najbolju deformabilnost u vidu izduženja od 21% i suženja od 61%. Ovakvi rezultati se poklapaju sa literaturnim podacima [90,91]. Pad zateznih karakteristika kod ostalih uzoraka zavarenih pomoću bobin alata se može pripisati prisustvu tunela koji se jasno uočavaju na slici 116. Prisustvo tunela direktno utiče na smanjenje zateznih karakteristika jer deluju kao koncentrator napona iz kojih započinje širenje prsline usled oblika i dimenzija tunela (slika 118), a nivo prihvatljivosti se određuje definiše se odgovarajućim standardom ISO 25239-5:2020 [53].

Kod spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata (slika 126) zatezne čvrstoće su: 131 MPa (KA 1.1), 138 MPa (KA 1.2), 135 MPa (KA 1.3), 140 MPa (KA 2.1), 137 MPa (KA 2.2) i 139 MPa (KA 2.3). Iz navedenih vrednosti konstatuje se da su vrednosti zatezne čvrstoće konvencionalnih spojeva slične vrednostima zatezne čvrstoće spojeva zavarenih pomoću bobin alata, ali je duktilnost konvencionalnih spojeva nepovoljnija. Pojedini režimi (npr. KA 1.2 i KA 2.3) dostižu zadovoljavajuću čvrstoću, ali uz primetno manje izduženje u odnosu na osnovni materijal (60% apsolutnih) i najbolji spoj zavaren pomoću bobin alata. Ovakav trend karakterističan je za konvencionalni ZTM postupak, kod kojeg rame alata neposredno deluje samo sa jedne strane osnovnog materijala. Zbog toga u oblasti neposredno ispod korena spoja često ostaje deo materijala koji je manje plastično deformisan i nedovoljno umešan, pa postoji velika verovatnoća formiranja uske zone u kojoj nije ostvareno potpuno spajanje materijala. Takva zona, zajedno sa prisutnim tunelima, deluje kao koncentrator napona i pogoduje nastanku prsline.

Međusobnim poređenjem spojeva zavarenih pomoću bobin i konvencionalnim alatom može se konstatovati da su nominalne vrednosti zatezne čvrstoće u proseku slične, ali da bobin spojevi pokazuju ujednačenije i više vrednosti izduženja i suženja preseka. Razlog je u različitoj geometriji alata. Bobin alat, sa ramenima na obe strane osnovnog materijala, obezbeđuje simetrično toplotno i deformaciono opterećenje po debljini zavarenog spoja, čime se eliminiše tipična problematična zona u korenu prisutna kod konvencionalnog alata [90]. Dodatna razlika u između zateznih karakteristika se ogleda i u finijoj strukturi zona zavarenog spoja. Strukture spojeva zavarenih pomoću bobin alata imaju finija zrna ($G \approx 10$), koja imaju bolje karakteristike,

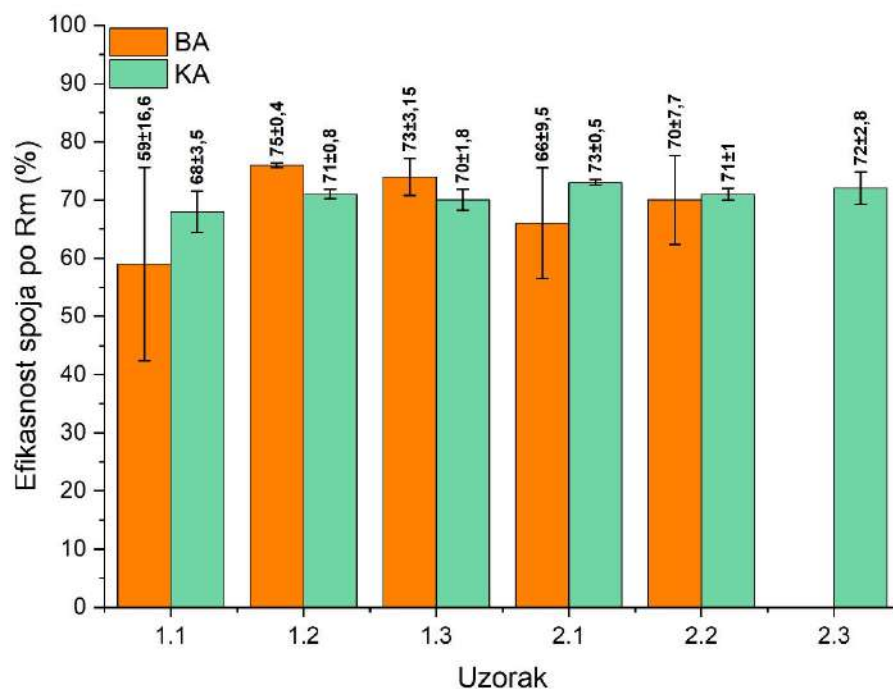
dok kod spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata imamo neznatno grublju strukturu ($G \approx 9,5$), koja kao rezultat daje nešto niže mehaničke osobine zavarenog spoja [97].

Uzorak BA 1.2 (slika 133 i 137) pokazuje morfologiju koja je u literaturi [147] definisana kao duktilni lom. Dominacija dubokih i ujednačenih mikro – jamica nam daje jasan znak o klasičnom mehanizmu nukleacije, rasta i koalescencije mikro – šupljina (*engl.* Micro – void coalescence – MVC). Prema literaturi [148,149], kod legura aluminijuma serije 6XXX, jamice obično nastaju oko čestica intermetalnih faza koje služe kao diskontinuiteti u duktilnoj α – matrici. Specifičnost uzorka BA 1.2 je u homogenosti jamica. Kod konvencionalnih ZTM šavova često dolazi do pojave različite distribucije veličine jamica, dok kod je upotrebom bobin alata postignuta disperzija taloga i usitnjenje zrna ($G = 10$) [147].

Na slici 144 je dat dijagram na kojem je prikazana procentualna efikasnost spoja po zateznoj čvrstoći, a koja je računata po formuli 12.

$$\eta_{R_m} = \frac{R_{mS}}{R_{mOM}} 100 \quad (12)$$

Gde je: η_{R_m} – Efikasnost zavarenog spoja po čvrstoći [%]; R_{mOM} – Zatezna čvrstoća osnovnog materijala i R_{mS} – Zatezna čvrstoća spoja [MPa].



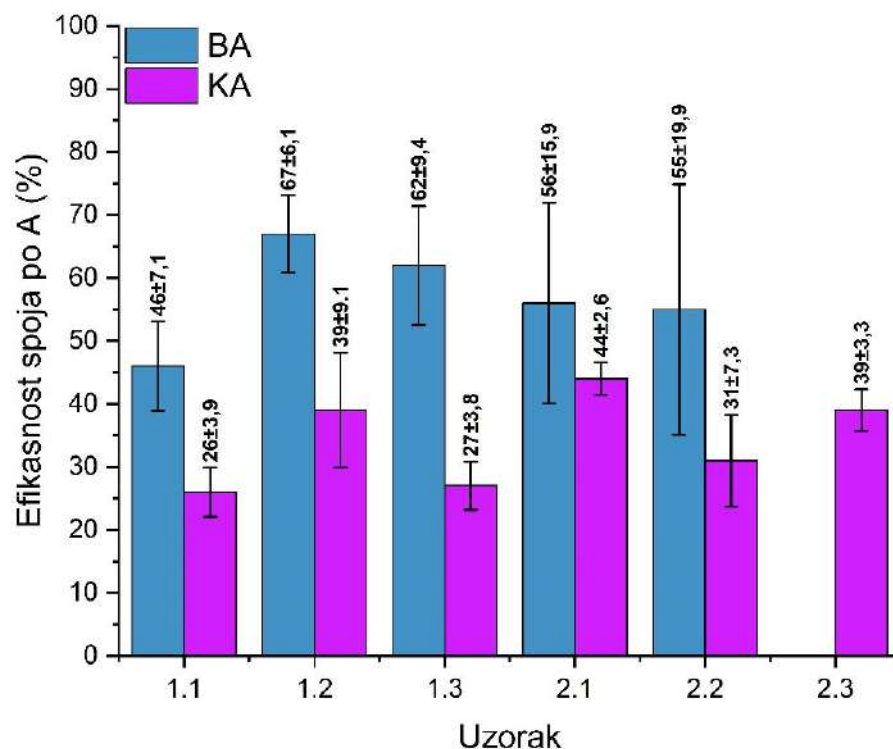
Slika 144. Efikasnost spoja po zateznoj čvrstoći

Sa slike 144 može se konstatovati da maksimalnu efikasnost spoja po zateznoj čvrstoći od $75 \pm 0,4\%$ poseduje uzorak BA 1.2. Ovako visok stepen iskorišćenja čvrstoće kod legure serije 6xxx potvrđuje da se upotrebom bobin alata, pri optimalno odabranim parametrima, može postići izuzetno stabilan termomehanički ciklus sa minimalnim rasipanjem rezultata. Prema literaturi [150–152], efikasnost iznad 70% smatra se odličnim rezultatom, obzirom na neizbežan gubitak sekundarnih faza u vidu taloga tokom procesa zavarivanja, koje se razlažu

na temperaturama ZTM. Sa druge strane, uzorak BA 1.1 pokazuje najnižu efikasnost u celoj seriji ($59 \pm 16,6\%$), praćenu ekstremno visokom standardnom devijacijom. Ovakav pad mehaničkih osobina i izražena procesna nestabilnost direktno se mogu povezati sa makroskopskim defektom u vidu tunela, koji je u ovom spoju identifikovan ranijom strukturnom analizom, a koji dramatično smanjuje efektivni poprečni presek i izaziva lom. U slučaju serije zavarene pomoću konvencionalnog alata (KA), efikasnost se kreće u ujednačenom i stabilnom opsegu od $68 \pm 3,5\%$ do $73 \pm 0,5\%$. Sa aspekta standardne devijacije, uzorci zavareni pomoću konvencionalnog alata pokazuju znatno veću robusnost i manju osetljivost na variranje parametara režima, ali su performanse KA serije uzoraka ipak niže u poređenju sa uzorcima zavarenim pomoću bobin alata (uzorci BA 1.2 i BA 1.3).

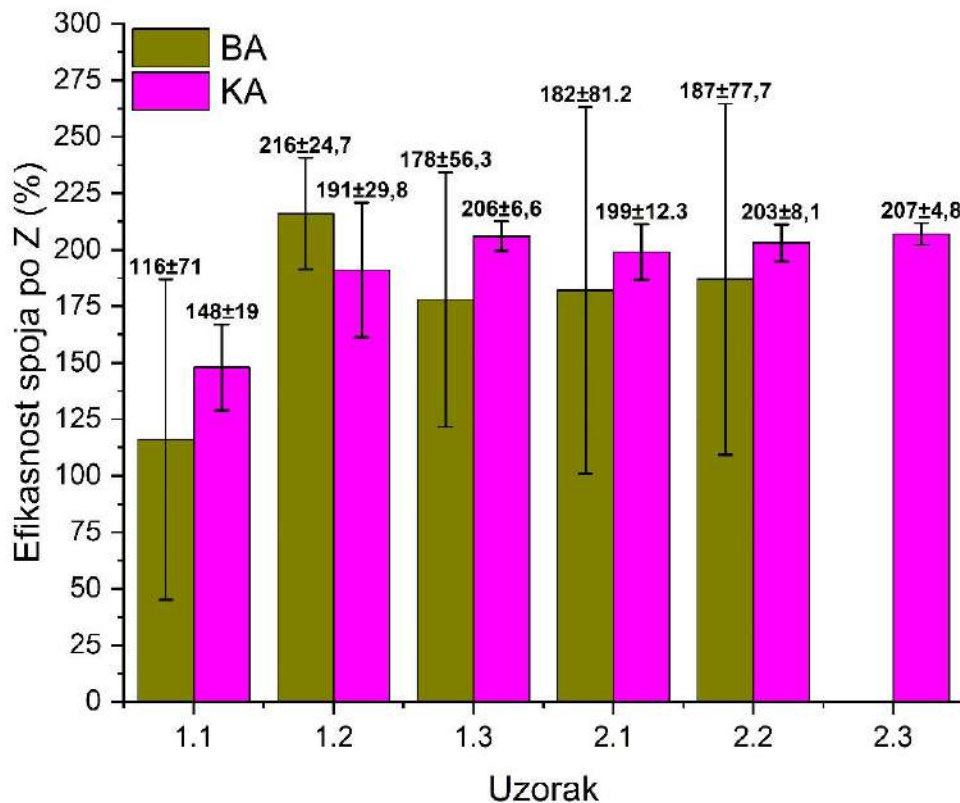
Izvršena je analiza efikasnosti spoja na osnovu procentualnog izduženja (η_A) i ona je prikazana na slici 145. Na osnovu prikazanih rezultata se može konstatovati da najveću efikasnost spoja poseduje uzorak BA 1.2 ($67 \pm 6,1\%$). Prema Mishri i Mau [5], pad izduženja kod ZTM spojeva termički taložno ojačavanih legura (poput aluminijuma serije 6xxx) je gotovo neizbežan fenomen usled lokalizacije deformacije u toplotno pogođenoj zoni (ZUT). Međutim, sitnozrna struktura unutar zone mešanja ($G=10$) rezultuje da ovi uzorci zadržavaju više od dve trećine izduženja osnovnog materijala [152].

Spojevi zavareni pomoću konvencionalnog alata pokazuju znatno nižu efikasnost izduženja, koja se kreće u opsegu od $26 \pm 3,9\%$ (uzorak KA 1.1) do maksimalnih $44 \pm 2,6\%$ (uzorak KA 2.1). Ovakva, drastično niža duktilnost KA serije u poređenju sa BA uzorcima, direktna je posledica prisustva defekata u korenu spoja (tunel). Sa aspekta mehanike loma, ovi defekti deluju kao koncentratori napona. Usled toga se prslina inicira i brzo širi se kroz presek znatno brže nego što matrica materijala dostigne fazu ravnomerne plastične deformacije [152].



Slika 145. Efikasnost spoja po procentualnom izduženju

Izvršena je i analiza efikasnosti spojeva po suženju preseka spoja (η_Z) i ona je data na slici 146.



Slika 146.

Efikasnost spoja po suženju preseka

Na osnovu dijagrama sa slike 146 može se konstatovati da uzorak BA 1.2 pokazuje najvišu prosečnu efikasnost spoja po suženju poprečnog preseka, dostižući vrednost od 216 ± 24,7%. Međutim, spojevi zavareni pomoću konvencionalnog alata takođe pokazuju izuzetno visoke, a pritom znatno stabilnije vrednosti, pri čemu se izdvajaju uzorci KA 2.3 (207 ± 4,8%), KA 1.3 (206 ± 6,6%) i KA 2.2 (203 ± 8,1%). Ove vrednosti potvrđuju da je plastičnost, odnosno suženje preseka kod obe grupe spojeva, dvostruko veće u poređenju sa osnovnim materijalom. Ovako visoke vrednosti efikasnosti po suženju su direktna posledica formiranja izrazito sitnozrne strukture u zoni mešanja, nastale procesom dinamičke rekristalizacije (za uzorak BA 1.2 $G=10$; za KA 1.3 $G=9,5$). U literaturi [5] se navodi da usitnjenje zrna kod legura aluminijuma drastično olakšava procese klizanja dislokacija na mikronivou unutar zone mešanja, omogućavajući materijalu da se deformiše do znatno manjih preseka pre nego što dođe do loma.

5.3 Savojne karakteristike

Rezultati dobijeni ispitivanjem savijanjem u tri tačke su jedni od pokazatelja mehaničkih osobina zavarenog spoja. Tokom ispitivanja dolazi do pojave velike plastične deformacije pri čemu se sa suprotnih strana uzorka javljaju naponi različitog karaktera (pritisak i zatezanje). Sa donje strane uzorka dolazi do pojave zateznih napona koji su kritični za nastanak prsline [133]. Spojevi zavareni pomoću bobin alata ispitani preko lica i korena (Tabela 12 i Slika 126) pokazuju pretežno povoljno ponašanje. Kod uzoraka BA 1.2 i BA 2.1 (ispitivanje preko lica šava) nije uočena pojava prsline tokom ispitivanja, međutim kod uzoraka BA 1.1 i BA 1.3 je

došlo do pojave prslina pri uglovima od 175° i 132° respektabilno. Negativan primer je uzorak BA 2.2 kod kojeg se prslina pojavila već pri uglu od 19° . Prilikom ispitivanja preko korena zavarenog spoja, uzorci pokazuju povoljnije ponašanje. Uzorci BA 1.2, BA 1.3, BA 2.1 i BA 2.2 se savijaju do ugla od 180° bez pojave prsline, dok se kod BA 1.1 prslina javlja pri uglu od 73° . Ovakav trend je u skladu sa literaturom [57,153], jer primena bobin alat ima prednost u pogledu odsustva korenskih nesavršenosti koje su karakteristične za upotrebu konvencionalnog ZTM alata (ostaci ivice spoja). Upotrebom bobin alata imamo i uravnoteženije termičko-deformaciono dejstvo kroz celokupnu debljinu osnovnog materijala, što posledično poboljšava ponašanje pri savijanju preko korena [57].

Kod konvencionalno zavarenih spojeva (Tabela 13 i slika 127) savijanje preko lica je takođe vrlo dobro. Kod svih uzoraka pri savijanju do 90° i 180° respektabilno, nije registrovana pojava prsline, što ukazuje da je gornja površina spoja (koja je direktno pod dejstvom ramena alata) dobro umešana. Međutim, savijanje preko korena daje potpuno drugačiju sliku. Kod svih uzoraka javlja se rana inicijacija (nastanak) prsline pri veoma malim uglovima, i to približno $16,9^\circ$ (KA 1.1), $12,7^\circ$ (KA 1.2), $12,9^\circ$ (KA 1.3), 20° (KA 2.1), $9,5^\circ$ (KA 2.2) i $10,8^\circ$ (KA 2.3). Iako pri savijanju do 180° nije došlo do loma, činjenica da se prslina javlja već ispod 20° jasno ukazuje na prisustvo kritičnih nesavršenosti u korenu spoja. Ovakav ishod je tipičan kada se u korenu nalaze volumenske nesavršenosti tipa tuneli/crvotočine ili ostaci ivice spoja, jer se pri savijanju preko korena upravo koren izlaže zatezanju i postaje dominantno mesto nastanka prsline [154–156].

Uporedno posmatrano, bobin spojevi u najvećem broju slučajeva izdržavaju savijanje preko korena do 90° i 180° bez pojave prsline (izuzetak je uzorak BA 1.1 kod kojeg se prslina javila pri uglu od 73°), dok se kod spojeva zavarenih pomoću konvencionalnog alata usled prisutnih grešaka u vidu tunela dolazi do „ranije“ pojave prsline (raspon uglova pojave prsline $9,5 \div 20^\circ$) usled prisutnih grešaka u korenu zavarenog spoja. Ovaj trend je konzistentan sa pomenutim razmatranjima ZTM defekata i sa činjenicom da ISO 25239-5:2020 uvodi koncept različitih nivoa prihvatljivosti i sistematizuje defekte i kriterijume prihvatanja.

Rani nastanak prsline pri savijanju preko korena kod konvencionalno zavarenih spojeva (ispod 20°) ukazuje da koren predstavlja dominantnu „slabu tačku“ spoja. Takva lokalna nesavršenost deluje kao koncentrator napona, pa se očekuje da isti uzorci pokažu nepovoljnije ponašanje i pri drugim vrstama opterećenja. Uočeno je pre svega smanjeno izduženje/suženje preseka pri zatezanju, uočava se i kod manjih vrednosti energije udara jer inicijacija loma nastupa pre nego što se razvije značajnija plastična deformacija.

5.4 Energija udara

Rezultati ispitivanja energije udara pokazuju razliku između spojeva zavarenih pomoću bobin i konvencionalnog alata, kako u pogledu ukupne apsorbovane energije, tako i u raspodeli energije na nastanak i širenje prsline (slike 128 i 129). Osnovni materijal (OM) ima najmanju ukupnu energiju udara, oko 14,8 J ($E_n=4$ J; $E_s=10,7$ J), što ukazuje na ograničenu sposobnost apsorpcije energije pri dinamičkom opterećenju u poređenju sa zavarenim spojevima. Ovakav rezultat je konzistentan sa tim da se kod instrumentovanog Šarpijevog ispitivanja ukupan nivo žilavosti tumači kroz ukupnu energiju, dok odnos E_n/E_s ukazuje da li materijal pretežno apsorbira energiju na inicijaciju ili je dominantan otpor širenju prsline [135].

Kod bobin spojeva ukupna energija udara je generalno veća i kreće se u širokom opsegu (slika 128): 34,04 J (BA 1.1), 43,64 J (BA 1.2), 42,76 J (BA 1.3), 40,78 J (BA 2.1) i 25,21 J (BA 2.2).

Najveće vrednosti ostvaruju uzorci BA 1.2 i BA 1.3 ($E_{uk}=43,6$ J i $E_{uk}=42,8$ J respektabilno), zatim uzorak BA 2.1 ($E_{uk}=40,8$ J), dok BA 2.2 ima najmanju vrednost energije ($E_{uk}=25,2$ J). Ključna karakteristika bobin serije je da je kod najboljih uzoraka dominantna komponenta upravo energija širenja prsline. Kod uzoraka BA 1.2 i BA 1.3 $E_s=22,01$ J i $E_s=30,08$ J respektabilno, dok je energija potrebna za stvaranje prsline $E_n=12,03$ J i $E_n=12,57$ J respektabilno. To znači da nakon nastanka prsline spoj pruža značajan otpor daljem širenju, što je tipičan pokazatelj duktilnosti spoja [135]. Ovaj trend se veoma dobro poklapa sa prethodnim rezultatima ispitivanja na savijanje. Spojevi zavareni pomoću bobin alata su pri savijanju preko korena uglavnom izdržali savijanje bez pojave prsline do 90° i 180° , što ukazuje na dobre mehaničke osobine korena spoja.

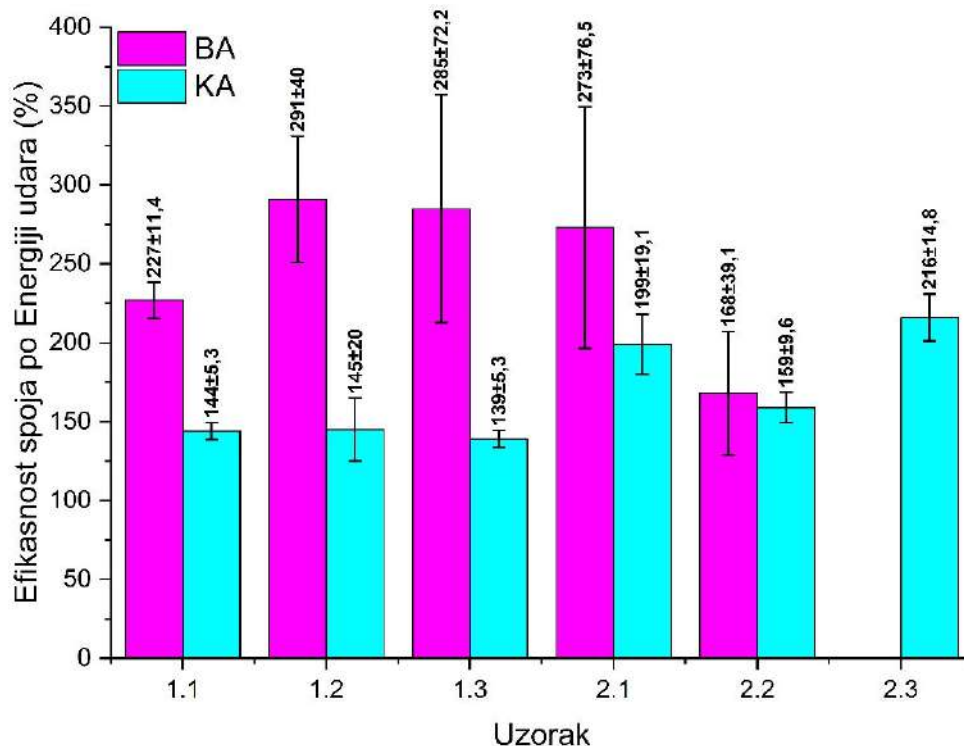
Kod konvencionalno zavarenih spojeva ukupna energija udara je veća od OM, ali u odnosu na bobin seriju uzoraka je značajno manja. Energija nastanka prsline dostiže 11,99 J (uzorak KA 2.1). Ipak, dominantan doprinos ukupnoj žilavosti ZTM spojeva dolazi iz faze širenja prsline. Energija širenja kod uzorka KA 2.3 iznosi 21,52 J, što je dvostruko više od vrednosti za osnovni materijal (10,74 J). Kako ističe Pinedo i ostali [157] u svom istraživanju mehanike loma legure 6082, rekristalisana zrna primorava prslinu na stalno mikroskopsko skretanje i formiranje veće plastične zone neposredno ispred vrha prsline, čime se rasipanje energije znatno uvećava.

Bobin spojevi imaju povoljnije karakteristike pri savijanju preko korena što pri udaru rezultuje većom ukupnom energijom i većom energijom širenja prsline. Sa druge strane, konvencionalni spojevi pokazuju rani nastanak prsline pri savijanju preko korena, što se odražava na niži nivo apsorbirane energije. Ovakva konstatacija je u skladu sa poznatim uticajem defekata (tunel/crvotočina i ostaci linije spoja) na energiju udara, kao i sa principima da finije zrno i homogenija struktura generalno doprinose karakteristikama materijala (ponajviše duktilnost materijala), ali da defekti u preseku imaju presudan štetan efekat [97,155,158,159].

Uzorci KA serije pokazuju fenomen gde makroskopski defekt potpuno dominira nad mikroskopskim osobinama osnove. Prisustvo tunela u korenu (*engl.* Root tunnel) je uočen kod svih uzoraka (slika 122). Tunnel u korenu zavarenog spoja deluje kao ekstremni koncentrador napona [32,73], koji uzrokuje lokalno troosno naponsko stanje. Prema literaturi [160], ovo stanje sprečava plastičnu deformaciju, što se na SEM snimcima vidi kao nagli prelaz sa glatkih zidova defekta na zonu brzog, "ravnog" loma sa plitkim jamicama. Energija širenja prsline kod KA 1.1 od svega 6,73 J je direktna posledica odsustva plastične zone ispred vrha prsline.

Posebno je značajno uočiti razliku između uzoraka BA 1.1 i KA 1.1. Iako oba uzorka poseduju defekte (tunel i tunnel u korenu zavora, respektabilno), morfologija loma oko tunela kod BA 1.1 i dalje zadržava duktilne karakteristike (rebrasta struktura tečenja), što rezultuje energijom od 22,01 J. Ovo ukazuje na to da su metalurške veze kod spojeva zavarenih pomoću bobin alata, čak i u prisustvu defekta, superiornije zbog simetričnog termičkog uticaja koji se javlja tokom procesa zavarivanja [161]. Nasuprot tome, KA 1.2, uprkos manjoj veličini defekta u odnosu na KA 1.1, i dalje pokazuje "ravnu" topografiju preloma iznad korena šava, što potvrđuje da je asimetrični unos toplote kod konvencionalnog alata stvorio metalurški „osetljivu putanju“ za lako širenje prsline [147]. Kao što je ranije u tekstu napomenuto, kod konvencionalnih ZTM šavova često dolazi do pojave različite distribucije veličine jamica, dok je upotrebom bobin alata postignuto usitnjenje zrna ($G = 10$) [147]. Ovakva struktura „primorava“ prslinu na stalnu promenu pravca pri njenom širenju, na mikro nivou, što drastično povećava ukupnu površinu preloma i rezultuje maksimalnom energijom udara od 43,64 J (uzorak BA 1.2) [5].

Analiza efektivnosti spoja na osnovu ukupne apsorbovane energije udara (η_{KV}), kao i energije potrebne za nastanak (η_{En}) i širenje (η_{E_s}) prsline je izvršena upotrebom modela formule 12.



Slika 147. Efikasnost spoja po ukupnoj energiji udara

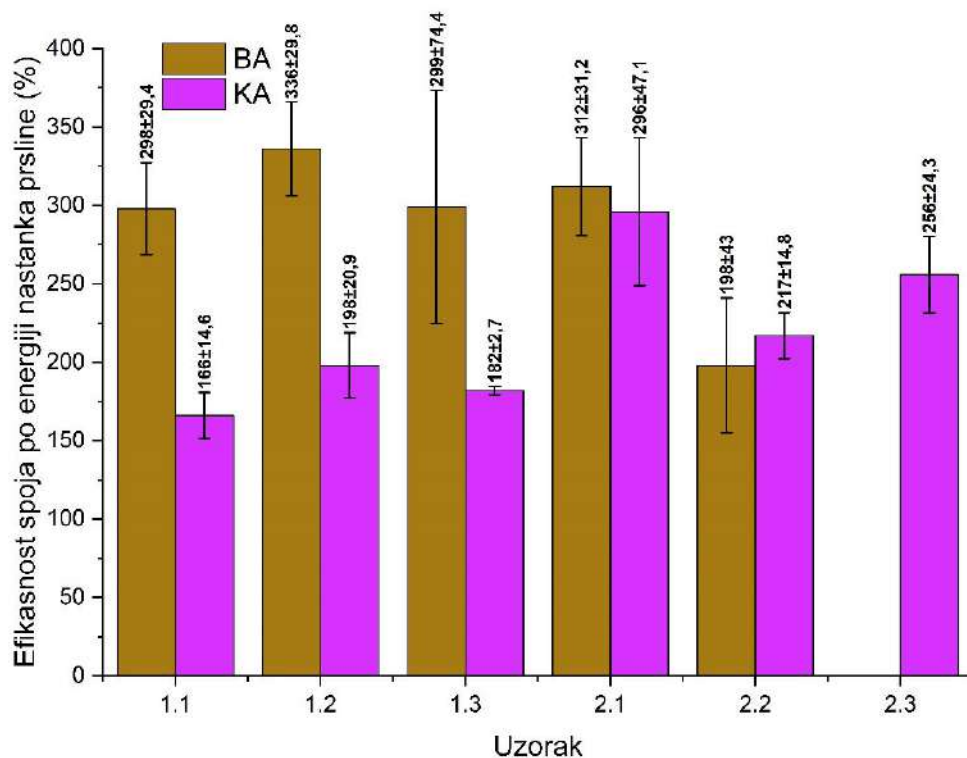
Na slici 147 je dat dijagram na kojem je prikazana efektivnost spoja na osnovu ukupne energije udara (η_{KV}). Najveća prosečna vrednost uočena je kod uzorka BA 1.2, čija efikasnost dostiže $291 \pm 40\%$. Ovakav porast žilavosti (skoro trostruko veći u odnosu na osnovni materijal) direktna je posledica ekstremnog usitnjavanja zrna u zoni mešanja ($G=10$). Literatura [5] ovakav fenomen objašnjava činjenicom da fino zrna struktura, dobijena dinamičkom rekristalizacijom, povećava broj granica zrna koje deluju kao prepreke kretanju prsline, primoravajući je na stalnu promenu pravca i povećano rasipanje energije usled plastične deformacije. Serija uzoraka zavarena konvencionalnim alatom (KA) takođe pokazuje efikasnost koja premašuje 100% u odnosu na osnovni materijal, dostižući maksimalnu vrednost od $216 \pm 14,8\%$ kod uzorka KA 2.3. Međutim, uvođenje standardne devijacije u analizu otkriva suštinsku razliku u stabilnosti procesa između ova dva alata. Iako BA serija (posebno uzorci 1.2, 1.3 i 2.1) beleži znatno višu prosečnu apsorpciju energije, nju prati izrazito veliko rasipanje rezultata (devijacije dostižu i do $\pm 76,5\%$ kod uzorka BA 2.1, pa čak i $\pm 72,2\%$ kod BA 1.3). Ovako visoka varijabilnost kod bobin alata ukazuje na to da lokalne strukturne nehomogenosti i mikro-varijacije u tečenju materijala nepredvidivo utiču na mehaniku i putanju širenja prsline pri dinamičkom udaru.

Sa druge strane, KA serija u većini slučajeva pokazuje nižu, ali osetno stabilniju i ujednačeniju raspodelu vrednosti (KA 1.1 sa $144 \pm 5,3\%$ i KA 1.3 sa $139 \pm 5,3\%$). Ograničena efikasnost apsorpcije energije kod ovih uzoraka je u direktnoj zavisnosti sa prisustvom defekata u korenu spoja. Defekti u korenu deluju kao izraženi koncentratori napona koji prevremeno prekidaju

proces apsorpcije energije kroz plastičnu deformaciju i olakšavaju brzo širenje prsline, čime fizički „ograničavaju“ maksimalni kapacitet žilavosti spoja [152].

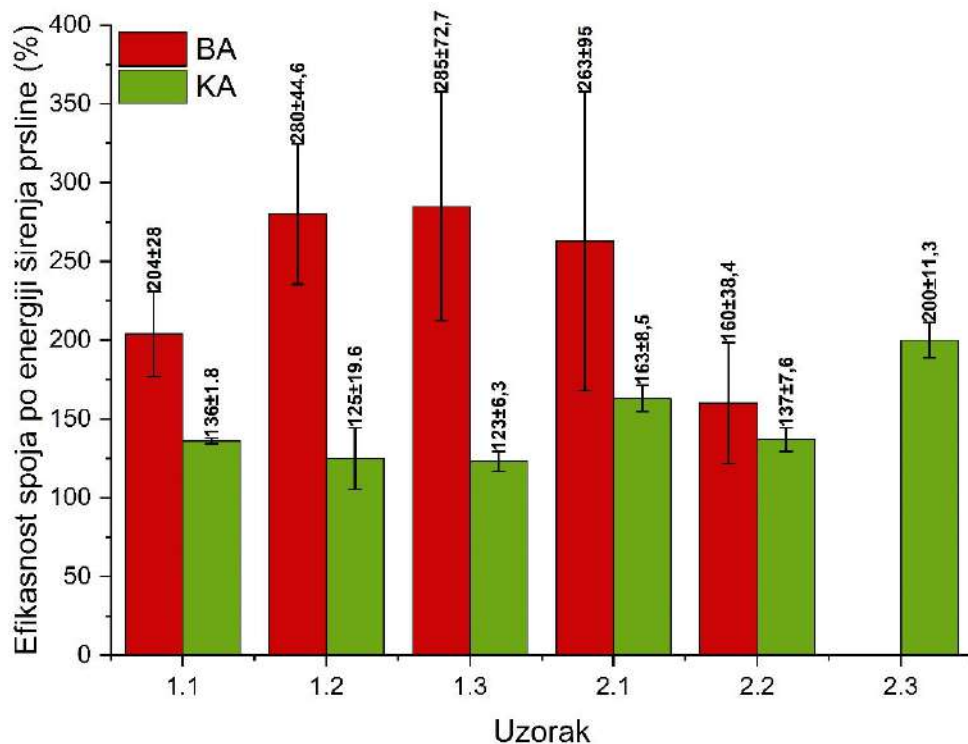
Na slici 148 je dat dijagram na kojem je prikazana efikasnost spoja na osnovu energije potrebne za nastanak prsline (η_{E_n}). Uočava se da je najveća postignuta efikasnost spoja po energiji nastanka prsline (335%) dobijena kod uzorka BA 1.2. Ovo je u korelaciji sa finostrukturom grumenata ($G=10$) i homogenom distribucijom toplote koji se dobija upotrebom bobin alata. Sitnozrna struktura otežava nagomilavanje dislokacija na kritičnim mestima, čime se odlaže trenutak nukleacije mikro-šupljina i formiranje inicijalne prsline [162]. Prema Pinedu i ostalima [157], homogenost mikrostrukture kod legura iz serije 6xxx direktno podiže prag energije potrebne za prelazak iz elastičnog u plastični režim na vrhu koncentratora napona.

KA serija uzoraka takođe pokazuje efikasnost spoja iznad 100% u odnosu na osnovni materijal (216% kod uzorka KA 2.3). Niža efikasnost kod KA 1.1 (144%) i KA 1.3 (139%) je u korelaciji sa prisustvom defekata u korenu spoja.



Slika 148. Efikasnost spoja po energiji nastanka prsline

Analiza efikasnosti spoja po energiji potrebnoj za širenje prsline (η_{E_s}) data je na slici 149.



Slika 149. Efikasnost spoja po energiji potrebnoj za širenje prsline

Sa slike 149 uočavaju se izrazito visoke prosečne vrednosti efikasnosti energije širenja prsline za uzorke BA 1.3 ($285 \pm 72,7\%$) i BA 1.2 ($280 \pm 44,6\%$), što ukazuje na izvanrednu sposobnost rasipanja energije unutar zone mešanja tokom faze širenja loma. Ovakav rezultat je u direktnoj vezi sa SEM fraktografijom, koja je kod ovih uzoraka pokazala izrazito razućenu topografiju loma sa dubokim jamicama. Rafinisano zrno unutar zone mešanja stvara gustu mrežu granica koje primoravaju prslinu na stalno skretanje i grananje (*engl.* Crack deflection i crack branching), čime se efektivno usporava njeno napredovanje kroz uzorak [163]. Prema literaturi [5], ovakvo ponašanje je karakteristično za ZTM spojeve kod kojih je postignuta visoka homogenost. Ipak, treba napomenuti da seriju BA prati i znatno rasipanje rezultata (npr. uzorak BA 2.1 sa $263 \pm 95\%$), što ukazuje na osetljivost mehanizma širenja prsline na lokalne mikrostrukturne nehomogenosti.

Nasuprot tome, uzorci zavareni pomoću konvencionalnog alata (KA) u većini slučajeva pokazuju nižu apsolutnu efikasnost energije širenja prsline, ali je ona praćena znatno višom stabilnošću (KA 1.1 iznosi $136 \pm 1,8\%$, a KA 1.3 je $123 \pm 6,3\%$). Izuzetak u ovoj seriji predstavlja uzorak KA 2.3, koji ostvaruje značajno višu efikasnost od $200 \pm 11,3\%$.

Usled prisustva defekta u korenu spoja, naponsko polje ispred vrha prsline postaje toliko intenzivno da preostali noseći poprečni presek popušta uz minimalnu plastičnu deformaciju. Ovu pojavu potvrđuju i SEM snimci „ravne“ morfologije loma kod KA serije, koji nedvosmisleno ukazuju na to da koncentracija napona oko defekta nadjačava sposobnost materijala da potroši energiju [152].

5.5 Mapiranje mikrotvrdoće

Kod legura serije 6xxx (koje ojačavaju starenjem – izdvajanjem taloga), očekuje se da profil tvrdoće kroz spoj prvenstveno prati promenu vrste i tipa taloga, a u manjoj meri i promenu veličine zrna uzrokovanu termičko-deformacionim ciklusom kroz koji prolazi materijal tokom zavarivanja. U literaturi [154] o ZTM aluminijumskih legura pokazano je da se minimum tvrdoće tipično javlja u ZUT/ZTMU, jer su tu temperature dovoljno visoke da izazovu delimično rastvaranje taloga, nasuprot tome, u grumenu (zoni mešanja) može doći do potpunog rastvaranja taloga [154,164].

Mape mikrotvrdoće (slika 130 i 131) konzistentno prikazuju karakterističan trend koji podseća na latinično slovo W, koji je u naučnoj literaturi prepoznat kao indikator gradijenta termičkog uticaja u ZTM spojevima [165]. Ujednačenost tvrdoće u zoni grumena, koji je posebno izražen kod uzorka BA 1.2, može se pripisati „sinergijskom efektu“ ekstremno fine rekristalizovane strukture zrna ($G = 10$) i delimičnog ponovnog taloženja sekundarnih faza nakon dostizanja temperature blizu solidus linije. Istraživanja [166] ukazuju na to da dinamička rekristalizacija u grumenu može delimično kompenzovati gubitak tvrdoće nastao rastvaranjem taloga tokom procesa zavarivanja, što potvrđuju rezultati gde BA serija zadržava viši nivo stabilnosti u centru spoja u odnosu na KA seriju.

Kritični aspekti integriteta spoja identifikovani su u zonama minimalne tvrdoće unutar ZUT – a, gde vrednosti padaju ispod 50 HV [167,168]. Ova "meka mesta" su posledica koalescencije ojačavajućih faza, čime se stvara metalurška nehomogenost koja deluje kao mesto lokalizacije plastične deformacije pri zatezanju [169]. Upoređujući dve primenjene konfiguracije alata, uočava se da bobin alat (BA) uzrokuje znatno ujednačenija (simetričnija) polja tvrdoće [9,77,164]. Ova vertikalna homogenost je direktna posledica simultanog unosa toplote putem dva ramena, čime se minimizuje termički gradijent po debljini ploče, što je ključna prednost u odnosu na konvencionalni alat gde je unos energije asimetričan i fokusiran na gornju površinu [9].

Posebno je značajna korelacija između mapa tvrdoće i korozone postojanosti. Heterogenost polja tvrdoće kod uzoraka KA serije podudara se sa širim zonama korozionog oštećenjima viđenim na SEM snimcima. To sugerise da oštri gradijenti mikrotvrdoće na granici ZTMU i grumena favorizuju uspostavljanje mikro – galvanskih parova [112,119,143]. Kod uzorka BA 1.2, gde je gradijent tvrdoće blaži i polje homogenije, koroziono oštećenje je ostalo uglavnom lokalizovano u vidu piting korozije, čime je dokazano da optimizacija parametara bobin alata ne doprinosi samo mehaničkoj, već i elektrohemijskoj stabilnosti sistema [142].

5.6 Ispitivanje korozone postojanosti

Elektrohemijska stabilnost zavarenih spojeva izrađenih od legure aluminijuma serije 6XXX u agresivnom medijumu (3,5% NaCl) predstavlja kompleksnu funkciju metalurškog stanja i lokalne mikrostrukture. Analiza Tafelovih krivih i morfologije površine nakon testiranja (slike 141÷143) ukazuje na to da ZTM proces ne menja samo mehaničke osobine, već i termodinamički afinitet materijala ka koroziji [119]. Osnovni materijal (OM) u stanju T66 pokazuje karakterističnu kristalografsku piting koroziju (engl. *Crystallographic pitting*), gde se na SEM snimcima uočavaju stepenaste strukture nastale selektivnim rastvaranjem aluminijumske matrice duž preferencijalnih kristalografskih ravni. Prema literaturi [170], ovakav vid korozije kod 6XXX serije je diktiran rasporedom primarnih intermetalnih faza (kao

npr. Mg_2Si), koje deluju kao katodna mesta u odnosu na anodnu aluminijumsku matricu [112,114,143].

Upotrebom bobin alata (uzorak BA 1.2) rezultiralo je značajnom promenom mehanizma nastanka korozionog oštećenja, odnosno izgleda korozije (*engl. Corrosion signature*). SEM analiza otkriva prelazak na lokalizovani pitting sa specifičnom poroznom morfologijom. Ova transformacija je direktna posledica usitnjavanja zrna ($G = 10$) u zoni grumena [143]. Prema Argadu i ostalim [80], visoka gustina granica zrna kod ultra – sitnozrnih legura aluminijuma može favorizovati formiranje homogenijeg i stabilnijeg pasivnog sloja, ali istovremeno nudi i više puteva za interkristalnu difuziju elektrolita, što objašnjava pojavu dubokih, lokalizovanih jama u zoni mešanja materijala [119].

Nasuprot tome, uzorci zavareni pomoću konvencionalnog alata pokazuju nižu korozionu stabilnost (u odnosu na spojeve zavarene pomoću bobin alata), sa široko rasprostranjenim i agresivnim napadom koji zahvata gotovo čitavu ispitivanu površinu. Ovakvo ponašanje se poklapa sa heterogenošću mikrotvrdoće i prisustvom diskontinuiteta u korenu spoja. Fizički defekti u korenu (tuneli) kod KA uzoraka mogu delovati kao mesta za zadržavanje elektrolita, i nastanka korozije u zazoru (*engl. Crevice corrosion*), čime se uspostavlja autokatalitički proces unutar defekta, što drastično ubrzava propadanje spoja [171]. Uočena korelacija između mapa mikrotvrdoće i SEM snimaka korodiranih površina ukazuje da zone sa najnižom tvrdoćom (ZUT), usled izdvajanja krupnijih i nekoherentnih faza na granicama zrna, predstavljaju najosetljivija mesta za galvansko koroziono oštećenje [171,172]. Na osnovu rada Busketa i ostalih [173], potvrđuje se da optimizacija termičkog ciklusa putem bobin alata omogućava postizanje povoljnog balansa između sitnozrne strukture i uniformne distribucije taloga, čime se minimizuje potencijalna razlika između zona zavara i postiže bolja ukupna elektrohemijska postojanost u poređenju sa konvencionalnim ZTM postupkom.

6. Zaključci

Na osnovu iznesenih rezultata i diskusije, mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Bobin alat (dvostrani alat) za ZTM ima generalno kraći radni vek u odnosu na konvencionalni ZTM alat, s obzirom na lom alata kod uzorka BA 2.3. Razlog ovome je složenije i manje povoljno naponsko stanje koje deluje na bobin alat (zatezanje trna uz istovremenu rotaciju i ciklično opterećenje), što pogoduje pojavi zamornog loma. Sa druge strane, konvencionalni alat za ZTM je opterećen uglavnom na pritisak.
2. Makrostruktura zavarenih spojeva ima karakterističan oblik. Spojevi zavareni pomoću bobin alata imaju latiničnog slova „X“ (oblik peščanog sata), a spojevi zavareni pomoću konvencionalnog alata za ZTM imaju oblik slova „V“. Razlika ova dva oblika proističe iz same geometrije alata i unosa toplote od strane istog.
3. U slučaju primene bobin alata, uzorak BA 1.2 je jedini koji nema defekte u svojoj zapremini i jedini zadovoljava B nivo prihvatljivosti prema standardu ISO 25239-5:2020 [53]. To ukazuje da su parametri zavarivanja od $1120 \text{ }^\circ/\text{min}$ i pomaka od $20 \text{ mm}/\text{min}$ najpovoljniji za dobijanje spojeva bez defekata. Ostali spojevi iz BA serije zadovoljavaju nivo prihvatljivosti C prema standardu ISO 25239-5:2020 [53], a koji se odnosi na dimenzije defekata (tunela).
4. Uzorci iz serije KA, dobijeni konvencionalnim alatom, zadovoljavaju samo nivo prihvatljivosti D prema standardu ISO 25239-5:2020 [53], koji se odnosi na posebno propisane granice vezane za dizajn spoja.
5. Mikrostruktura zavarenih spojeva se razlikuje prema krupnoći zrna u grumenu i ZTMU. Naime, spojevi zavareni pomoću bobin alata imaju finiju mikrostrukturu ($G=10$) u odnosu na uzorke zavarene konvencionalnim alatom ($G=9,5$). ZTMU, uzorci zavareni pomoću bobin alata imaju finiju mikrostrukturu ($G=8,5$) u odnosu na uzorke zavarene pomoću konvencionalnog alata za ZTM ($G=8$). S druge strane, krupnoća zrna u ZUT-u je ujednačena kod obe grupe uzoraka. Ova razlika u veličini zrna se odražava i na mehaničke osobine spojeva.
6. Spojevi zavareni pomoću bobin alata imaju generalno bolje zatezne karakteristike. Postižu do 76% efikasnosti spoja po zateznoj čvrstoći, sa druge strane, spojevi zavareni pomoću konvencionalnog alata imaju efikasnost do 73%. Ova relativno mala razlika se može pripisati finijoj mikrostrukтури koja se dobija prilikom upotrebe bobin alata.
7. Spojevi zavareni pomoću bobin alata imaju bolju efikasnost po procentualnom izduženju spoja. Postignuta je efikasnost od 66% kod uzorka BA 1.2 dok je efikasnost uzorka KA 1.2 samo 39%. Ova pojava se može pripisati finijoj mikrostrukтури spoja koja se dobija dinamičkom rekristalizacijom kod upotrebe bobin alata.

8. Efikasnost spoja po procentualnom suženju preseka ukazuje na jasnu razliku u stabilnosti procesa. Dok upotreba konvencionalnog alata (KA) obezbeđuje visoku ujednačenost i rezultata, serija zavarena bobin alatom (BA) pokazuje izraženu procesnu nestabilnost i znatna rasipanja. Pored toga, kod obe grupe alata zabeležen je drastičan skok duktilnosti, pri čemu se ističe uzorak BA 1.2 sa maksimalnom efikasnošću od 216%. Ovakvo, više nego dvostruko povećanje plastičnosti u odnosu na osnovni materijal, direktna je posledica intenzivnog termomehaničkog uticaja alata i usitnjavanja zrna usled dinamičke rekristalizacije u zoni mešanja i odsustva defekata.
9. Uzorci zavareni pomoću bobin alata imaju i bolje savojne karakteristike kako pri savijanju preko lica, tako i preko korena spoja. Sa druge strane, prilikom savijanja uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata dolazilo je do pojave prsline pri relativno malim uglovima (dijapazon $9,5^{\circ}$ – 20°).
10. Prilikom određivanja energije udara na instrumentiranom Šarpijevom klatnu postignut je vrlo dobar rezultat u domenu žilavosti. Efikasnost spoja po energiji nastanka prsline iznosi 335%, po efikasnosti energije širenja prsline 280%, dok je efikasnost po ukupnoj energiji udara 295% (uzorak BA 1.2). Ovo dokazuje da finostrukturna mikrostruktura drastično podiže energetska barijeru i pruža snažan otpor širenju prsline kroz mehanizme skretanja i grananja prsline. Od mehaničkih osobina, prednost bobin u odnosu na konvencionalni alat je najizraženija u pogledu energije udara.
11. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzoraka zavarenih pomoću bobin alata su potvrdili da je postignuto homogenije polje tvrdoće u poprečnom preseku u poređenju sa konvencionalnim ZTM alatom, čime je smanjen rizik od ekstremne lokalizacije deformacije. Ovo je posledica ravnomernijeg unosa toplote sa obe strane kod bobin alata, umesto sa samo jedne strane kod konvencionalnog alata.
12. Rezultati Tafelovih kriva i SEM analize nakon korozije ukazuju na promenu mehanizma korozionog oštećenja. Osnovni materijal trpi opštu koroziju. S druge strane, kod uzoraka zavarenih bobin alatom, odnosno uzoraka BA 1.2 dolazi do prelaza na piting koroziju koja je značajno lokalizovana. Fina disperzija faza i dinamički rekristalizovana zrna pri zavarivanju bobin alatom, smanjuju galvanske razlike, čime se značajno unapređuje koroziona postojanost spoja u agresivnim sredinama.
13. Spojevi zavareni konvencionalnim alatom takođe pokazuju poboljšanu korozionu postojanost u odnosu na osnovni materijal. Međutim, nepotpun provar spoja i nešto grublja mikrostruktura grumenata ($G=9,5$) u poređenju sa spojevima zavarim pomoću bobin alata ($G=10$) rezultuje simultanom manifestacijom piting korozije i korozije u zazoru. Što negativno utiče na ukupni integritet spoja.

7. Reference

- [1] K. Weman, *Welding processes handbook*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003.
- [2] Jeff Grill, *History of Welding: A Welding Timeline*, 2024. <https://weldguru.com/welding-history/> (accessed August 21, 2024).
- [3] Why Welding is an Important Industry, <https://www.allstatecareer.edu/blog/skilled-trades/why-welding-is-an-important-industry.html> (accessed August 25, 2024).
- [4] A Quick History of Welding | The Crucible, <https://www.thecrucible.org/guides/welding-2/history/> (accessed August 21, 2023).
- [5] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng. R Reports* 50 (2005) 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>.
- [6] N. Kumar, W. Yuan, R.S. Mishra, *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*, Waltham, USA, 2015. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802418-8.00001-1>.
- [7] R.S. Mishra, M.W. Mahney, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007. <https://doi.org/10.1361/fswp2007p001>.
- [8] ESAB, *Technical Hand Book: Friction Stir Welding*, *Glob. Weld. Cut.* (2009) 1–45. <http://www.esab.com/global/en/education/tech-info-friction-stir-welding.cfm%5Cnwww.esab.com%5Cn13/04/2012>.
- [9] K. Fuse, V. Badheka, Bobbin tool friction stir welding: a review, *Sci. Technol. Weld. Join.* 24 (2019) 277–304. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1553655>.
- [10] S.S. Chaudhary, K.H. Bhavsar, A Review of Bobbin Tool Friction Stir Welding (FSW) Process, *Int. J. Sci. Technol. Eng.* 2 (2016) 630–633.
- [11] K.P. Mehta, V.J. Badheka, A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants, *Mater. Manuf. Process.* 31 (2016) 233–254. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025971>.
- [12] M. Mijajlović, D. Miličić, M. Đuranović, V. Grabulov, Ž. Aleksandar, M. Perović, Osnovni pojmovi kod postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem prema AWS D17.3/D17.3M:2010 i ISO 25239-1: 2011, *Zavar. i zavarene konstr.* 2 (2012) 61–68.
- [13] D.G. Mohan, C.S. Wu, A Review on Friction Stir Welding of Steels, *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)* 34 (2021). <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00655-3>.
- [14] M. Haghsheenas, A.P. Gerlich, Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 21 (2018) 130–148. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.02.008>.
- [15] F. Stir, W. Joints, A. Ghiasvand, S.M. Noori, W. Suksatan, J. Tomk, S. Memon, Effect of Tool Positioning Factors on the Strength of Dissimilar, (2022).
- [16] R. Prasad Mahto, S.K. Pal, Friction Stir Welding of Dissimilar Materials: An Investigation of Microstructure and Nano-Indentation Study, *J. Manuf. Process.* 55 (2020) 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.050>.
- [17] A. Živković, Uticaj geometrije alata za postupak FSW, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu (2010).
- [18] R. Singh, *Arc Welding Processes Handbook*, Scrivener Publishing, Beverly, USA, 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119819080>.
- [19] M. Mijajlović, Ž. Aleksandar, D. Miličić, I. Radisavljević, Uticaj parametara FSW postupka zavarivanja na kvalitet zavarenog spoja spoja aluminijumske legure 5052, 1–10.
- [20] M. Pecanac, Uticaj geometrije ramena alata na osobine zavarenih spojeva dobijenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem, Master rad, Univerzitet u Novom Sadu, 2017.
- [21] M. Pecanac, M. Dramicanin, P. Janjatovic, D. Labus Zlatanovic, D. Rajnović, L. Sidjanin, S. Balos, Uticaj geometrije ramena alata na osobine zavarenih spojeva dobijenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem, in: ETIKUM 2017, Novi Sad, 2017: pp. 97–100.
- [22] R.S. Mishra, R.S. Haridas, P. Agrawal, Friction stir-based additive manufacturing, *Sci. Technol. Weld. Join.* 27 (2022) 141–165. <https://doi.org/10.1080/13621718.2022.2027663>.
- [23] V. Palic, *Zavarivanje*, Fakultet tehnickih nauka, Novi Sad, 1987.
- [24] L. Sidjanin, K. Gerić, *Mašinski materijali - Skripta 1*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2014.
- [25] *Welding Process handbook*, in: *Weld. Process. Handb.*, Woodhead Publishing Ltd, 2003: p. 25.
- [26] Friction weltind technique, <https://pristkannan.blogspot.com/> (accessed August 22, 2023).
- [27] Friction Welding: Everything You Need to Know | Pierce Industries, <https://www.pierceindustries.com/resources/friction-welding-everything-need-know/> (accessed August 27, 2023).
- [28] M. Uzkut, B. Ünlü, S. Yilmaz, M. Akdağ, *Friction Welding And Its Applications In Today's World*, Sarajevo, 2010. <http://eprints.ibu.edu.ba/621/>.

- [29] ISO 25239-1:2020 Friction stirwelding - ALuminium; Part 1: Vocabulary
- [30] M.B. Đurđanović, M.M. Mijajlović, D.S. Milčić, D.S. Stamenković, Heat generation during friction stir welding process, *Tribol. Ind.* 31 (2009) 8–14.
- [31] D. Labus Zlatanovic, Friction stir spot welding of ultrathin sheets made of aluminium – magnesium alloy; Doktorska disertacija, University of Novi Sad, 2020.
- [32] M. Pecanac, D.L. Zlatanovic, N. Kulundzic, M. Dramicanin, Z. Lanc, M. Hadzistević, S. Radisic, S. Balos, Influence of Tool and Welding Parameters on the Risk of Wormhole Defect in Aluminum Magnesium Alloy Welded by Bobbin Tool FSW, *Metals (Basel)*. 12 (2022) 969. <https://doi.org/10.3390/met12060969>.
- [33] D. Sejani, W. Li, V. Patel, Stationary shoulder friction stir welding–low heat input joining technique: a review in comparison with conventional FSW and bobbin tool FSW, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 47 (2022) 865–914. <https://doi.org/10.1080/10408436.2021.1935724>.
- [34] J.P. Martin, Stationary Shoulder Friction Stir Welding, Woodhead Publishing Limited, 2013. <https://doi.org/10.1533/978-1-78242-164-1.477>.
- [35] X.W. Yang, T. Fu, W.Y. Li, Friction stir spot welding: A review on joint macro- and microstructure, property, and process modelling, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/697170>.
- [36] Z. Shen, X. Yang, S. Yang, Z. Zhang, Y. Yin, Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy, *Mater. Des.* 54 (2014) 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.021>.
- [37] M. Esmaily, N. Mortazavi, W. Osikowicz, H. Hindsefelt, J.E. Svensson, M. Halvarsson, J. Martin, L.G. Johansson, Bobbin and conventional friction stir welding of thick extruded AA6005-T6 profiles, *Mater. Des.* 108 (2016) 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.089>.
- [38] Z.Y. Ma, Friction stir processing technology: A review, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 39 A (2008) 642–658. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>.
- [39] H.A. Khan, J. Li, C. Shao, Analyses of Friction Stir Riveting Processes: A Review, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 139 (2017) 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.4036909>.
- [40] V.C. Shunmugasamy, E. Khalid, B. Mansoor, Friction stir extrusion of ultra-thin wall biodegradable magnesium alloy tubes — Microstructure and corrosion response, *Mater. Today Commun.* 26 (2021) 102129. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102129>.
- [41] M. Li, R. Wu, S. Cai, Z. Chang, Z. Wang, J. Chen, Experimental Investigation on Friction-Stir-Assisted Incremental Forming with Synchronous Bonding of Aluminum Alloy and Steel Sheets, *J. Mater. Eng. Perform.* 29 (2020) 750–759. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04600-8>.
- [42] D. Yi, T. Onuma, S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, Evaluation of heat input during friction stir welding of aluminium alloys, *Sci. Technol. Weld. Join.* 22 (2017) 41–46. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1183079>.
- [43] M. Habba, M. Ahmed, M. Seleman, A. EL-Nikhaily, An Analytical Model of Heat Generation for Friction Stir Welding Using Bobbin Tool Design, *J. Pet. Min. Eng.* 20 (2018) 1–5. <https://doi.org/10.21608/jpme.2019.37963>.
- [44] M. Pećanac, M. Dramicanin, P. Janjatovic, M. Ristic, D. Rajnović, L. Sidjanin, S. Balos, Influence of tool geometry on friction stir welding, in: 13th Int. Sci. Conf. MMA 2018 Flex. Technol., Novi Sad, 2018: pp. 267–269.
- [45] D. Labus Zlatanovic, S. Balos, J. Bergmann, S. Rasche, M. Pecanac, S. Goel, Influence of Tool Geometry and Process Parameters on the Properties of Friction Stir Spot Welded Multiple (AA 5754 H111) Aluminium Sheets, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1157. <https://doi.org/10.3390/ma14051157>.
- [46] R.A. Gite, P.K. Loharkar, R. Shimpi, Friction stir welding parameters and application: A review, *Mater. Today Proc.* 19 (2019) 361–365. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.613>.
- [47] K. Solar, Uticaj Parametara Zavarivanja Trenjem Sa Mešanjem Samopodesivim Alatom Na Efikasnost Spoja, Master rad, Univerzitet u novom Sadu, 2021. <https://doi.org/10.24867/17am09solar>.
- [48] Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063, *Metall. Mater. Trans. A* 33 (2002) 625–635. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0124-3>.
- [49] H.J. Liu, J.C. Hou, H. Guo, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Mater. Des.* 50 (2013) 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.105>.
- [50] A.J. Leonard, Microstructure and aging behaviour of FSW in Al alloys 2014A-T651 and 7075-T651, in: *Nd Int. Symp. FSW*, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [51] M. Elyasi, H.A. Derazkola, M. Hosseinzadeh, Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 230 (2016) 1234–1241. <https://doi.org/10.1177/0954405416645986>.

- [52] A. Forcellese, M. Martarelli, M. Simoncini, Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 85 (2016) 595–604. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7957-6>.
- [53] ISO 25239-5:2020, Friction stir welding — Aluminium, Part 5: Quality and inspection requirements, (2020).
- [54] FSW-TECH ERASMUS, Friction Stir Welding Handbook, Erasmus+ (2017) 72.
- [55] N.T. Moghaddam, A. Rabiezadeh, A. Khosravifard, L. Ghalandari, Self-Reacting Friction Stir Welding of Al–Zn–Mg Aluminum Alloy, *Arab. J. Sci. Eng.* 47 (2022) 9085–9098. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06531-5>.
- [56] S. Balos, L. Sidjanin, D. Rajnović, V. Vučić, Zavarivanje trenjem sa mešanjem friction stir welding, 66–72.
- [57] G.Q. Wang, Y.H. Zhao, Y.Y. Tang, Research Progress of Bobbin Tool Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Review, *Acta Metall. Sin. (English Lett.)* 33 (2019) 13–29. <https://doi.org/10.1007/s40195-019-00946-8>.
- [58] A. Meilinger, I. Torok, the Importance of Friction Stir Welding Tool, *Prod. Process. Syst.* 6 (2013) 25–34.
- [59] V. Jaiganesh, P. Sevel, A detailed investigation on the role of different Tool Geometry in Friction Stir Welding of various Metals & their Alloys, *Int. Colloq. Mater. Manuf. Metrol.* (2014) 4. <https://www.researchgate.net/publication/268578110>.
- [60] L. V. Kamble, S.N. Soman, Influence of bobbin tool design on quality of welds made by FSW of aluminium alloys, *Mater. Today Proc.* 18 (2019) 5177–5184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.516>.
- [61] K. Fuse, V. Badheka, Effect of shoulder diameter on bobbin tool friction stir welding of AA 6061-T6 alloy, *Mater. Today Proc.* 42 (2020) 810–815. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.366>.
- [62] Y.X. Huang, L. Wan, S.X. Lv, J.C. Feng, Novel design of tool for joining hollow extrusion by friction stir welding, *Sci. Technol. Weld. Join.* 18 (2013) 239–246. <https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000096>.
- [63] W.M. Thomas, C.S. Wiesner, D.J. Marks, D.G. Staines, Conventional and bobbin friction stir welding of 12% chromium alloy steel using composite refractory tool materials, *Sci. Technol. Weld. Join.* 14 (2009) 247–253. <https://doi.org/10.1179/136217109X415893>.
- [64] P.L. Threadgill, M.M.Z. Ahmed, J.P. Martin, J.G. Perrett, B.P. Wynne, The use of bobbin tools for friction stir welding of aluminium alloys, *Mater. Sci. Forum* 638–642 (2010) 1179–1184. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1179>.
- [65] M. Hasieber, M. Kranz, T. Löhn, M. Grätzel, A. Zemlicka, J.P. Bergmann, Effect of friction stir welding tool hardness on wear behaviour in friction stir welding of AA-6060 T66, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 236 (2022) 1333–1345. <https://doi.org/10.1177/14644207211073055>.
- [66] J.P. Bergmann, T. Löhn, M. Pećanac, Neformalni razgovor između prof. dr Jean Pierre Bergmann, Torsten Löhn i Milan Pećanac, (2022).
- [67] M. Pecanac, M. Dramicanin, P. Janjatovic, D. Labus-Zlatanovic, D. Rajnović, L. Sidjanin, S. Baloš, Ručno-elektrolučno zavarivanje rutilnom elektrodom sa modifikovanom oblogom, in: ETIKUM 2017, Novi Sad, 2017: pp. 93–96.
- [68] 3-Axis CNC Machining Center (Friction stir welding machine) - China Cnc Machining Center and Machining Center, <https://fssdkingtool.en.made-in-china.com/product/IBQnieOFAgcl/China-3-Axis-CNC-Machining-Center-Friction-stir-welding-machine-.html> (accessed May 25, 2023).
- [69] Robotic friction stir welding | KUKA AG, <https://www.kuka.com/en-ca/products/production-systems/manufacturing-cells/robotic-friction-stir-welding> (accessed May 25, 2023).
- [70] Y. Sun, W. Liu, Y. Li, W. Gong, C. Ju, The Influence of Tool Shape on Plastic Metal Flow, Microstructure and Properties of Friction Stir Welded 2024 Aluminum Alloy Joints, *Metals (Basel)*. 12 (2022) 408. <https://doi.org/10.3390/met12030408>.
- [71] R. Fonda, Development of grain structure during friction stir welding, *Scr. Mater.* 51 (2004) 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.04.017>.
- [72] A. Masoudian, A. Tahaei, A. Shakiba, F. Sharifianjazi, J.A. Mohandesi, Microstructure and mechanical properties of friction stir weld of dissimilar AZ31-O magnesium alloy to 6061-T6 aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)* 24 (2014) 1317–1322. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63194-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63194-0).
- [73] S. Balos, D. Labus Zlatanovic, N. Kulundzic, P. Janjatovic, M. Dramicanin, Z. Lanc, M. Hadzistevic, S. Radisic, D. Rajnovic, M. Pecanac, Influence of Tool–Base Metal Interference on the Performance of an Aluminium–Magnesium Alloy Joined via Bobbin Tool Friction Stir Welding, *Metals (Basel)*. 13 (2023) 1215. <https://doi.org/10.3390/met13071215>.

- [74] F.F. Wang, W.Y. Li, J. Shen, S.Y. Hu, J.F. dos Santos, Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy, *Mater. Des.* 86 (2015) 933–940. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.096>.
- [75] L. Zhou, G.H. Li, C.L. Liu, J. Wang, Y.X. Huang, J.C. Feng, F.X. Meng, Microstructural characteristics and mechanical properties of Al–Mg–Si alloy self-reacting friction stir welded joints, *Sci. Technol. Weld. Join.* 22 (2017) 438–445. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1251733>.
- [76] J.C. Hou, H.J. Liu, Y.Q. Zhao, Influences of rotation speed on microstructures and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy joints fabricated by self-reacting friction stir welding tool, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73 (2014) 1073–1079. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5857-9>.
- [77] W.Y. Li, T. Fu, L. Hütsch, J. Hilgert, F.F. Wang, J.F. dos Santos, N. Huber, Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31, *Mater. Des.* 64 (2014) 714–720. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.023>.
- [78] H. Zhang, M. Wang, X. Zhang, G. Yang, Microstructural characteristics and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 2A14-T6 aluminum alloy, *Mater. Des.* 65 (2015) 559–566. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.068>.
- [79] S. Krall, C. Baumann, H. Aigiwal, F. Bleicher, F. Pfefferkorn, INVESTIGATION OF MULTILAYER COATING OF EN AW 6060 – T66 USING FRICTION SURFACING, *J. Mach. Eng.* 22 (2022) 44–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.36897/jme/147502>.
- [80] G.R. Argade, S.K. Panigrahi, R.S. Mishra, Corrosion behavior of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Corros. Sci.* 58 (2012) 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.01.034>.
- [81] Q. Wen, W. Li, V. Patel, Y. Gao, A. Vairis, Investigation on the Effects of Welding Speed on Bobbin Tool Friction Stir Welding of 2219 Aluminum Alloy, *Met. Mater. Int.* 26 (2020) 1830–1840. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00450-9>.
- [82] M.M.Z. Ahmed, M.M.E.S. Seleman, R.G. Eid, I. Albaijan, K. Touileb, The Influence of Tool Pin Geometry and Speed on the Mechanical Properties of the Bobbin Tool Friction Stir Processed AA1050, *Materials (Basel)*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15134684>.
- [83] M. Pećanac, D. Labus Zlatanovic, N. Kulundzic, M. Dramicanin, P. Janjatovic, M. Trivković, D. Rajnović, S. Baloš, L. Šidjanin, Influence of Shoulder pinching gap on mechanical properties of the bobbin tool FSW welded joints, in: 39th Int. Conf. Prod. Eng. Serbia, Novi Sad, Srbija, 2023: pp. 88–93. https://www.researchgate.net/publication/375525294_INFLUENCE_OF_SHOULDER_PINCHING_GAP_ON_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_THE_BOBBIN_TOOL_FSW_WELDED_JOINTS.
- [84] S.J. Chen, A.L. Lu, D.L. Yang, S. Lu, J.H. Dong, C.L. Dong, Analysis on flow pattern of bobbin tool friction stir welding for 6082 aluminum, *Proc. 1st Int. Jt. Symp. Join. Weld.* (2013) 353–358. <https://doi.org/10.1533/978-1-78242-164-1.353>.
- [85] J. Hilgert, L.L. Hütsch, J.F. Santos, N. Huber, Material Flow around a Bobbin Tool for Friction Stir Welding, *COSMOL Conf 2010 Paris* (2010) 4152.
- [86] K.J. Colligan, A.K.O. Donnell, J.W. Shevock, M.T. Smitherman, G.J. Hostetter, Friction Stir Welding of Thin Aluminum Using Fixed Gap Bobbin Tools Weld, 9th Int. FSW Symp. (2012) 15–17.
- [87] J. Hilgert, Knowledge Based Process Development of Bobbin Tool Friction Stir Welding, *Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH*, 2012.
- [88] K. Warsinski, M. West, J. Freeman, T. Curtis, Investigation of Lazy S Feature in Self-reacting Tool Friction Stir Welds, in: *Frict. Stir Weld. Process. VI*, Wiley, 2011: pp. 171–176. <https://doi.org/10.1002/9781118062302.ch21>.
- [89] A. Tamadon, D.J. Pons, K. Sued, D. Clucas, Formation mechanisms for entry and exit defects in bobbin friction stir welding, *Metals (Basel)*. 8 (2018) 1–22. <https://doi.org/10.3390/met8010033>.
- [90] M.M.Z. Ahmed, K. Touileb, M.M. El-Sayed Seleman, I. Albaijan, M.I.A. Habba, Bobbin Tool Friction Stir Welding of Aluminum: Parameters Optimization Using Taguchi Experimental Design, *Materials (Basel)*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15082771>.
- [91] M. Kopyściański, S. Dymek, C. Hamilton, A. Węglowska, I. Kalembe-Rec, Microstructural Characterization of Friction Stir Welds of Aluminum 6082 Produced with Bobbin Tool, *Materials (Basel)*. 17 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17194738>.
- [92] Friction Stir Welding In The Shipbuilding Industr, (n.d.). <https://taberextrusions.com/friction-stir-welding-in-the-shipbuilding-industry/> (accessed July 3, 2023).
- [93] R.J.H. Wanhill, Aerospace Applications of Aluminum-Lithium Alloys, in: *Aluminum-Lithium Alloy. Process. Prop. Appl.*, Elsevier Inc., Emmeloord, The Netherlands, 2013: pp. 503–535. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401698-9.00015-X>.
- [94] Worldwide aluminum consumption forecast 2029 | Statista, <https://www.statista.com/statistics/863681/global-aluminum-consumption/> (accessed April 6, 2023).
- [95] H. Alamdari, Aluminium production process: Challenges and opportunities, *Metals (Basel)*. 7 (2017) 5–7. <https://doi.org/10.3390/met7040133>.

- [96] R. Cobden, A. Banbury, Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys, Talal (1994) 60. <https://doi.org/1994>.
- [97] W.D.J. Callister, D.G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [98] K.A. AlSaffar, L.M.H. Bdeir, Recycling of Aluminum Beverage Cans, J. Eng. Technol. 12 (2008) 157–163.
- [99] D.S. Wong, P. Lavoie, Aluminum: Recycling and Environmental Footprint, Jom 71 (2019) 2926–2927. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03656-9>.
- [100] E.L. Bray, Aluminum, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022.
- [101] C. Windmark, L. Lattanzi, A. Månberger, A.E.W. Jarfors, Investigation on Resource-Efficient Aluminium Recycling - A State of the Art Review, Adv. Transdiscipl. Eng. 21 (2022) 15–27. <https://doi.org/10.3233/ATDE220122>.
- [102] J.R. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, in: Alloy. Underst. Basics, ASM International, 2001: pp. 746–749. <https://doi.org/https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976>.
- [103] European Aluminium Association, Materials – Designation system, Alum. Automot. Man. (2002) 1–12.
- [104] EN 573-1:2004 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 1: Numerical designation system.
- [105] The Aluminum Association, (n.d.). <https://www.aluminum.org/> (accessed April 17, 2025).
- [106] V.K. Soo, J.R. Peeters, P. Compston, M. Doolan, J.R. Dufloy, Economic and environmental evaluation of aluminium recycling based on a belgian case study, Procedia Manuf. 33 (2019) 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.080>.
- [107] EN 515:2017 Aluminium and aluminium alloys - Wrought products - Temper designations, (2017) 30.
- [108] M.N. Amado, F. Daroqui, Revision of The Solvus Limit of Al-Mg₂Si Pseudo Binary Phase Diagram, Procedia Mater. Sci. 8 (2015) 1079–1088. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.171>.
- [109] E. Fahri Ozdogru, The Effect of Chemical Composition on EN AW 6XXX Series Aluminum Alloys, in: Recent Adv. Alum. Alloy., 2023: pp. 1–15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110218>.
- [110] EN 485-2:2016, Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate - Part 2: Mechanical properties, (2016) 108. <http://www.aluminiosigma.com/d/files/biaozhun/bs-en-00485-2-2016.pdf>.
- [111] Understanding Aluminum Corrosion, <https://www.corrosionpedia.com/understanding-aluminum-corrosion/2/6954> (accessed February 28, 2025).
- [112] B. Grgur, Korozija i zaštita, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Beograd, 2020.
- [113] M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, National association of corrosion engineers, Huston, Texas, USA, 1974. <https://doi.org/10.5006/37502>.
- [114] The Corrosion Properties of Aluminum and Its Alloys, <https://www.corrosionpedia.com/the-corrosion-properties-of-aluminum-and-its-alloys/2/6541> (accessed February 28, 2025).
- [115] Aluminium Corrosion | 13 Types Explained | Fractory, <https://fractory.com/aluminium-corrosion/> (accessed February 28, 2025).
- [116] ASTM G44-21 Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5 % Sodium Chloride Solution, (2021).
- [117] Corrosion Assessment: 8 Corrosion Tests That Help Engineers Mitigate Corrosion, <https://www.corrosionpedia.com/corrosion-assessment-8-corrosion-tests-that-help-engineers-mitigate-corrosion/2/1389> (accessed February 28, 2025).
- [118] G. dos S. Vacchi, D.C.C. Magalhães, C.L. Kugelmeier, R. da Silva, A. de A. Mendes Filho, A.M. Kliauga, C.A. Della Rovere, Influence of Long-Term Immersion Tests on the Electrochemical Corrosion Behavior of an Ultrafine-Grained Aluminum Alloy, Metals (Basel). 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/met14121417>.
- [119] D. Luo, F. Li, G. Xing, Corrosion resistance of 6061-T6 aluminium alloy and its feasibility of near-surface reinforcements in concrete structure, Rev. Adv. Mater. Sci. 61 (2022) 638–653. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0048>.
- [120] Polarization Resistance, <https://www.corrosionpedia.com/definition/899/polarization-resistance> (accessed March 5, 2025).
- [121] S. Shrestha, Calculating Corrosion Rates From a Tafel Plot Making the next generation of electrochemistry instruments truly accessible worldwide, (2020) 1–4.
- [122] J.R. Galvele, Transport Processes and the Mechanism of Pitting of Metals, J. Electrochem. Soc. 123 (1976) 464–474. <https://doi.org/10.1149/1.2132857>.
- [123] M. Liang, R. Melchers, I. Chaves, Corrosion and pitting of 6060 series aluminium after 2 years exposure in seawater splash, tidal and immersion zones, Corros. Sci. 140 (2018) 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.05.036>.

- [124] M.M.Z. Ahmed, M.I.A. Habba, M.M. El-Sayed Seleman, K. Hajlaoui, S. Ataya, F.H. Latief, A.E. El-Nikhaily, Bobbin tool friction stir welding of aluminum thick lap joints: Effect of process parameters on temperature distribution and joints' properties, *Materials* (Basel). 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14164585>.
- [125] ISO 14707:2021 Surface chemical analysis - Glow discharge optical emission spectrometry (GD-OES), (2021) 19.
- [126] ISO 6892-1:2019 Metallic materials — Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature.
- [127] ISO 4957:2018 - Tool Steels, (2018).
- [128] ISO 14707:2021 Metallic materials — Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature.
- [129] S. Balos, L. Sidjanin, M. Dramicanin, D.L. Zlatanovic, A. Antic, FSW welding of Al-Mg alloy plates with increased edge roughness using square pin tools of various shoulder geometries, *Mater. Tehnol.* 50 (2016) 387–394. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.088>.
- [130] H. Šuman, Metalografija, Zavod za izdavanje udžbenika, Beograd, 1962.
- [131] LectroPol 5, (n.d.). http://www.minsks.com.cn/admin_djkhksdflkj435kljadlk/updown/UploadFile/2010-02/201002271045384504.jpg (accessed May 5, 2025).
- [132] ISO 4136:2022 - Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test, (2013) 1–20.
- [133] EN ISO 5173:2009 Destructive tests on welds in metallic materials.
- [134] DuraScan507080, <https://ww1.prweb.com/prfiles/2009/11/18/1030264/DuraScan507080.jpg> (accessed May 5, 2024).
- [135] ISO 148-1:2016 Metallic materials — Charpy pendulum impact test Part 1: Test method.
- [136] ASTM E112 - 13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [137] O.A. Hilders, N.D. Peña, M. Ramos, L. Sáenz, L. Berrío, R.A. Caballero, A. Quintero, Stress Triaxiality Dimple Fracture Morphology and Fractal Dimension Relations for Several Aluminum Alloys, *Mater. Sci. Forum* 396–402 (2002) 1321–1328. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.396-402.1321>.
- [138] L.Y. Kou, W.Y. Zhao, X.Y. Tuo, G. Wang, C.R. Sun, Effect of stress triaxiality on fracture failure of 6061 aluminium alloy, *J. Mech. Eng. Sci.* 14 (2020) 6961–6970. <https://doi.org/10.15282/JMES.14.2.2020.33.0545>.
- [139] D.A. Jones, Principles and prevention of corrosion, New Jersey, 1996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.encep.2012.03.001>.
- [140] Gamry instruments, Getting Started with Electrochemical Corrosion Measurement Introduction, *Acta Math. Hungarica* <https://doi.org/10.1007/BF01903685>.
- [141] Metrohm Autolab, Application Area : Corrosion Electrochemical Corrosion Studies of Various Metals, *Corrosion* (2019) 1–11.
- [142] C. Zhitong, L. Shengxi, H.H. Lloyd, Microstructure, mechanical properties and corrosion of friction stir welded 6061 Aluminum Alloy, (2015).
- [143] S. Sanket PANDA, Corrosion behavior of Friction stir welded aluminum alloys: A review, *J. Mater. Metall. Eng. Mater. Metall. Eng.* 9 (2019) 20–36. <https://doi.org/10.37591/jomme.v9i1.1156>.
- [144] W. Hosford, Mechanical Behaviour of MATERIALS, Second edi, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 2009.
- [145] M.M. Moradi, H.J. Aval, R. Jamaati, S. Amirkhanlou, S. Ji, Microstructure and texture evolution of friction stir welded dissimilar aluminium alloys: AA2024 and AA6061, *J. Manuf. Process.* 32 (2018) 1–10. <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/18604/2/FullText.pdf>.
- [146] R.W. Fonda, J.F. Bingert, Microstructural evolution in the heat-affected zone of a friction stir weld, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 35 A (2004) 1487–1499. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0257-7>.
- [147] A. Handbook, Fractography, ASM International, 2001. <http://books.google.com.hk/books?id=eC-Zt1J4oCgC>.
- [148] S. Kumar, S. Jambhale, M. Maurya, S. Kumar, S. Pandey, Evaluation of shear force and fractography of friction stir spot welded joints of AA 6082-T6 alloy, *J. Eng. Res.* 10 (2022) 124–144. <https://doi.org/10.36909/jer.10265>.
- [149] H. Mebarki, H. Fekirini, A. Moualid, A. Regad, M. Benguediab, Evaluating the Fracture Toughness of FSW AA3003 Alloy: A Dual Approach with EWF and J-Integral, *Strength Mater.* 57 (2025) 1290–1305. <https://doi.org/10.1007/s11223-026-00858-w>.
- [150] F.F. Wang, W.Y. Li, J. Shen, S.Y. Hu, J.F. dos Santos, Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al–Li alloy, *Mater. Des.* 86 (2015) 933–940. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.096>.
- [151] L. Zhou, G.H. Li, C.L. Liu, J. Wang, Y.X. Huang, J.C. Feng, F.X. Meng, Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 89 (2017) 3509–3516. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9318-5>.

- [152] Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, Effect of Tool Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded A6061 Aluminum Alloy, *Mater. Trans.* 47 (2006) 2948–2953.
- [153] C. Yang, D.R. Ni, P. Xue, B.L. Xiao, W. Wang, K.S. Wang, Z.Y. Ma, A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates, *Mater. Charact.* 145 (2018) 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.027>.
- [154] Friction stir welding of aluminium alloys - TWI, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-alloys> (accessed February 1, 2023).
- [155] A.I. Albannai, Review The Common Defects In Friction Stir Welding, *Int. J. Sci. Technol. Res.* 9 (2020) 316–329. www.ijstr.org.
- [156] Y.S. Sato, H. Takauchi, S.H.C. Park, H. Kokawa, Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050, *Mater. Sci. Eng. A* 405 (2005) 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.008>.
- [157] A. Alejo-Pinedo, A.A.M. da Silva, P.M.S.T. de Castro, Fracture toughness of 6082-T6 aluminum alloy friction stir welded joints, *Procedia Struct. Integr.* 2 (2016) 2901–2908.
- [158] S. Balos, L. Sidjanin, Effect of Tunneling Defects on the Joint Strength Efficiency Obtained With FSW, *Mater. Technol.* 48 (2014) 491–496. <http://mit.imt.si/izvodi/mit144/balos.pdf>.
- [159] Z. Liu, W. Guan, H. Li, D. Wang, L. Cui, Study on the relationship between welding force and defects in bobbin tool friction stir welding, *J. Manuf. Process.* 84 (2022) 1122–1132. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.069>.
- [160] S. Choudhary, S. Choudhary, S. Vaish, A.K. Upadhyay, A. Singla, Y. Singh, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 6061 aluminum alloy joints, *Mater. Today Proc.* 25 (2020) 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.466>.
- [161] M.M.Z. Ahmed, K.M. Elfaghi, S.A. Alkahtani, S.N. Aly, A comparative study on the microstructural and mechanical properties of conventional and self-support friction stir welding of Al 6082-T6 alloy, *Weld. World* 55 (2011) 30–37. <https://doi.org/10.1007/s40194-011-0021-x>.
- [162] N. Hansen, Hall–Petch relation and boundary strengthening, *Scr. Mater.* 51 (2004) 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>.
- [163] S. Suresh, Crack deflection: Implications for the growth of long and short fatigue cracks, *Metall. Trans. A* 14 (1983) 2375–2385. <https://doi.org/10.1007/BF02663313>.
- [164] A. Simar, Y. Bréchet, B. De Meester, A. Denquin, C. Gallais, T. Pardoen, Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties, *Prog. Mater. Sci.* 57 (2012) 95–183. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.003>.
- [165] D. Kuhlmann-Wilsdorf, Deformation bands, the LEDS theory, and their importance in texture development: Part II. Theoretical conclusions, *Metall. Mater. Trans. A* 30 (1999) 2391–2401. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0247-x>.
- [166] W. Woo, H. Choo, D.W. Brown, P.K. Liaw, Z. Feng, Texture and residual stress in friction stir welded 6061-T6 aluminum, *Mater. Sci. Eng. A* 437 (2006) 107–113.
- [167] D.M. Neto, P. Neto, Numerical modeling of friction stir welding process: A literature review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 65 (2013) 115–126. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4154-8>.
- [168] J.H. Zhu, Y.J. Chao, Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 2024-T3 aluminum, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44 (2004) 635–645. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.025>.
- [169] P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella, A. Squillace, Mechanical and microstructural properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 153 (2004) 482–487.
- [170] F. Gharavi, K.A. Matori, R. Yunus, N.K. Othoman, F. Fadaeifard, Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26 (2016) 684–696. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64159-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64159-6).
- [171] L.H. Zhou, H.J. Liu, P. Liu, Effect of grain size on the corrosion behavior of friction stir welded 7075-T651 aluminum alloy, *Corros. Sci.* 52 (2010) 2905–2910. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.035>.
- [172] M. Paunović, Корозиона стабилност и механичка својства завареног споја легуре алуминијума AA6082, Master rad, Univerzitet u Beogradu, 2021.
- [173] E. Bousquet, A. Poulon-Quintin, M. Puiggali, O. Devos, M. Touzet, Relationship between microstructure, temper and corrosion resistance for 2024 aluminium alloy friction stir welded joints, *Corros. Sci.* 53 (2011) 3026–3034. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.049>.

8. Prilozi

Prilog 1.1. Rezultati zateznih karakteristika prvog predeksperimenta

A2-1				A2-2			
R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	86.1	112.81	67.99	1	103.57	111.92	53.99
2	88.1	111.1	64.8	2	101.66	114.92	51.88
3	90.1	112.98	63.39	3	98.21	116.1	50.12
Sr. vred.	88	112	65	Sr. vred.	101	114	52
Std. dev.	2.0	1.0	2.4	Std. dev.	2.7	2.2	1.9
A2-3				A4-1			
R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	96.18	110.29	54.79	1	105.2	110.6	50.1
2	98.1	112.21	59.69	2	106.53	114.01	52.84
3	97.03	109.7	64.05	3	101.06	116.02	48.08
Sr. vred.	97	111	60	Sr. vred.	104	114	50
Std. dev.	1.0	1.3	4.6	Std. dev.	2.9	2.7	2.4
A4-2				A4-3			
R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	R. br	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	99.99	114.84	51.9	1	101.14	107.01	57.95
2	100.32	115	55.4	2	101.5	112.01	57.3
3	101.8	115.7	56.1	3	99.41	117.98	56.6
Sr. vred.	101	115	54	Sr. vred.	101	112	57
Std. dev.	1.0	0.5	2.3	Std. dev.	1.1	5.5	0.7

Prilog 1.2 Rezultati ispitivanja energije udara prvog predeksperimenta

A2-1				A2-2			
R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]	R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]
1	6,77	19,1	24,8	1	6,25	18,1	24
2	6,67	19,7	26,3	2	6,35	18,2	24,6
3	6,57	20,3	27,8	3	6,3	18,3	25,2
Sr. vred.	6,67	19,7	26,3	Sr. vred.	6,3	18,2	24,6
Std. dev.	0,10	0,60	1,50	Std. dev.	0,05	0,10	0,60
A2-3				A4-1			
R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]	R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]
1	5,77	15,9	21,9	1	6,92	20,8	27,3
2	4,17	15,5	20,7	2	7,02	20,9	28,3
3	4,97	15,7	20,1	3	7,12	20,7	27,8
Sr. vred.	4,97	15,7	20,9	Sr. vred.	7,0	20,8	27,8
Std. dev.	0,80	0,20	0,92	Std. dev.	0,10	0,10	0,50
A4-2				A4-3			
R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]	R. br	E _n [J]	E _s [J]	E _{uk} [J]
1	5,15	18,2	24,1	1	6,37	19,1	25,5
2	5,75	18,4	24,3	2	6,3	19	25,2
3	5,54	18,6	24,5	3	6,44	19,2	28,8
Sr. vred.	5,5	18,4	24,3	Sr. vred.	6,4	19,1	26,5
Std. dev.	0,30	0,20	0,20	Std. dev.	0,07	0,10	2,00

Prilog 1.2 Rezultati ispitivanja energije udara prvog predeksperimenta nastavak priloga 1.2

Osnovni materijal			
R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]
1	4,56	13,78	17,2
2	4,76	13,84	18,5
3	4,96	13,97	19,8
Sr. vred.	4,76	13,86	18,5
Std. dev.	0,20	0,10	1,30

Prilog 2.1. Rezultati zateznih karakteristika drugog predeksperimenta

Osnovni materijal			1			2		
R. br.	Rm [MPa]	A%	R. br.	Rm [MPa]	A%	R. br.	Rm [MPa]	A%
1	137	57,9	1	128,9	50,2	1	129	48,6
2	136,4	61,2	2	135,1	52,9	2	129,4	52,9
3	137,6	64,5	3	132	55,6	3	128,6	57,2
Sr. vred.	137	61,2	Sr. vred.	132	52,9	Sr. vred.	129	52,9
Std. dev.	0,60	3,30	Std. dev.	3,10	2,70	Std. dev.	0,40	4,30
3			4			5		
R. br.	Rm [MPa]	A%	R. br.	Rm [MPa]	A%	R. br.	Rm [MPa]	A%
1	188	34,2	1	133,8	50,8	1	85,3	28,6
2	186,1	41,9	2	138,2	53,7	2	85,3	28,6
3	189,9	49,6	3	136	56,6	3	125,8	36,7
Sr. vred.	188	41,9	Sr. vred.	136	53,7	Sr. vred.	99	31,3
Std. dev.	1,90	7,70	Std. dev.	2,20	2,90	Std. dev.	23,38	4,68

Prilog 2.2. Rezultati ispitivanja energije udara drugog predeksperimenta

1				2			
R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]
1	3,8	10,2	13,9	1	4,5	13,6	20,6
2	3,2	11,3	14,	2	6,3	13,9	18,7
3	3,3	9,8	15,5	3	4,	14,7	18,1
Sr. vred.	3,5	10,5	14,6	Sr. vred.	5,0	14,1	19,2
Std. dev.	0,33	0,77	0,86	Std. dev.	1,21	0,54	1,28
3				4			
R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]
1	8	12,7	20,3	1	10,5	17,9	26,7
2	7	12,5	21,1	2	8,9	18,5	27,1
3	7,2	14,6	20,5	3	9,2	18	28,2
Sr. vred.	7,4	13,3	20,7	Sr. vred.	9,6	18,2	27,4
Std. dev.	0,52	1,15	0,43	Std. dev.	0,86	0,33	0,77
5				Osnovni materijal			
R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	E_s [J]	E_{uk} [J]
1	7,8	15,6	23,4	1	4,5	13,7	19,8
2	7,9	15,9	22,8	2	4,9	13,9	17,6
3	8,2	16,7	26,3	3	4,6	13,7	18,1
Sr. vred.	8	16,1	24,2	Sr. vred.	4,7	13,8	18,5
Std. dev.	0,18	0,59	1,84	Std. dev.	0,21	0,12	1,2

Prilog 3.1. Rezultati zateznih karakteristika uzoraka zavarenih pomoću bobin alata

Osnovni materijal				BA 1.1			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	191	31,4	29,3	1	138	16,4	55,05
2	198	26,7	22,3	2	128	15,8	24,1
3	191	37,3	32,7	3	78	12,2	17,9
Sr. vred.	193	32	28	Sr. vred.	115	15	32
Std. dev.	4,04	5,28	5,27	Std. dev.	31,99	2,27	19,89
BA 1.2				BA 1.3			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	147	19,8	52,8	1	144	22,8	63,8
2	146	21	66	2	147	19,8	53,1
3	145	23,6	62	3	135	16,8	32,8
Sr. vred.	146	21	61	Sr. vred.	142	20	50
Std. dev.	0,86	1,94	6,92	Std. dev.	6,08	3	15,77
BA 2.1				BA 2.2			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	135	18	67,2	1	118	14	65,2
2	106	13	24,9	2	143	13,6	27,2
3	141	23,2	60,47	3	144	24,8	64,6
Sr. vred.	127	18	51	Sr. vred.	135	18	52
Std. dev.	18,37	5,1	22,73	Std. dev.	14,85	5,1	21,77

Prilog 3.2. Rezultati zateznih karakteristika uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata

Osnovni materijal				KA 1.1			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	191	31,4	29,3	1	126	8,5	46,4
2	198	26,7	22,3	2	138	7,1	42
3	191	37,3	32,7	3	127	9,6	35,9
Sr. vred.	193	32	28	Sr. vred.	131	8,5	41,5
Std. dev.	4,04	5,28	5,27	Std. dev.	6,79	1,25	5,3
KA 1.2				KA 1.3			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	139	12,1	43,7	1	135	10	56,8
2	138	9,5	57,8	2	132	7,8	59,8
3	136	15,3	58,6	3	139	8,1	56,4
Sr. vred.	138	12,4	53,4	Sr. vred.	135	8,7	57,7
Std. dev.	1,63	2,89	8,35	Std. dev.	3,44	1,2	1,84
KA 2.1				KA 2.2			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	140	13,6	57,5	1	138	7,2	54,7
2	141	13,5	51,8	2	138	11	56,4
3	139	15	58	3	135	11,5	59,2
Sr. vred.	140	14	55,8	Sr. vred.	137	9,9	56,8
Std. dev.	0,98	0,82	3,45	Std. dev.	1,96	2,34	2,25

3.2 Rezultati zateznih karakteristika uzoraka zavarenih pomoću konvencionalnog alata

KA 3.2			
R. br	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	134	13,5	59,3
2	144	12,5	56,7
3	141	11,4	58,1
Sr. vred.	139	12,5	58,1
Std. dev.	5,34	1,07	1,33

Prilog 3.3. Rezultati određivanja energije udara za spojeve zavarene pomoću bobin alata

Osnovni materijal				BA 1.1			
R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]	R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]
1	4	10,7	14,7	1	12,1	21,8	34
2	3,7	10,8	14,5	2	10,8	24,9	35,7
3	4,3	10,6	15	3	13,2	19,1	32,3
Sr. vred.	4,1	10,7	14,8	Sr. vred.	12,1	22	34
Std. dev.	0,32	0,07	0,25	Std. dev.	1,19	2,90	1,71
BA 1.2				BA 1.3			
R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]	R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]
1	13,7	30	43,6	1	12,2	30,6	42,7
2	14,8	34,9	49,6	2	9,1	22,8	31,9
3	12,4	25,3	37,7	3	15,1	38,5	53,6
Sr. vred.	13,6	30	43,7	Sr. vred.	12,1	30,6	42,8
Std. dev.	1,21	4,79	5,99	Std. dev.	3,01	7,81	10,82
BA 2.1				BA 2.2			
R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]	R. br	En [J]	Es [J]	Euk [J]
1	12,7	28,4	41	1	7,9	17,2	25,1
2	11,3	18	29,3	2	9,7	21,3	31
3	13,9	38,4	52,2	3	6,2	13	19,3
Sr. vred.	12,6	28,2	40,9	Sr. vred.	8	17,2	25,2
Std. dev.	1,28	10,2	11,48	Std. dev.	1,74	4,13	5,87

Prilog 3.4. Rezultati određivanja energije udara za konvencionalne ZTM zavarene spojeve

KA 1.1				KA 1.2			
R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]
1	6,7	14,6	21,3	1	8	13,4	21,4
2	7,3	14,7	22	2	8,8	15,4	24,3
3	6,1	14,3	20,4	3	7,1	11,2	18,4
Sr. vred.	6,7	14,6	21,3	Sr. vred.	8	13,3	21,4
Std. dev.	0,59	0,19	0,78	Std. dev.	0,85	2,11	2,96
KA 1.3				KA 2.1			
R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]
1	7,1	11,2	18,4	1	12	17,4	29,4
2	7,3	13,2	20,6	2	10	16,5	26,6
3	7,2	12,5	19,7	3	13,9	18,3	32,2
Sr. vred.	7,3	13,1	20,5	Sr. vred.	12	17,5	29,4
Std. dev.	0,15	0,94	1,1	Std. dev.	1,91	0,92	2,82
KA 2.2				KA 2.3			
R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]	R. br	E_n [J]	$E_{\dot{s}}$ [J]	E_{uk} [J]
1	8,8	14,6	23,4	1	10,3	21,5	31,9
2	8,2	13,8	22	2	11,3	22,7	34,1
3	9,4	15,5	24,9	3	9,4	20,3	29,7
Sr. vred.	8,8	14,7	23,5	Sr. vred.	10,4	21,5	31,9
Std. dev.	0,6	0,82	1,42	Std. dev.	0,98	1,21	2,19

*Karakteristike osnovnog materijala su iste kao iz priloga 3.3.

Prilog 4.1. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka BA 1.1

Y – osa [mm]											
4,50	4,05	3,60	3,15	2,70	2,25	1,80	1,35	0,90	0,45	0	
--	69,9	57,6	53	62,3	64,1	58,7	66,8	--	--	0,45	X osa [mm]
--	67	65,9	51,6	59,2	62,2	62,1	63,1	--	--	0,89	
--	63,7	64,3	50,4	56	60,6	54,3	63,1	--	--	1,34	
--	64,5	41,1	51,4	58,3	60,6	62	59,8	--	--	1,78	
58,6	58,4	53,9	51,5	55	61,8	58,3	60,1	--	--	2,23	
61,3	60	58,6	48,1	55	57,5	59,3	53,4	--	--	2,67	
50,3	52,7	49	44,1	47,3	53,1	54,1	51,4	--	--	3,12	
47,1	55,4	48,2	47,3	49,6	54,7	51,6	54	--	--	3,56	
43,9	52,8	44	41,5	48	49,2	47,3	49,3	--	--	4,01	
39,3	49,1	43,7	40,7	46,7	46,6	47	48,1	--	--	4,45	
39,8	45,7	40,1	37,9	43,8	44,7	46,7	46,2	43,5	--	4,90	
38,2	46,6	39,1	37	45,8	45,7	47,2	49,3	49,5	49,4	5,34	
40,9	47,6	42,3	38,1	45,5	47,9	51,9	52,3	55,4	--	5,79	
44,7	51,5	50	40,8	48,5	49,7	52,2	59,8	53,2	--	6,23	
52,2	56,9	47,7	41,5	52,6	52,5	50,9	55,1	56,7	--	6,68	
49	57	45,7	47	48,6	51,5	52,4	56	57,4	--	7,12	
53,6	56	45,9	41,9	54,9	53	51,3	55,7	59,4	--	7,57	
55	54,9	46,3	47,2	53,3	50,6	53,3	57,6	57,5	--	8,01	
55,6	57,9	46	42	53,6	54,4	57,2	55,8	53,5	--	8,46	
54,5	55	45,4	45,8	52,5	53,5	54,9	55,3	55,1	--	8,90	
54,1	56,4	42,5	43,9	53,5	55	53,3	57,6	53,9	--	9,35	
56,6	56,1	48,5	46,7	53,6	53	55,1	58,8	--	--	9,79	
54,7	53,7	45,3	44,6	49,9	54,6	56,1	57	--	--	10,24	
55,5	56,2	40,4	47	53	53	50,8	55,2	--	--	10,68	
55,6	55	44,2	49,3	49,3	54,4	54,3	54,4	--	--	11,13	
56	54,1	48,4	48,9	50,5	57,6	55,2	52	--	--	11,57	
56,7	54,1	45,9	45,9	51,1	55,8	55,1	55,4	--	--	12,02	
55,5	54,1	46,9	47,8	49	56,5	54,5	55,6	--	--	12,46	
54	54,7	49,7	44,5	49,7	53,4	56,5	--	--	--	12,91	
54,3	53,4	49,8	48,6	50,2	54,6	56	--	--	--	13,35	
52,5	55	46,6	48,8	51,2	54,7	56	--	--	--	13,80	
52,4	49,9	45,7	47,7	53,9	53,7	57,4	--	--	--	14,24	
--	46	45	--	--	53,4	56,1	--	--	--	14,69	
--	45,7	42,4	--	--	55,2	57,2	--	--	--	15,13	
--	45,5	38,7	--	--	--	51,5	--	--	--	15,58	
--	47,5	39,5	--	--	--	57	--	--	--	16,02	
--	46,4	48,1	--	--	--	56,6	--	--	--	16,47	
--	56,5	46,8	48,8	54,1	54,4	57,8	--	--	--	16,91	
--	56,6	45,9	54,4	56	49,4	57,6	--	--	--	17,36	
--	54,6	45,1	50,1	53,6	54,3	57,7	--	--	--	17,80	
--	54,4	43,4	46,8	54,6	51,8	57,8	--	--	--	18,25	
53,2	52,6	47,1	44,6	54,7	51,6	55,1	54,9	--	--	18,69	
53,7	52,8	45,6	50,7	56,5	54,4	53,8	55,5	--	--	19,14	
52,3	53,2	46,5	50,8	54,1	52,7	55,9	62,8	--	--	19,58	
49,1	53,3	41	44,3	52,6	51,8	53,3	53,1	--	--	20,03	
47,4	44,3	38,7	44,8	47,7	50	50,7	50	--	--	20,47	
47,6	43,4	37,8	41,3	46	44,8	46	48	--	--	20,92	
47,7	42,8	41,4	45,5	47,7	46,3	44,7	46	--	--	21,36	
49,5	41,3	37,2	50,1	48,5	50,3	51,1	49,2	--	--	21,81	
52,5	43,9	42,2	47,7	52,4	51,7	51,8	51,8	--	--	22,25	
53,1	47,4	42,4	49,9	51	53,9	53,2	53,5	--	--	22,70	
53,8	43,6	42,4	49,1	55,4	55,1	54,8	56,1	--	--	23,14	
54,5	43,8	46,5	51,6	55,1	55	55,2	55,1	--	--	23,59	
57,8	44,3	47	51,5	58,5	57,6	59,5	57,6	--	--	24,03	
55,5	51,4	51,1	51	57,6	60,3	63,5	61	--	--	24,48	

Prilog 4.2. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka BA 1.2

	Y – osa [mm]									
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
X – osa [mm]	0,44	52,5	45,4	47,6	54	45	48	56,5	54,1	59,1
	0,87	59,2	48,3	50,7	47,7	47,1	49,1	51,4	52,5	58,8
	1,31	58,4	42,6	46,1	53,6	47	47,4	49,1	49,4	60,5
	1,75	44,4	47,1	48,9	42,2	43,1	44,7	47,8	49,6	54,4
	2,18	55,5	47,2	45,3	44,5	45,6	49,8	52,3	52,3	53,3
	2,62	53,9	37,7	42	44,6	44	46,1	46,2	48,2	51,6
	3,05	52,7	41	40,5	48,2	40,4	39,1	46	47	50,7
	3,49	49,7	37,7	39,5	47	37,4	46,7	43	45,7	50,1
	3,93	48,1	38,2	40,9	40	36,3	40,4	46,8	40,7	46,6
	4,36	49,9	40,4	37,9	46,8	37,9	37	42,6	44,2	47
	4,8	52,3	42,1	41,3	37,5	38,8	42,5	44,5	47,7	49,1
	5,24	48,6	46,6	42	43,3	41	44,8	47	51,3	51,3
	5,67	53,2	42,7	42,4	40,9	41,3	52,2	50,5	53,2	53,8
	6,11	55,8	43,1	42,1	38,9	43,4	45,4	44,9	50,8	54,3
	6,55	55,1	42,9	42,1	46,5	40,8	50,1	47	47,7	55
	6,98	56	41,9	41,6	43,7	40,3	51,8	51	49,1	56,6
	7,42	57	44,9	41,9	40,4	42,1	51,4	49,4	48,1	49
	7,85	55,8	40,2	45,9	41,7	43,2	46,9	49,3	46,7	49,2
	8,29	52,6	44,6	46,1	40,6	41,7	47,2	53,3	47,7	52,9
	8,73	52,3	46	45,6	42,3	40,7	49,8	49	52,9	53,9
	9,16	50,7	48,6	41,3	40,4	44,2	50,7	49,3	49,8	53,1
	9,6	51,4	45,1	42	40,9	42,3	43,8	53,7	51,8	53,7
	10,04	51,3	40,9	44,7	40,7	41,4	51	46	48	53,7
	10,47	50,7	45,6	43,4	40,1	42,3	51	49	51,5	52,6
	10,91	50,5	43,9	44,4	42,8	40,8	44,6	49,1	51,1	51,8
	11,35	51	43,1	42,5	39,9	41,5	42,8	51,3	56,6	48,2
	11,78	47,5	45	39,7	40,2	39,4	40,3	49,5	58,9	48,5
	12,22	47	41,1	44,7	40,1	42,3	42,8	50,1	56,9	51,6
	12,65	41,9	42,1	43,7	37,1	42,3	40,9	50,3	53,3	53,7
	13,09	46,4	39,8	44,2	39,6	40,7	39,2	50,8	56,7	55,2
	13,53	46,9	43,1	40,4	40,2	40,1	41,9	50,3	54	54,3
	13,96	50,7	41,9	44,9	41,4	41,3	42,7	52,6	55,1	50,9
	14,4	45,2	42	47,8	41,4	42,7	45,4	54,4	53,7	50,7
	14,84	51,9	39,2	44,8	43,2	44	43,2	50	53	53,9
	15,27	51,8	43,7	43,9	41,3	44,5	45,8	55,7	54,1	55,1
	15,71	52,9	45,3	40,9	45,6	44,6	44,8	53,9	55,3	55,8
	16,15	49,5	42,4	44,6	41,6	41,8	49,8	54,4	54,7	55,8
	16,58	45,8	44,1	42,1	44,2	44	50,8	52,3	57	55,8
	17,02	51,5	42,5	40,3	40,7	45,5	50,1	53	56,9	55
	17,45	51,3	43	46,5	41,5	45,4	50,1	50,5	57,2	54,5
	17,89	43,9	43,7	43,5	41,8	46,2	46,7	52,4	52,2	55,4
	18,33	45,4	43,2	41,7	47,5	43	47,4	50,2	51,2	56,9
	18,76	44,6	42,1	46,8	40,8	46,9	44,9	46,2	50,6	60,1
	19,2	47,9	45,9	43,1	44,8	43	43,3	47,1	50,9	53,6
	19,64	46	41,5	47,3	39,8	44,9	44,7	47,7	49,8	51,1
	20,07	48,4	44,4	41,1	42,8	42	43,5	45,9	49,1	49
	20,51	43,7	39,4	37,7	41,1	40,7	42	43,7	39,2	48,6
	20,95	39,2	36,3	38,7	41,4	36,9	39,4	42,6	38,3	47,3
	21,38	36,5	37,7	42,1	40,9	40,2	37,8	44,9	44,4	46,8
	21,82	39,2	41,9	42,3	44,7	38,7	45,9	46	50,1	50,1
	22,25	38,7	44,2	44,6	41,9	42,9	44,7	49,4	50,7	53
	22,69	41,3	42,7	41,9	42,3	43,8	47	51,4	52,2	51,4
	23,13	38,8	44,2	46,7	44,4	45,8	49	50,7	55	56,2
	23,56	42,8	45,9	46,9	48,4	45,9	47	51,8	55,1	57,8
	24	47	47,2	48,6	43,2	46,2	57,8	55,2	55,7	61,2

Prilog 4.3. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka BA 1.3

Y – osa [mm]									
4,5	3,9	3,4	2,8	2,3	1,7	1,1	0,6	0	
69,7	74,5	68,4	69,6	69,2	73,9	66,2	68,9	0,41	X – osa [mm]
66,4	72,9	67,2	68,3	73,7	69,7	67,1	68,2	0,81	
66,8	73,2	67,7	67,1	71,5	67,7	68,2	72,2	1,22	
68,2	73,8	68,6	67,4	73,3	72,8	67,5	71,7	1,63	
71,5	74,2	67,5	68,1	71,7	72,5	67,3	66	2,03	
69,9	72,7	67,2	68,7	69,7	68,4	66,8	64,5	2,44	
70,9	66,5	66,7	67,7	66,2	65,9	68,2	65,1	2,85	
66,3	64,8	63,4	61,2	62,3	63,7	65,1	66,5	3,25	
63,7	62,5	64,3	59,7	61,6	61,3	61,1	56,9	3,66	
59	63,4	60,6	59,9	59,5	57,1	59,2	56,4	4,07	
58,4	58	56,6	57,9	57,1	56,4	57,1	52,1	4,47	
53,2	54,1	55,5	51,7	53,3	53,7	51,1	50,5	4,88	
49,5	48,7	50	50,7	47,7	48,1	48,6	46,9	5,29	
48,1	49	47,2	50,2	50,1	49,7	49,9	--	5,69	
53,6	51	51,5	53,2	51,1	52,3	55,1	--	6,10	
55,6	53,3	57,2	56,6	54,6	55,5	52,5	--	6,51	
53,9	55,2	55,3	57,6	55,8	56,4	55,7	--	6,92	
58,8	57,5	58,5	55,6	58,6	56,5	55,5	--	7,32	
56,4	58,6	56,6	57,9	57	58,7	58,6	--	7,73	
57,1	58	55,6	56,7	56,4	56,5	57	--	8,14	
54,6	54,5	56,6	59,2	58,6	57,4	58,4	--	8,54	
59,1	59	59,1	58,2	55,5	54,7	57,5	--	8,95	
57,1	56,6	57	58,2	59,8	57,4	59,9	--	9,36	
54,3	58,2	57,5	58,2	58	57,3	56,7	--	9,76	
59,4	54	54,5	54,9	55,5	57,2	55,5	--	10,17	
57,5	56,2	58,3	55,7	56,8	54	56,6	--	10,58	
57	56,2	57,1	53,9	55,1	55,3	57,2	--	10,98	
55	55,7	55,6	54,5	55,1	53,2	56,6	--	11,39	
56,6	57,2	55	55,1	55,3	52,9	54,9	--	11,80	
56,1	57,9	59,5	57,5	56	54,5	55,2	--	12,20	
58,4	55,8	57,4	54,3	53,4	54,7	55,6	--	12,61	
56,6	54,7	56,5	57,8	57,2	55,6	55,8	--	13,02	
54	58,5	60,6	55,9	56,6	55,7	56,2	--	13,42	
54,5	56,3	56,3	55,9	56,4	56,9	53,3	--	13,83	
56,6	55,8	--	--	53,9	55,7	53,9	--	14,24	
56,8	57,6	--	--	--	55,8	53,9	--	14,64	
56,5	57,5	57,2	--	--	54,6	55,7	--	15,05	
62	57,8	--	--	--	54	53,7	--	15,46	
49,6	57,5	57,2	--	--	54,4	51,8	--	15,86	
50,7	52,9	56,4	54,9	54,3	56,5	56	--	16,27	
50,4	57,6	59,9	56,8	57,6	54,1	52,6	--	16,68	
55,1	54,7	55	58,1	55,5	56,6	53,3	--	17,08	
54,9	57,5	55,5	54,3	54,5	60,3	52,9	--	17,49	
55,3	59	55,2	55,3	52,4	53,7	51,3	--	17,90	
57	54,7	54	56,4	60,6	51,1	56,1	--	18,31	
55,6	54,4	54,5	55,1	53	53,3	51,7	--	18,71	
54,6	52,1	49	51,6	52,7	51,3	49,7	--	19,12	
53	49,7	48	51,4	51,4	49,3	49,9	50,1	19,53	
48,3	46,9	49,8	48,4	48	46	48,7	50,2	19,93	
49,4	47,9	50,3	50,1	51,6	47	45,7	53,3	20,34	
54,1	54,6	56,9	53,1	48,7	47,7	47	57,1	20,75	
53,1	54	53,9	54,4	51,1	52	49,8	58,4	21,15	
60,6	58,3	58,4	58,8	54,3	52,6	54	60,1	21,56	
59,9	64,7	60,3	59,4	61,1	56,9	57,2	62,3	21,97	
63,4	65,1	62	63,2	60,2	56,7	55,1	60,1	22,37	
64,8	66,7	57,8	64,6	57,9	61	57,5	63,8	22,78	
65,8	66,9	68,9	64,3	64,8	64,5	58,6	64,2	23,19	
72,4	69,7	68,3	68,8	61,9	64,2	61,4	66,8	23,59	
69	67,1	69,1	72	64,9	65,9	62,7	67,2	24,00	

Prilog 4.4. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka BA 2.1

Y – osa [mm]								
4,5	3,9	3,2	2,6	1,9	1,3	0,6	0	
56,5	65,2	62,5	64,1	61,6	66,7	64,8	0,41	X – osa [mm]
61	63,4	63,5	61,2	62,5	62,3	61,6	0,81	
59,4	59,7	62,5	62,9	61	61	61	1,22	
56,2	59,8	59,1	61	55,3	60,3	58,8	1,63	
55,8	56,6	57	54,7	56,6	56,6	58	2,03	
55,1	56,2	54,9	54,9	53,3	54,1	55	2,44	
51,6	53,1	50,8	50,9	53,2	52,3	53	2,85	
49,4	50,4	52	50,2	50,2	48,4	49,6	3,25	
48,4	51,5	47,8	48,3	47,6	48	47,7	3,66	
46,8	46,6	48,5	47,4	49,6	46,6	49,4	4,07	
50,4	48,7	49,1	51,1	50,3	50,8	54,4	4,47	
49,9	53,2	52,6	54,1	50,8	54,9	56,7	4,88	
54,5	54,9	54	57,5	55,6	57,2	55,6	5,29	
52,3	59,2	56,6	54,6	54,9	58,7	57,9	5,69	
56,5	56	57,1	56,9	57,4	59,8	56,5	6,10	
55,7	57,1	56,1	56,7	58,2	58,6	57	6,51	
55,7	55	57,9	58,3	57,5	57,4	56,2	6,92	
57,2	57,8	57	58,2	56	55,4	55,2	7,32	
56,5	56,2	57,9	58,4	56,1	56	56,1	7,73	
57,3	56,4	57	57	59	56,9	58	8,14	
56,6	54,1	51,6	56,9	56,9	57,1	56,1	8,54	
55,5	53,9	54,9	53,7	53,8	55,3	55,2	8,95	
56,2	53,6	51,9	53,2	54,9	56,6	56,5	9,36	
53,7	46,8	49,5	52,7	53,4	57,9	58,4	9,76	
55,6	48,9	47,4	48,4	53,4	58	57,2	10,17	
55,1	52,9	47,7	50,2	54,7	57,5	58	10,58	
54,7	53,8	47,6	51,5	54,3	56	57,9	10,98	
54,5	50,3	46,7	50,2	54,9	57,7	58,7	11,39	
45,7	46,7	44,3	45,8	54,1	55,6	54,6	11,80	
55,5	45	45,3	46,5	57,2	52,4	53,6	12,20	
55	53,2	--	--	54,1	53,3	53,9	12,61	
52,4	48,1	--	--	55,2	53,1	52,9	13,02	
52,6	45,4	45,7	53,4	53,8	47,8	53,1	13,42	
50,6	45,1	46,9	42,5	47	46,1	56,2	13,83	
48,8	44,6	51	51,1	51,2	53,1	51,2	14,24	
45,7	48,7	49,5	49	48,4	50	51,4	14,64	
47	47,2	47	47	47,5	46,4	50,1	15,05	
45,1	46,5	46,6	47,6	45,1	48,6	48,2	15,46	
50,4	48,4	49,5	47,5	47,2	45,5	46,6	15,86	
53,8	52,7	52,7	49,7	49,5	47,1	47,5	16,27	
54	51,6	54,7	51,3	51	47,9	51,4	16,68	
56,5	57,6	57,6	54,5	53,7	53,8	56,1	17,08	
59,8	58,4	61,6	56,7	59,5	55,1	59,5	17,49	
60,5	62,6	61,2	61,3	59,9	56,5	64	17,90	
68,8	62,9	64,6	62,5	60,2	60,9	66,8	18,31	
67,7	66	68	65,9	62,5	65,1	67,5	18,71	
68,5	71,3	67,2	64,9	67,7	67,5	64,5	19,12	
64	71,7	68,9	67,8	71,3	66,2	65,6	19,53	
68,8	72,8	68,6	72	72	67,3	66,4	19,93	
67,2	73,1	68	73,1	72	65,6	67,4	20,34	
68,6	69,9	67,4	72,2	74,6	66,9	68,8	20,75	
68	68,4	68,9	69	71,6	67,4	66,6	21,15	
68,5	67,4	67,5	73,2	72,3	68,1	64,8	21,56	
72,2	71,4	67,8	74,4	69	65,6	63	21,97	
69,5	74,2	66,5	71,2	73,2	64,3	60,3	22,37	
71,3	71,9	64,3	64,6	72,1	65,3	66	22,78	
69,4	67,7	66,6	65,4	74,7	67,7	68,9	23,19	
72,7	67	63,4	65,9	74,1	65,3	69,8	23,59	
68,6	65,5	68,9	66,5	73,8	67,2	64,4	24	

Prilog 4.5. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka BA 2.2

Y – osa [mm]									
4,50	3,94	3,38	2,81	2,25	1,69	1,13	0,56	0	
65,7	69,5	70,6	70	66,8	70,7	71,4	73,3	0,42	X – osa [mm]
64	71,7	65,4	70,2	68,3	71,8	70,9	71,1	0,84	
67,7	63,8	69,4	68,8	64,6	67,7	69,5	71,3	1,26	
63,1	63,7	67,8	70,4	65,4	67,6	68	67,3	1,68	
66,4	62,5	64	64,9	62,3	66,8	64,6	66,6	2,11	
60,9	61	62,5	64,3	61,9	68,2	66,3	66,4	2,53	
63,2	61,8	60,1	61,2	64,6	63,2	63,8	66,2	2,95	
58,2	58,3	60,6	62,2	61,2	59,5	62,9	64	3,37	
60,8	57,4	59,4	61	60,2	57,9	59,4	60,4	3,79	
56,4	57,4	57,2	57,6	58,2	55,9	59,7	55,6	4,21	
52,7	51	55	55,6	54,6	54,4	55,6	55,8	4,63	
49,6	50,1	52,3	53,7	50,9	53,3	52,7	52,6	5,05	
48,8	46,9	49,2	49,9	49,6	50,3	50,3	49,6	5,47	
47	46,7	47,8	48,2	48,1	50,1	48,8	50,4	5,89	
49,4	50,8	50,7	52,4	52,1	56,5	53,2	54,7	6,32	
56,5	52,3	53,5	51,4	55,6	62	58,4	57,6	6,74	
55,4	54,3	53,3	55,8	54,7	58,1	60,5	--	7,16	
58,8	55,8	58,7	57	55,5	58	59,1	--	7,58	
57	55,8	58,7	57,2	63,5	58,4	59,9	--	8	
57,9	54,4	60,6	58,2	58,1	56,8	61	--	8,42	
57,9	58,2	57,4	57,2	56,6	61,1	59,8	--	8,84	
59,4	58	56,3	59,4	59,8	56,1	57,5	--	9,26	
47,7	58,2	60,1	58,4	57,9	59,2	60,1	--	9,68	
55	48,5	60,6	60,2	57,8	57,6	57,1	--	10,11	
58,6	48,4	47,1	--	--	45,4	50,6	--	10,53	
57,4	49,7	51,9	--	--	50,7	50,7	--	10,95	
55,9	52,5	49,5	--	--	50,5	54,9	--	11,37	
58,4	52,4	56,1	--	--	54,4	57,2	--	11,79	
56,9	55,7	51,2	--	--	57,2	57,4	--	12,21	
59,4	56,1	56,5	--	--	57,1	58,8	--	12,63	
58,6	58,8	56,9	54	55	60,2	57,8	--	13,05	
59,1	55,1	55,5	51,2	56	58	57,6	--	13,47	
59,2	56,9	56,2	49,6	55,2	53,8	62,1	--	13,89	
58,2	55,8	55,9	53,1	57,8	53,7	58,6	--	14,32	
57,4	56,2	56,6	54,6	58,3	55,8	56,9	--	14,74	
55,7	55	56,5	53,9	58,5	57,1	57,1	--	15,16	
57	58,8	56,2	50,4	56,3	54	55,1	--	15,58	
57,1	57,4	56,5	55,6	53,8	56	57	--	16	
55,8	57	56,9	57,6	56,7	57,1	57,5	--	16,42	
56,2	56,4	56,3	57,4	57,9	56,7	60,5	--	16,84	
57,2	56,6	57,2	52,4	57,9	57,8	57,9	--	17,26	
56	60,3	59	59,7	57,6	58,4	62,2	--	17,68	
54,5	57,6	58,9	55,8	53,1	56	59,7	--	18,11	
58	58,3	57,4	54,9	57	54	60,8	--	18,53	
56,1	55,4	55,9	56,1	54,4	57,1	57,8	59,8	18,95	
57,6	57,2	55,5	55,1	57,1	54,6	56,6	61,4	19,37	
57	55,6	53,8	55	55,6	54,4	57,3	59,1	19,79	
51,9	50,3	50,8	53,1	52,5	50,7	54,3	53,7	20,21	
49,5	48,7	47,7	47,8	49,8	51,2	51,2	50,9	20,63	
49,7	51,3	48,8	48,1	48,5	48,5	47,2	48,9	21,05	
54,7	57,2	53,8	54	52,9	50,3	51,4	52,3	21,47	
56,7	58,8	54,4	55,8	56,6	55,8	55,8	52,1	21,89	
60,5	62,6	60,2	57,6	57,4	61,6	56,1	56	22,32	
60,2	67	65,1	60,7	60,6	60,1	59,1	57	22,74	
69,5	61,6	63,7	60,6	62,9	63,2	66,2	60,5	23,16	
69	70,9	65,7	65,6	64,7	65,7	62,9	63,7	23,58	
70,6	69,9	67,8	69,5	66,8	68,9	64,8	68,5	24	

Prilog 5.1. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 1.1

47,9	51,5	49,7	50,4	51	52,1	48,5	51,7	50,4	50,2	49,4	53,3	50,9	24	[mm]uso – X
44,6	49,3	49,7	48,9	48,3	48,1	51	49,2	50,1	48,7	49,5	49	53,7	23,59	
48,7	49,2	48,1	48,1	46,4	49,2	46,2	48,8	48,9	50	51,4	47,1	51,8	23,19	
48,7	48,7	47,1	47,7	48	45,5	47,2	48,1	47,7	49,2	49,5	47	50,3	22,78	
52,4	54,9	52,6	48,1	46,3	48,2	48,1	44,7	49,8	46,9	47,8	46,7	50,9	22,37	
59,1	55,5	53,3	49,8	48,9	51,4	51,1	46,8	48	49,6	50,5	48	52	21,97	
57,4	64,5	55,4	54,3	56,6	54,9	51,4	51,1	54,3	51,2	51,7	49,5	51,6	21,56	
59,9	61	59,5	58	54,4	58,6	57,8	54,3	55,2	52	46	54,5	52	21,15	
61,8	60,3	55,5	60,2	61,2	58,2	57	54,3	53,4	52	53,7	54,6	55	20,75	
61,2	58,2	59,7	57	55,8	53	58,3	61,2	58	59,7	55,4	53,8	55	20,34	
61,8	51,6	56,7	59,6	56,7	63,1	56,3	59,2	55,6	60,5	59,9	56,7	56,4	19,93	
60,5	54,7	51,8	55,1	59,1	56,6	60,5	58,8	58,7	60,6	60,2	57,1	57,1	19,53	
57,5	57	51,8	53,4	57,4	58,4	59,8	59,1	52,6	60,6	59,5	61,5	62,9	19,12	
62,9	57,1	54,7	54,3	56,4	56,5	58,2	60,8	55,7	59	58,4	61,2	59,7	18,71	
58,7	57,5	54,1	54,5	61,5	57,6	60,6	61	60,5	60,9	57,2	59,5	61,9	18,31	
62,2	57,6	55,5	53,9	60,6	57,6	57,8	57,9	53,8	56,9	61,9	59,1	56,9	17,90	
58,6	58,4	54,1	52,1	59,2	58,6	59	55,9	56,9	55,2	59,2	65,2	61,2	17,49	
62,4	58,3	56,5	53,6	59,5	58,7	57,9	54,9	43,5	98,3	0	46,8	58,8	17,08	
57,6	57,6	59,7	53,4	58,4	60,3	58	56,9	54,9	49,3	73,5	--	--	16,68	
56,7	59	52,6	52,4	55,6	57,6	59,8	59,1	54,9	55,1	57,4	--	--	16,27	
55,7	57,1	50	52,5	59,2	56	58,3	57,4	51,6	59	59,5	--	--	15,86	
54,5	58,8	55,4	57,6	58,2	58,7	59,2	58,2	56,2	55,8	57,5	--	--	15,46	
56,5	58	57,8	58,3	57,8	58,7	59,5	56,9	52,1	46,1	58,6	--	--	15,05	
56,4	57,6	58,2	55,5	57,9	56	61,1	59,7	53,3	54,3	59,8	--	--	14,64	
56,4	56,1	57	56,2	58,3	58,3	60,2	58	53,4	57	61,2	--	--	14,24	
56,5	56,5	57,2	58,3	57,2	57,6	59,1	60,1	53,3	57,1	58,4	--	--	13,83	
57,4	57,6	58,2	58,2	56,5	58	57,9	58,2	54,6	50,7	60,6	36,26	--	13,42	
58,4	53,9	56,5	57,4	57,5	56,9	57,5	59,5	60,2	56,1	59,2	0	--	13,02	
57,1	54,1	57,1	54,9	58,2	56,5	57,1	60,6	59,5	52,9	58	--	--	12,61	
56,5	56,2	56,1	56,4	57,8	56,6	57,9	60,8	57,9	59,4	55,6	--	--	12,20	
55,4	59	55,2	58,2	57,1	56,6	59	60,6	59,9	57,2	57	55,7	--	11,80	
57,5	57,4	57,4	56,1	57,6	58,2	57,6	59,5	57,1	55	56,9	54,5	--	11,39	
57,9	56,6	57	57,1	56,9	57,4	56,1	58,8	54,5	54,9	54,1	54	61,6	10,98	
59,4	60,5	59	57,9	57,5	57,2	58,4	56,1	53,8	54,3	52,1	43,2	57,5	10,58	
58,4	58	57,4	56,7	57,6	57,4	56,4	57,6	52,3	53,6	52,9	45,9	54,9	10,17	
59,7	58,2	58,3	57,6	58	57,6	58,4	56,7	54,5	54,7	49,2	50,6	56,5	9,76	
57,5	60,8	59,2	56	57	58,3	57,6	57,8	57,2	57,8	51,7	52,4	55,6	9,36	
59,7	60,9	57,9	57,9	59,1	57,2	58,7	57,6	57,4	56,9	53,1	54,4	56,6	8,95	
61,3	60,6	62,2	57,8	59,6	55,5	55,5	61,8	59,4	58,3	56,9	51,8	57,2	8,54	
62,8	60,3	60,2	58,6	60,3	57	58	57,2	57,1	59,4	55,6	55,6	53,6	8,14	
61,6	58,6	58,7	60,1	58,7	57,9	59,8	57,6	55,8	56,7	57,6	55,2	53,9	7,73	
60,2	59,4	58,4	58,6	57	57,2	58,3	59,6	56,4	58	58,3	54,1	54,4	7,32	
60,6	57,9	59,8	57,9	57,9	59,5	59,2	58,8	58	56,3	53,6	51,3	51,5	6,92	
60,1	59	59	58,4	59,5	57,5	58,6	59,1	55,7	57,4	54,6	53,9	51,8	6,51	
59,9	59,1	57,2	59,9	59	59,2	60,9	62,5	56,4	54,6	55,1	53,4	49,2	6,10	
58,8	56,7	58,3	57	57,4	58,8	57,1	61,6	51,6	50	51,3	52,9	47,6	5,69	
58,8	57,6	55,6	59,6	59,4	58	57,9	59,4	50,7	53	49,5	48,8	52,2	5,29	
56,5	58	60,5	58,3	58,3	56,5	59,4	53,4	49,8	49,5	48,7	46,7	47,5	4,88	
57,5	57,9	53,6	57	53,8	51,3	53,7	50,4	46,8	48,3	45,5	46,5	48	4,47	
57,5	55,1	52,4	52,9	50,1	49,4	50,1	45,8	44,9	45,4	45,6	46,3	44	4,07	
52,1	48,6	49,1	49,9	50	46,9	48,3	47,3	49,6	44,3	45,2	47	49	3,66	
48,8	47,5	45,8	49	46,9	47,8	49,1	51,6	47,7	46	45,9	48,3	48,3	3,25	
46,2	47,9	46	49	47,8	48,7	51	50,6	52,4	49,3	50,6	47,4	50,5	2,85	
48,2	48,8	47,2	50,1	49,2	50,9	51	54,1	50,5	48,4	48,3	51,2	52,5	2,44	
49,2	50,4	49,2	52	52	52,1	52,5	55,2	52,2	53,2	51	51,5	54	2,03	
52	48,5	51,6	53,4	52,2	50	53,9	52,2	52,5	51,6	52,7	53,7	57,2	1,63	
51,7	50,1	53,6	53,4	55,2	55,1	56,2	56,6	55	52,7	54	53,9	53,8	1,22	
53	52,5	56,7	56,2	57,4	54,3	56	54,9	52,4	55	54,6	55,5	57,6	0,81	
53,8	55,6	57,4	55,1	55,7	56,4	59,6	58,4	53,8	53,1	56,6	57,2	60,8	0,41	
4,50	4,15	3,81	3,46	3,12	2,77	2,42	2,08	1,73	1,38	1,04	0,69	0,35	0	
Y – osa [mm]														

Prilog 5.2. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 1.2

51.8	48.1	49.8	48.3	49.5	53.6	55.4	54	52.6	54.9	48.8	49.3	50.7	24	X – oosa [mm]
56.2	52.1	53.2	50.6	54	55.2	58.8	60.2	56.3	51.8	52.1	52.3	50.8	23,61	
56.5	56.9	55.7	56.3	55.4	59.8	65.7	63.1	56	52.7	53	52.3	51.8	23,21	
61.5	53.7	57.9	54.5	56.1	57.1	66.4	59.4	56.9	56	57.6	52.5	52.1	22,82	
56.9	59.8	56.1	59	54.9	58.6	70.8	66.2	58.7	57.5	58.7	52.7	56.4	22,43	
57.5	57.8	56.2	58	57.4	61	73.3	62.2	58.7	61.2	57.8	56.1	55	22,03	
59.6	56.7	58.6	58.3	58.7	63.2	65.6	62.4	58.3	58.8	58.2	53	58.3	21,64	
57.5	58.2	57.8	58	58.7	66.7	70.2	61.8	60.5	57.8	60.9	55.1	57	21,25	
55.7	56.2	59	56.7	58	58.6	72.6	63.5	64	59.5	60.1	56.5	56.4	20,85	
56.5	56.5	54.7	56	59.8	63.1	70.8	65.6	59.2	56.2	60.3	55.5	57.8	20,46	
55.2	57.1	48.9	56.2	59.9	66.8	70.1	67.3	60.3	59.8	58.4	55.4	60.2	20,07	
55.9	57.1	50.6	54.7	56.7	63.5	70.4	66	57.4	59.4	58.6	57.6	60.2	19,67	
54.4	58	50.6	48.7	58.2	61.5	68.7	65.9	59.2	62.1	58.2	59.9	57.4	19,28	
59.5	59	51.2	56.2	58.3	62.2	66.7	67.5	64.9	66.6	56.9	55.1	54.6	18,89	
55.9	58.7	50.7	50.6	57.1	63.2	65.6	66.8	62.8	57.8	58.6	55.2	55.6	18,49	
56.4	58.7	48.2	53.9	59.4	63.1	69.7	63.4	62.8	57.2	60.8	58.6	54	18,10	
57.4	59.6	48.3	50.2	58.4	63.7	67.2	63.5	59.2	59.1	57.6	59.6	57.5	17,70	
59.4	57.1	47.7	50.1	58.3	62.2	66.5	63.7	58.8	58	56.5	54.9	39.7	17,31	
57.1	55.7	51	49.4	57.9	61.3	65.1	64.2	59.5	60.5	57.8	56.2	--	16,92	
57.6	57.6	57.4	52.6	59.8	63.4	67.8	62.5	57.8	54.5	57.9	57.1	--	16,52	
58.8	56.2	54.1	56.9	56.7	60.8	66.8	64.2	59.2	56.6	57.5	56.2	--	16,13	
57	56.5	60.8	56.5	55.1	62.6	68	66.4	57.6	58.7	57.4	57.1	--	15,74	
58.4	54.5	57.8	57.8	55.5	58.3	64.3	66.2	59.4	59.1	57.5	61.2	--	15,34	
58.6	57.1	58.2	57.8	56.2	60.8	66.4	66.2	58.7	59	66.4	57.2	--	14,95	
58.3	56	57.6	56.5	57.5	63.2	66.7	63.7	59.9	57.9	58.6	56	--	14,56	
60.8	57.2	56.7	57.6	57	61	67.2	63.4	59.4	58.7	58.6	57.2	--	14,16	
61.1	57.7	56.7	57.8	57	60.9	64.5	64	57.4	60.1	58.3	57.2	--	13,77	
58.7	56	57.9	56.5	56.5	61.5	66.7	63.7	60.1	58.7	59.9	58.4	--	13,38	
57.9	59	58.2	57.8	58.3	60.6	68.5	63.9	61.5	58.7	61	57.1	--	12,98	
57.8	55.4	55.5	56.1	57.8	61.8	66.7	65.6	62.5	59.4	59.9	58.7	--	12,59	
58.6	56.7	57	55.7	57.9	62.4	67.3	65.6	62.4	59	58.8	59.8	--	12,20	
55.5	59.2	57.6	54.9	57.5	61.5	66	64.5	61	55.5	62.8	59.2	56.9	11,80	
55.2	58.4	55.6	57.5	58	60.9	66.8	64	60.2	58.2	59.9	58.4	57.6	11,41	
56	59.1	57.6	55.9	57.1	63.5	65.2	66.5	60.2	58	60.1	57	54.6	11,02	
56.7	56.5	56.1	57.5	57.5	63.5	68.8	63.8	60.6	57.5	59.2	56.2	55.1	10,62	
57.8	56.9	58	54.1	57.9	64	69	62.5	58	57.1	58.4	56.7	56.1	10,23	
57.1	57.6	57.6	56.1	58	61.9	65.1	66.5	58.7	58.2	59.4	56	56.4	9,84	
57.2	56.6	57.2	57.9	59	59.5	65.6	68.5	60.5	59.8	59	59.2	57.1	9,44	
55.2	58.4	58.7	57	57.6	60.8	68.8	66.4	62.5	60.6	59.5	60.6	56.6	9,05	
54.9	58.4	58	57.4	57.9	61.9	67.3	66.8	63.4	58.8	59.8	62.3	58	8,66	
53.6	57.2	57.9	59.7	60.2	58.8	63.7	66	61.8	61.5	60.1	64.1	56.7	8,26	
53.4	58	59	57.5	59.2	58.8	67.7	68.5	65.4	60.8	58	60.1	59.5	7,87	
58.6	58.2	60.5	59	57.1	61.8	68.7	68.5	62.9	60.8	62.6	58.3	59.6	7,48	
57.9	58.6	57.9	59	57.5	61	67.7	67.3	66.5	63.7	57.1	58.8	56.6	7,08	
57.9	57.5	58.3	56.5	58.7	62.2	67.2	72.8	60.3	61.2	62.5	60.6	59.4	6,69	
58.2	59.9	55.9	59	58.7	62.5	69.7	73.5	67	59.2	60.8	62.1	57.5	6,30	
58.7	58.3	57.6	57.6	59.7	59.1	67.8	74.4	62.8	61.5	61.5	56.6	59.1	5,90	
60.8	57.4	58.2	57.2	59.4	62.6	69.4	68.8	65.6	64.8	62.2	60.9	59.2	5,51	
60.7	56.9	58.3	59	57.8	62.2	68	71.8	64	60.9	62.2	58.6	60.6	5,11	
60.5	58	58.8	59.2	58.8	59.1	70.6	73.1	63.8	58.7	60.8	59.9	57.4	4,72	
59.5	59	61.3	56.6	60.1	62.9	71.8	71.8	66.7	61.5	55.8	61.9	61.3	4,33	
57.4	55.7	60.9	59.1	60.2	59.1	65.7	72.2	66	57.8	60.6	58.6	56.3	3,93	
63.5	58.3	57.8	58.6	55.3	61.6	69.5	71.1	61.9	56.6	57.2	54.7	58.6	3,54	
60.2	57.9	53.3	56.7	56.2	61.3	64.5	65.7	62.3	57	56	55.1	52.2	3,15	
59	55.2	55.1	53.1	56.6	61.8	67.5	63.1	59	59.9	57	59.4	57.5	2,75	
59.6	53.4	55.1	52.3	52.7	58.3	67.5	64.3	59	58.7	51.6	50.2	55.2	2,36	
60.8	53.6	50.2	53.7	52.3	54.6	60.2	60.2	54.6	51.7	51.6	49.7	53.1	1,97	
57	49.8	49.2	49.4	47.2	54.9	55	55.5	53.8	49.7	51.4	48.8	49.6	1,57	
47.4	48.5	47.9	47.3	46.6	48.1	59.1	52.2	52.6	51.2	48.6	45.1	46.7	1,18	
48.8	46.9	46	46.1	44.7	50.3	53.4	54.1	50.9	48.5	49.4	48.4	45.1	0,79	
47.5	47.4	45.7	47.5	48.6	52.3	57.8	54.7	52.1	47.5	48.6	49.2	46.8	0,39	
4,50	4,15	3,81	3,46	3,12	2,77	2,42	2,08	1,73	1,38	1,04	0,69	0,35	0	
Y – osa [mm]														

Prilog 5.3. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 1.3

54,7	54,5	52,3	55,2	57,2	58,7	55,1	58,8	56,1	55,2	54,7	54,3	56,2	24	X – osa [mm]
53,7	51,7	51,2	55,6	54,3	58	55,9	53,6	54,5	55,6	55,4	54	53,2	23,63	
51,9	53,7	51,7	53,9	55,8	51,8	55,2	52,1	52,6	54,6	52,7	52,4	57,6	23,26	
49	51,3	50	49,5	53,2	50,6	53,9	52,3	51,5	53,8	51,2	54	57,2	22,89	
48,9	49,4	50,7	53,9	54,6	53,8	50	54,2	51,8	51,4	48,7	50,2	52,4	22,52	
46,3	46,4	48,9	52	55	51,8	51,8	49,2	48,1	52,6	50,5	50,3	51,2	22,15	
48,3	50,9	51,2	51,8	53,8	52,5	49,4	54,4	50,4	49,1	47,3	52	50,6	21,78	
54,9	53,8	57,2	59,5	58,7	56,1	54,3	55,9	52,6	50,1	50	49,3	51,8	21,42	
57,9	56,9	59,5	57,9	64,6	63,5	65,7	61,6	56,1	55,2	52,1	52	54,9	21,05	
63,7	59,8	59,4	65,7	65,1	65,4	62,4	58,8	58,7	57,1	57,8	54,7	58	20,68	
58,6	56,6	64	66,8	64	66,4	69,2	65,2	64,5	63,5	54,5	60,1	62,2	20,31	
56,5	58,3	62,1	61,6	67,7	66,5	65,6	68,7	63,9	62,6	59,8	61,5	58,7	19,94	
59,8	57,8	61,2	66,8	66,8	68,8	65,1	70,1	63,7	64,2	58	68,5	66,4	19,57	
58,8	51,4	63,4	66,2	66,7	68,7	69,9	69,4	66,8	61,3	60,9	69,4	62,8	19,20	
59	53,3	60,9	65,2	66,2	68,2	66,4	69,2	69	66,4	61,2	62,6	64,9	18,83	
59,1	51,6	60,6	61,2	69	69,2	73,1	68	65,6	60,8	64,8	68,7	69,7	18,46	
61,1	51,6	61,5	61,2	63,5	67,8	71,7	69,9	66,4	64,6	64,3	65,1	69	18,09	
61,6	48	61,6	67,5	67,8	63,8	71,3	69	68,7	65,9	64,9	63,1	69	17,72	
61,3	51,6	56,7	66,4	68	66,7	66,8	71,3	65,9	66,7	64,8	64,3	63,7	17,35	
58,6	50,6	54,4	67,5	67,5	64,6	64,5	65,1	62,1	67,7	64	63,8	68,7	16,98	
62,8	49,3	55,6	65,9	66,4	63,8	64,9	64,5	57,9	56,9	--	--	70,1	16,62	
60,6	53,8	51,3	66,8	66,8	65,2	65,1	64,5	64	62,2	71,5	--	68,7	16,25	
62,6	54,5	53,3	62,8	66,4	67,7	67,2	67,2	62,5	61,5	75,8	--	63,8	15,88	
60,5	49,4	60,1	64,9	63,8	64,5	68,5	65,4	61,3	60,2	72,9	--	--	15,51	
59	60,6	62,1	65,6	62,6	67,2	70,6	66,4	61,5	61,5	68	--	--	15,14	
58,6	58,4	61	64,9	60,8	66,7	65,6	66,8	62,6	62,6	70,9	--	--	14,77	
56,7	59,5	62,5	62,2	65,6	65,1	67,2	64,5	63,2	61,3	68,2	--	--	14,40	
57,9	59	64	62,8	62,4	65,9	66,8	63,8	64,6	64,9	67,3	80,1	--	14,03	
59,9	58,2	61	60,2	64,6	67,2	69	65,9	65,2	61,6	68,3	--	--	13,66	
59,8	57,6	60,8	63,2	63,8	66,8	66,2	66,4	64,1	62,5	63,5	--	--	13,29	
57,5	58,8	62,4	62,6	65,4	66,5	65,2	68,3	63,7	63,8	61,5	--	--	12,92	
58,2	58,6	60,9	61,6	66,5	62,4	67,2	69,4	66	63,5	67	--	--	12,55	
58,6	59	61,2	63,2	64,9	65,7	65,6	67,3	68,7	63,8	64	--	61,9	12,18	
57,6	58,3	61,2	62,8	63,9	63,9	64,9	66,7	67,5	64,2	62,4	64,3	68,5	11,82	
58	56,9	61,5	62,1	67,8	59,9	61,9	68,2	62,8	62,2	61,6	59	69,9	11,45	
57,6	58,6	63,1	63,7	67,3	63,1	62,2	64,3	63,1	62,2	60,5	50,3	65,4	11,08	
56,7	60,2	61,2	62,1	64,2	62,2	61,3	62,5	61,2	59,5	55,2	49,4	62,1	10,71	
56,1	59,2	60,1	64,2	67,7	62,5	62,5	61	58,6	60,6	55,1	52,1	60,1	10,34	
56	58,4	61,3	62,5	66,7	64,6	63,4	61,3	62,8	57,1	54,5	54,7	58,4	9,97	
57,4	61,9	64	66,8	61,8	65,7	61,8	62,4	63,4	58,2	52	55,9	60,1	9,60	
57,9	59,1	63,1	66,4	65,9	65,1	64,8	62,1	61,1	59,6	55,8	59,1	60,8	9,23	
58,7	59,1	63,7	64	64,3	63,7	63,2	65,2	62,2	57,8	55,2	55,9	61,2	8,86	
61,6	61,3	63,5	63,1	65,9	64,2	62,4	62,8	62,8	60,2	57,4	57,9	59,9	8,49	
57,2	58,4	63,4	63,9	61,8	62,8	63,1	64,8	64,2	60,5	56	58	64	8,12	
60,6	59,4	61,9	63,4	62,5	65,1	65,9	62,5	64,8	59,8	58,3	60,2	65,4	7,75	
60,1	58,2	64,2	62,8	65,2	65,9	66,8	64,5	65,4	60,3	59	58,3	58,8	7,38	
58	58,8	60,9	64,9	64,3	64,6	69,9	64,9	61,8	60,1	58,3	57	62,9	7,02	
58,2	59,8	61,5	67,5	65,1	60,5	71,3	66,4	64,6	56,9	57,5	56,9	58,2	6,65	
57,5	57,1	62,6	69,4	66,2	64	63,4	63,1	60,6	59	58	55,6	59,1	6,28	
55,7	57,1	63,2	64,3	68,7	63,4	64,3	63,2	63,2	56,2	54,6	60,8	60,5	5,91	
57,5	57,2	62,6	65,9	68,2	70,6	67,5	60,9	59	58,4	56,5	58,2	58,8	5,54	
60,9	55,7	63,1	67,3	67,3	66,7	69,2	62,9	58,3	53,9	57,2	54,3	55,6	5,17	
53,2	55,2	64,8	66,8	67,3	66,8	60,6	62,2	57,1	52	52,4	50,3	53,6	4,80	
57,1	54,5	61,5	63,8	57,8	63,2	61	58,6	56,5	49	51,5	50,7	50,8	4,43	
55,9	55,4	54,6	61,9	59,1	56,7	58,7	55,4	51,6	49,4	48,6	48,1	51,6	4,06	
50,3	50,9	54,5	56,5	51	51,2	51,7	50,6	46,7	45,6	47,8	47,1	48,3	3,69	
48,2	49,1	51,5	48,4	50	52,7	51	51,4	47,3	47,4	47,4	48,7	49,1	3,32	
47,4	45,6	49,5	50,2	49,1	51	48,2	53	50,9	49,6	49,5	50,5	53,4	2,95	
46,1	46,9	51,2	52,9	49,7	53,9	53,2	51,4	54,4	51	50,4	50,1	50,3	2,58	
48,3	49	51,8	53,8	52,3	52,3	54,7	54,6	50,9	52,7	50,7	50,2	49,2	2,22	
50,5	48,9	53,4	55,2	53,1	54,1	51,6	56,1	53,7	54,4	51,1	51,5	52	1,85	
53,8	52,7	51,6	54,7	52,7	54,1	59	57,4	52	54,9	52,6	53,1	51,8	1,48	
52,5	52,4	54,7	53,9	56,4	56,4	58,6	59,4	57,2	52,2	55,7	55,8	53,5	1,11	
50,9	51,4	55,7	55,1	55,4	56,7	56,7	61	57	56	53	56,4	54,4	0,74	
52,6	53,7	55,2	55,9	56,1	55,8	57,4	56	54,7	54,7	55,5	55,2	55,1	0,37	
4,50	4,15	3,81	3,46	3,12	2,77	2,42	2,08	1,73	1,38	1,04	0,69	0,35	0	
Y – osa [mm]														

Prilog 5.4. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 2.1

X – osa [mm]	24	46,5	49,1	47,8	49,4	48,1	46,1	48,8	49,9	50,2	53,7	47,9	50,4	53,6
	23,66	47,7	49,7	49,2	49	49,5	49,4	48,5	50,2	56,9	56,2	51,8	52,7	52,7
	23,32	51,6	52,9	51,6	50,1	49,2	48,6	51,7	54,5	55,5	59,2	56,4	53,2	59,5
	22,99	54	54,3	55,1	53,9	55	52	52,2	54,7	56,6	54,9	55	56,5	59,8
	22,65	53,4	57,1	59,5	53	54,6	55,2	55,6	56,4	57,2	55,8	59	54,9	58,7
	22,31	57,5	56,2	59,1	56,9	54,7	54,5	58,3	54,9	56,9	61,8	61,8	56,2	60,2
	21,97	57,8	59,1	62,8	58,6	58,8	53,8	55	59,5	58	60,5	60,1	62,4	61,2
	21,63	60,3	59,5	62,8	59,9	60,2	55,7	60,6	59	63,7	61,8	62,2	63,5	60,8
	21,30	59,2	60,8	64	59,6	60,1	61,5	59,7	56,9	62,6	64	64,3	56,9	61,3
	20,96	57,5	62,3	67,5	61,6	60,9	59	59	58,7	59,1	61,9	60,8	56,1	59,2
	20,62	58,4	60,9	65,1	61,1	61,5	62,6	58,7	57	61,5	58	61,2	55,5	62,1
	20,28	57	61,2	68,3	64,1	60,8	57,8	57,9	57,4	57,5	62,2	62,5	58,2	65,1
	19,94	59,2	64,2	61,5	62,5	56	58	62,1	59,9	59,1	62,9	62,8	62,6	60,8
	19,61	59,5	62,6	65,6	61,6	59,9	58	59,6	62,5	63,5	59,4	62,9	61,6	58,6
	19,27	60,2	62,5	66,4	58,7	58,4	60,3	60,6	64,6	64,8	65,1	66,2	62,1	62,5
	18,93	60,6	63,5	63,4	65,6	57,6	61,2	65,1	62,9	64	70,9	67,2	62,4	62,5
	18,59	65,1	60,3	64,5	61,9	60,6	60,3	57,1	60,2	63,5	68,2	67,3	64	63,2
	18,25	61	62,3	65,9	58,8	65,2	58,3	61,5	58,7	63,7	62,5	62,8	63,2	62,4
	17,92	60,3	63,2	69,7	65,1	58,6	61,5	58,8	62,6	63,5	63,4	63,2	64,9	61,5
	17,58	63,9	64	65,1	62,8	57,4	62,4	58,8	59,4	64,5	63,2	63,1	64,9	63,8
	17,24	61,3	59,8	62,8	59,2	60,3	56,7	57,6	59,4	63,2	63,4	64,6	64,9	67,7
	16,90	65,6	58,6	65,4	62,4	60,1	61,1	60,5	61,6	65,7	62,9	65,6	64,6	67,5
	16,56	63,7	63,1	63,7	61,9	59,1	56,1	59,1	61,9	63,7	69,2	66,2	69,4	68,3
	16,23	60,6	62,6	60,6	60,6	60,6	59,7	59,8	63,7	65,6	72,6	76,8	74,6	69,7
	15,89	61,5	61,5	63,4	62,5	60,2	60,8	62,6	61,3	64	73,9	74,6	72,9	70,4
	15,55	63,4	61,8	63,2	62,4	59,8	59,9	62,6	61,5	68,3	74,6	81	74,7	73,1
	15,21	61,3	62,4	61,8	65,6	61	59,1	61,2	63,7	68,7	74,7	78	72,4	74,6
	14,87	61,1	61,9	63,7	62,2	61,6	56,7	61,8	66,7	65,9	69,4	72,9	72,2	68,2
	14,54	60,2	61,5	62,8	63,1	59,6	59,9	59	60,3	64,8	69	65,6	66	62,4
	14,20	59,8	60,3	62,9	65,6	59,8	58,7	59,1	59,8	62,5	63,7	65,6	68,5	48
	13,86	61,5	58,2	59,5	63,2	57,8	58,2	57,5	62,2	64,3	62,2	61,6	60,3	39,4
	13,52	58,4	63,5	61,8	61,6	58,3	58,6	57	60,3	58,6	60,3	61,5	61,5	--
	13,18	61,5	63,4	63,2	63,4	57,8	56,9	58,3	58,8	58	60,9	59,7	61,9	--
	12,85	60,9	67,8	67,8	65,6	61,5	57,8	58,7	59,5	59,2	60,3	61,8	61,5	--
	12,51	60,1	64,6	66,8	64,2	61	57,8	54,4	59,8	63,2	60,3	66,7	58,4	--
	12,17	60,2	66,5	66,4	64,9	59,6	59,5	57,4	58,8	59,4	61,9	62,5	61	--
	11,83	60,1	66,2	65,2	65,6	61,5	59,8	58,3	58,7	58,2	60,9	59,1	60,6	--
	11,49	64	66,4	64,5	64,8	61,5	58	56,2	58,3	59,2	61,3	59,8	58,4	43,2
	11,15	66,7	69	65,4	63,5	61,1	58,7	58,3	61,3	58,7	60,9	57	58,8	--
	10,82	60,9	70,4	68,2	62,2	57,5	57,8	60,3	57,8	61,2	58,3	58,6	58	--
	10,48	58,3	69,2	69,5	60,1	62,8	61,2	60,8	62,6	60,2	58	59,8	59,1	--
	10,14	60,3	63,5	64,2	62,4	60,8	59,1	63,4	59,8	63,7	60,9	59,2	56,6	--
	9,80	58,8	59,8	64	63,4	61,6	64	64,2	62,6	58,4	63,5	60,2	55,1	--
	9,46	58,2	61,5	59,9	58,3	61	60,8	64,5	61,6	60,3	58,8	61,9	53,9	--
	9,13	57,4	59,2	62,6	61,1	58,4	61,6	64	59,4	63,1	57,2	59,7	51,2	--
	8,79	63,2	61,5	62,5	61	61,8	59,5	62,6	59,6	60,3	59,6	60,1	52,5	--
	8,45	62,2	62,5	60,1	62,8	60,9	60,6	59,2	57,8	58,7	58,8	61	52,7	--
	8,11	62,3	60,9	59,6	59,9	60,6	59,1	61	56,5	61,2	59,2	61,2	52,3	--
	7,77	68,5	67,8	64,2	62,5	57,5	61,5	60,8	57,4	59,9	61	63,5	54,4	--
	7,44	64,8	64,8	67,2	64	62,2	60,2	60,6	56,4	59,1	61,8	63,2	53,7	--
7,10	67,5	66,8	63,1	63,1	62,9	63,1	59	58,4	57,1	61,5	64,5	53,3	--	
6,76	68,5	66,8	61,9	61,9	61,6	62,9	60,9	59,2	57,5	59,9	66,2	53,2	--	
6,42	63,8	60,3	64,8	66,8	64,5	65,2	63,8	60,8	57,9	62,1	61,8	51,7	--	
6,08	68,3	59,4	64,3	60,8	66,7	59,8	63,7	59,9	62,5	61,8	61,1	50	--	
5,75	64,3	60,1	62,6	64,8	63,5	59,1	63,2	63,5	63,7	66,2	63,5	53,9	--	
5,41	61,6	59,8	62,6	62,6	64,8	63,4	65,4	63,7	64,6	62,8	53,7	57,8	--	
5,07	61,5	64,6	65,9	65,2	64,3	60,5	62,8	64	63,1	64,8	58	58	--	
4,73	65,6	61,5	64,9	65,2	63,1	62,9	64,2	62,4	60,2	66	64,8	54	--	
4,39	63,2	58,4	66,7	67	64,6	61,1	67,7	57,6	62,2	60,3	63,2	60,5	--	
4,06	64,2	63,2	67,3	68	66,2	60,6	62,9	60,8	61,8	64	63,9	61,6	--	
3,72	62,9	68,2	68,3	72,6	68,9	63,2	62,2	57,8	57,6	63,8	63,2	58,2	--	
3,38	69	66	69,9	69,9	63	63,2	60,3	63,2	61,6	62,8	63,7	58,2	59,5	
3,04	64,8	67,3	71,1	70,9	62,2	65,1	57,4	60,8	57,9	62,5	59,9	61,5	57,8	
2,70	64,8	65,2	68,2	67,8	62,8	63,9	64,3	57,1	57,5	61,8	61,6	60,8	58,3	
2,37	68	67,3	66	66,8	65,4	63,4	60,8	59,6	62,2	61,2	57,9	56,1	62,5	
2,03	65,4	66,4	67,8	66,2	61,1	59,6	60,9	62,6	58,7	60,3	59,7	59,8	60,9	
1,69	66,2	69,4	64,3	62,2	66	58,6	56,1	62,6	57,4	61,9	61,8	60,8	59,8	
1,35	67,5	60,8	63,4	62,2	63,1	64,2	55,4	55,7	60,8	60,5	57,6	59,2	57,5	
1,01	63,1	64,2	63,7	58,7	59,8	59,4	56	52,9	61,1	59,8	61,8	59,6	60,6	
0,68	59,9	59,9	62,4	56,6	57,9	58	52,2	52	53,7	55,8	55,2	56,2	55,1	
0,34	58	56	58	55,2	51,5	49,9	49	51,4	53,4	52,9	54,4	53,5	51,3	
0	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,12	3,46	3,81	4,15	4,50	
	Y – osa [mm]													

Prilog 5.5. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 2.2

59,9	63,4	61,2	57,6	63,5	60,6	70,6	56,9	58,7	59	58,4	59	60,1	24	X – osa [mm]
64,6	62,6	59,6	57	58	65,4	61,8	57,1	58,4	58,7	62,4	61,9	60,5	23,55	
61,9	64,5	65,4	57,4	60,1	63,5	63,5	59,6	57,5	60,9	63,4	60,8	63,1	23,09	
63,1	63,5	60,9	60,8	61	61,8	60,8	58,4	62,8	60,8	62,6	61,6	65,2	22,64	
64,8	63,8	64	61,2	59,4	63,4	62,3	62,8	59,5	62,9	61,6	62,2	68,5	22,19	
68,2	61,2	66,2	60,2	62,2	62,8	62,6	63,7	60,1	59,8	64,2	59,8	63,5	21,74	
63,8	59,5	62,5	62,5	62,5	64	60,8	62,1	61,5	60,5	62,6	61,6	65,2	21,28	
62,9	62,2	62,8	58,8	57,8	59,9	58,8	59,9	59,2	61,2	60,6	63,1	59,2	20,83	
68,3	64,6	59,5	58	60,3	56,9	61,3	60,6	60,2	61,1	58,8	61,8	56,5	20,38	
65,2	62,9	64,2	63,1	56,9	58,3	59,9	59,8	59,8	61,5	58,7	62,4	42,6	19,92	
62,4	66,2	60,1	63,5	58,7	58,3	60,6	61,5	59,9	60,9	60,8	64,8	--	19,47	
62,4	62,1	64,6	63,1	58,6	60,8	61	60,5	59,9	58,8	61,2	63,8	--	19,02	
59,2	64,3	62,8	61,6	61,2	60,2	58,4	61,1	59,6	62,1	60,6	64,9	--	18,57	
64,5	66	61,3	64,5	59,5	58,2	59,9	61,8	61,9	64,6	60,9	66,5	--	18,11	
60,8	64,2	64,6	63,4	61,9	62	58,3	61,9	59	60,8	61,8	62,2	--	17,66	
60,3	59,8	59,8	62,4	61,3	59,1	60,6	59,6	57,5	62,1	62,5	62,6	--	17,21	
58	60,9	59,4	61,3	59	62,1	58,8	60,5	58,4	63,9	60,5	63,7	--	16,75	
56,4	58,3	59,9	59,9	60,5	60,3	60,8	57,5	59,8	63,4	63,7	63,9	--	16,30	
56,9	57,2	59,2	60,2	58,7	59,6	59,2	59	61,8	62,9	62,5	66,4	--	15,85	
60,9	61,3	60,1	58,6	57,2	58,7	59,4	61	60,3	60,6	61,5	69,5	--	15,40	
56,7	59,2	60,1	63,4	59	60,3	58,2	59,8	59,4	61,6	61,9	63,7	--	14,94	
55,1	61,9	62,5	62,2	58,4	59,7	60,8	59,6	61	59,4	60,3	59,5	--	14,49	
55,6	60,5	60,9	61,2	62,2	60,8	58,6	60,5	57,8	62,6	58,7	59,8	--	14,04	
59,2	61,6	61,2	60,3	58,6	61,5	61,6	59,1	57	58,3	59	60,2	--	13,58	
58,8	61,6	61,2	61,9	59,2	56,7	58,7	57,5	60,8	60,8	58	62,6	--	13,13	
58,7	59,4	62,6	61,2	57,8	57	60,1	56,7	59,5	60,2	57	58,6	--	12,68	
53,8	60,8	62,4	59,9	61,8	57,4	60,2	58,4	58,8	59,4	58,8	56,1	--	12,23	
56,9	61	60,1	61,5	59	59,2	61	57,4	59,2	58,8	59,5	55,1	--	11,77	
57	59,6	62,1	62,6	59,8	61,2	61,8	58,7	60,3	57,4	58,8	54,1	--	11,32	
56,1	58,8	58,4	59,6	59,2	58,7	63,4	60,1	60,1	57,4	59,9	53,8	--	10,87	
53,3	59,6	58,2	61,1	59	60,2	62,1	62,1	57,4	60,2	59,1	53,6	--	10,42	
--	55,4	58,2	59	59,2	63,1	63,1	61,9	59,1	58,7	60,8	53,7	--	9,96	
--	56	57	57,9	58,7	62,5	61,1	61	57,6	57,5	59	55,2	--	9,51	
--	55,4	56,4	57,8	60,6	60,3	62,2	59,9	60,3	57,2	59,9	54	--	9,06	
--	57,5	60,1	56,9	61,2	60,3	60,9	59,9	57,9	60,8	61,9	55,4	--	8,60	
--	56,5	55,7	58,2	57,9	60,6	60,2	60,5	58,7	61,7	60,1	56,4	--	8,15	
57,6	62,1	60,9	59	58,3	61,2	61	56,7	58	59	63,4	57,5	--	7,70	
58,3	63,1	62,2	61,8	62,9	58,7	61,2	58,7	56,5	59,2	62,8	55,2	--	7,25	
57,8	58,8	65,2	58,7	61,8	62,1	59,6	59,4	57,1	57,5	63,2	57,1	--	6,79	
58,8	59,9	59,2	60,1	62,9	60,5	60,6	61,2	58	58,9	62,1	56,9	--	6,34	
59,4	60,3	61,2	61,5	59,8	59,8	59,8	60,2	59,2	58,8	63,7	55,9	--	5,89	
59,4	60,6	58,7	64,6	59,5	62,6	59,1	62,8	62,9	60,2	62,9	54,4	--	5,43	
56,5	58,7	61,6	61,9	62,2	60,9	63,2	60,9	63,4	59,1	60,9	57,4	--	4,98	
60,2	58,2	59,5	61,6	61,6	63,1	60,9	63,5	65,2	62,8	49	60,5	--	4,53	
60,6	58,6	60,9	61,8	63,5	61,6	58,3	60,9	64,3	62,3	61,2	73,5	--	4,08	
57,4	60,9	61,2	58,6	60	60,6	63,1	64,5	62,9	59,2	60,9	66,5	--	3,62	
63,7	60,6	61,6	64,8	62,3	61,1	60,5	63,2	64,2	63,4	62,6	70,1	--	3,17	
60,1	60,8	60,6	61,8	59,9	60,8	64,8	59,9	59	62,5	60,5	66,2	--	2,72	
61,2	59	62,8	61,3	60,9	60,9	63,5	59,8	64,3	62,5	59,9	69,2	63,7	2,26	
56,4	62,5	62,5	64,2	60,9	62,9	61,9	62,1	61,6	62,9	64,2	66,2	70,1	1,81	
60,5	62,2	61,2	66,8	60,9	59,7	64	62,6	61,6	64,6	59,6	66,2	68,3	1,36	
57,2	64,6	64,8	64,2	64,8	62,1	61,9	60,9	60,6	59,6	60,3	66,5	68,7	0,91	
58	65,9	61,2	65,4	62,5	62,6	60,2	62,6	63,4	61,2	62,8	65,7	69,2	0,45	
4,50	4,15	3,81	3,46	3,12	2,77	2,42	2,08	1,73	1,38	1,04	0,69	0,35	0	
Y – osa [mm]														

Prilog 5.6. Rezultati mapiranja mikrotvrdoće uzorka KA 2.3

X – osa [mm]	24	53	50,1	52,3	59,1	58,7	60,2	64	58,4	59,6	56,1	57,8	54,5	53,3
	23,61	54,5	53,6	52,5	60,3	56,6	60,5	65,9	60,3	58,8	59,2	56,7	55,6	55,5
	23,21	52,5	53,9	53	58,6	62,3	59,9	67,7	65,1	60,9	58,2	58,6	55,1	56,9
	22,82	54,4	56,7	57,4	58,8	57,8	65,1	62,9	59,8	61,6	62,3	56,2	56,9	57,9
	22,43	58,3	56,6	57,5	57,1	60,1	65,4	66,4	61,2	67,2	58,7	60,9	59,9	58,2
	22,03	57,4	56,4	56,9	57,9	56,5	68,3	68,8	63,1	62,6	59,4	57,5	59,1	57
	21,64	59,5	55,7	62,3	59,9	61,6	68	67,7	71,6	58,7	59,8	60,6	55,5	57,9
	21,25	43,6	55,2	60,1	59,4	56,9	62,5	68	67,3	58,3	59,6	57	62,4	58,1
	20,85	--	57,5	55,4	58,6	61,3	62,2	70,2	63,4	62,4	64,6	59	55,4	56,9
	20,46	--	58,3	55,2	59,4	56,9	63,7	65,4	63,2	61,5	57,9	60,9	56,5	56,7
	20,07	--	57,8	57,6	56,4	59	58,2	64,5	62,6	57,9	57,4	56,7	59,2	57,4
	19,67	--	57,6	58,6	57,2	60,8	62,1	63,2	64,5	58	58,4	59,2	62,5	63,2
	19,28	--	58,2	54,4	61,2	65,6	63,8	70,6	69,4	61,9	59,9	59	57,6	58,7
	18,89	--	59,4	54,4	60,1	63,4	67,8	67,3	68,7	62,4	59	57,6	58,7	58,4
	18,49	--	54,7	58,7	59,5	62,9	62,4	67	69,2	61,9	64	56,2	57,5	55,1
	18,10	--	53,2	61,9	57,4	59,9	63,2	65,2	66,7	60,8	65,2	61,3	60,9	58,2
	17,70	--	49,8	59,6	59,8	54,9	57,8	65,6	60,5	62,4	55,9	59,1	56,7	59,4
	17,31	--	50	60,2	59,4	53,7	60,9	59,9	59,6	55,7	58,6	60,8	58,8	57,6
	16,92	--	47,8	59,8	56,7	53,4	53,6	57,6	58	61,9	59,9	58	58	57,5
	16,52	--	47,3	58	57	57,8	54,6	60,3	60,2	58,2	57,4	57,9	58,7	61,9
	16,13	--	47,7	58,8	57,1	59,1	56,9	60,2	60,1	54,7	52,6	53,3	52	--
	15,74	--	49,2	58,4	54,4	57,9	54,7	59,5	60,6	58,3	54,3	54,5	50	--
	15,34	--	49,2	59	57,9	62,2	59,9	63,4	64	55,7	55,6	52,7	52,4	49,4
	14,95	--	48,1	60,6	59,4	62,2	60,6	63,7	62,2	56	55,6	55,5	52,7	54,7
	14,56	--	49,3	61,2	63,5	61,9	63,5	65,7	61,6	57,8	56,9	54,9	53,7	54,4
	14,16	--	50,4	61,3	60,2	63,5	64,9	64,5	63,2	57,1	56,6	57,2	51	52,9
	13,77	--	52,1	64	65,4	62,8	62,9	66,4	59,4	64,2	57	56,4	57,4	52,1
	13,38	--	52,4	60,6	65,2	61,2	61,6	65,7	64,8	59	58,8	59,1	54,7	54
	12,98	--	51	64	64,5	66	64,9	67	66,4	63,5	63,2	60,2	59,9	59,1
	12,59	--	54,9	65,2	66,4	61,5	64,2	67,5	64,6	61,3	62,9	62,8	62,8	56,6
	12,20	--	53,9	64,2	61	64,9	66,2	67,7	62,2	56	61,9	63,7	63,4	63,2
	11,80	--	54,1	61	60,1	62,8	65,4	68,2	60,3	60,5	64,6	63,1	62,9	62,6
	11,41	--	55,2	61,6	60,9	64,6	64,2	65,1	67,7	64,8	57,2	62,6	60,5	66,7
	11,02	--	57,8	60,1	57,6	60,8	60,8	61,3	63,1	62,2	59,1	58,4	58,8	66,8
	10,62	--	57,2	58,8	59	61,9	61,9	61,9	62,6	60,8	59,6	57	57,1	65,2
	10,23	--	58,3	58,4	60,8	63,2	62,5	64	65,5	62,5	59,1	57,8	56,4	63,7
	9,84	--	57,6	64,5	61,3	59,9	68,2	66,7	66	64,2	55,4	56,5	56,7	61,3
	9,44	--	63,7	64,8	62,2	64,3	68,7	73,9	67,8	64	59,8	58,7	55,2	57,5
	9,05	--	63,2	63,8	63,1	64,3	73,9	73,1	76,8	66	61,8	57,8	55,5	58,3
	8,66	--	62,9	62,2	65,2	69	73,9	75,6	71,8	64,8	61,6	58,7	56,7	57,9
	8,26	--	61,8	63,5	63,4	73,5	74,1	73,5	73,5	65,1	61,2	58,2	57,2	62,1
	7,87	--	60,5	63,8	62,1	64,3	67,8	69,9	72,4	69	66	60,2	57	61,2
	7,48	--	62,6	61,5	63,8	67,5	67,2	68,7	71,5	68,5	65,2	60,8	61,6	59,8
	7,08	50,6	60,6	61,3	63,2	66,8	64,2	69,4	74,3	69	69,7	60,5	61,8	61,5
	6,69	62,6	62,2	60,9	61,5	62,5	67	69,4	72,4	76	70,6	66	59,1	61
	6,30	65,7	59	61,2	62,2	61,2	67	71,1	78,5	70,9	72,8	64,3	61,5	60,6
	5,90	62,4	60,5	63,5	63,1	62,6	65,6	69,4	71,5	75,8	69,9	64,5	61,3	63,1
	5,51	62,1	62,4	62,2	60,8	66,4	66	68,5	66,8	67,8	67,8	64,9	60,3	64,6
	5,11	59,4	59,1	59,8	61,2	66,7	68,3	69	63,9	66	61,9	59,4	58,2	59,5
	4,72	59,1	58,6	59,9	65,1	68,7	66,4	63,4	68,2	63,7	61,2	60,8	61,8	66,2
4,33	58,4	56,3	62,5	66,2	67	70,6	73,7	63,1	58,4	59,5	60,3	61,3	60,5	
3,93	60,5	58	59,5	64,5	68,2	71,1	69,5	64	60,5	59	59	58,8	63,1	
3,54	59,5	58,3	60,2	66,8	69,7	69,9	68,2	63,5	58,3	59,8	58,8	59,9	60,9	
3,15	62,1	58,3	62,4	66,2	65,2	75	73,5	60,3	58,4	58,6	59,2	61	62,5	
2,75	64,8	58,4	62,1	65,2	69,4	71,1	73,7	69,7	60,8	62,8	57,1	58,8	62,6	
2,36	63,2	62,8	63,8	68,7	73,3	70,4	70,9	64	60,5	60,8	57,8	58,4	61	
1,97	68,3	62,9	71,7	62,5	66,8	68,9	72,8	67,5	65,7	61,9	56,5	61,6	60,2	
1,57	68,8	58,3	69,4	66,7	68,5	68,5	70,8	71,3	60,9	62,8	60,8	59,9	60,1	
1,18	61,5	60,1	66	69	64,9	72,4	65,6	72,2	59,8	61	58,3	59	62,6	
0,79	57,8	57,6	63,2	66,2	69,5	71,5	66,8	70	62,6	57,5	58,2	59,2	59,5	
0,39	60,9	64,5	64,6	66	66	71,3	72,8	68,7	61,6	61,2	59,1	60,1	60,6	
0	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,12	3,46	3,81	4,15	4,50	
	Y – osa [mm]													

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Заваривање трењем са мешањем двостраним алатом легуре алуминијум-магнезијум-силицијум
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду б) Технички универзитет у Илменау (Савезна република Немачка) в) Војно технички институт, Београд г) Факултет специјалних технологија, Универзитет Александар Дубчек у Тренчну (Република Словачка)
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Докторске академске студије: Машинство
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> У овом раду је описан поступак заваривања са мешањем (ЗТМ) помоћу бобин алата. Анализиране су механичке карактеристике споја кроз експериментална испитивања, као и корозиона постојаност споја. У раду је коришћена легура EN AW 6060-T66, која је заваривана алатима различите геометрије (конвенционални ЗТМ и бобин алат), при различитим брзинама заваривања и различитим помацима. Експериментална докторска дисертација 1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни

1.3. Начин прикупљања података

- а) анкете, упитници, тестови
- б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи
- в) генотипови: _____
- г) административни подаци: _____
- д) узорци ткива: _____
- ђ) снимци, фотографије: Микрофотографије
- е) текст: Преглед литературе
- ж) мапа: _____
- з) остало: _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- а) Excel фајл, датотека: **.xls**
- б) SPSS фајл, датотека: _____
- в) PDF фајл, датотека: _____
- г) Текст фајл, датотека **.doc**
- д) JPG фајл, датотека: **.jpg; .tiff**
- е) Остало, датотека: **Origin lab, .opju; Image J, .jpg**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- а) број варијабли шест (6)
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) : Сто двасесет и четири (124)

1.3.3. Поновљена мерења

- а) да
- б) не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- а) Да*
- б) Не*

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип: Механичка, микроструктурна и електрохемијска испитивања

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип: Анализа доступне литературе

д) остало, навести шта: Анализа јавно доступних података

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Инструменти: Оптички емисиони спектрометар ARL-3580; SPECTROMAXx; Универзална механичка кидалица кидалица VEB ZDM 5/21; Hegewald&Plesche, Inspect, Retrofit; Zwick Roell Vibrophore 1000; Коморна пећ МП-3; Вертикална глодалица PRVOMAJSKA FSSGVK-3; Нумерички управљана вертикална кидалица Deckel Maho FP 3-50; Термовизијска камера ThermoPro TP8; Металографски светлосни микроскоп Leitz Orthoplan, Zeiss Axio Scope.A1; Скенирајући електронски микроскоп JEOL JSM 6460LV; Тракаста тестера MEP Shark 282; Уређај за вакумирање Beuhler Cast N' Vac 1000; Уређај за брушење и полирање Beuhler Phoenix 4000; Уређај за топло затапање узорак QATM Qpress 50; Уређај за електролитичко нагризање Struers Lectropol-5; Уређај за мерење микротврдоће Struers DuraScan 70; Инструментирано Шарпијево клатно JWT-450; Потенциостат GAMRY Instruments Interface 1010E.

Стандарди: ISO 14707:2021; ISO 4957:2018; ISO 6492-1:1019; ISO 25239-1:2020; ISO 25239-2:2020; ISO 25239-3:2020; ISO 25239-4:2020; ISO 25239-5:2020; ISO 5173:2009; ISO 643:2024; ASTM E115-25.

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података?

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Контрола квалитета података је извршена поређењем експерименталних и теоријских података.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду**.

3.1.2. URL адреса: _____

3.1.3. DOI: _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) **Да**

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? **Неограничено**3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да **Не**3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да **Не**3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?
Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности

(https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) **јавно доступни (након објављивања појединачних публикација)**б) **доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области**ц) **затворени**

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално. Дозвољава се умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Милан Пећанац, milan.petjanac@gmail.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Милан Пећанац, milan.petjanac@gmail.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Милан Пећанац, milan.petjanac@gmail.com