



**UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
NOVI SAD**



Mr Milenko Perović, dipl.inž.maš.

**UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA TRENJEM -
MIJEŠANJEM NA OTPORNOST PREMA LOMU
SUČEONOG SPOJA LEGURE ALUMINIJUMA VISOKE
ČVRSTOĆE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori:

Prof. dr Marko Rakin, redovni profesor

Prof. dr Sebastian Baloš, vanredni profesor

Novi Sad, 2018.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:	Монографска публикација		
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација		
Аутор, АУ:	Мр Миленко Перовић, дипл.инж.маш.		
Ментори, МН:	Проф. др Марко Ракин, редовни професор		
Ментори, МН:	Проф. др Себастиан Балаш, ванредни професор		
Наслов рада, НР:	Утицај параметара заваривања трењем - мијешањем на отпорност према лому суоченог споја легуре алуминијума високе чврстоће		
Језик публикације, ЈП:	Српски		
Језик извода, ЈИ:	Српски / Енглески		
Земља публикавања, ЗП:	Србија		
Уже географско подручје, УГП:	Војводина		
Година, ГО:	2018.		
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт		
Место и адреса, МА:	Подгорица, Риста Драгићевића 54.		
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	(8/237/271/20/241/0/0)		
Научна област, НО:	Машинско инжењерство		
Научна дисциплина, НД:	Технологије спајања метала		
Предметна одредница/ Кључне ријечи, ПО:	Механика лома заварених спојева		
УДК			
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду		
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:	У дисертацији је представљен поступак спајања топљењем незаварљиве легуре алуминијума EW АН 7049А у стању Т 652 поступком заваривања трењем - мијешањем. Коришћењем пет различитих типова алата за заваривање, варијацијом брзине заваривања и броја обртаја, заварени спој достиже ефикасност од 70% до 80 % затезне чврстоће основног материјала. Карактеризација завареног споја изведена је стандардним методама за експериментално одређивање енергије удара и ударне жилавости на <i>Charpy</i> епруветама, а испитивања механике лома заварених спојева савијањем у три тачке <i>SENB</i> епрувета (ASTM E 1820), попречно на правац заваривања у зони највише погођеном термомеханичким утицајем алата. Критеријумима еласто-пластичне механике лома (<i>CTOD</i> -отварање врха прслине и <i>J</i> -интеграла) утврђена је већа отпорност према ширењу прслине у различитим мјестима завареног споја (центру, страни напредовања и на повратној страни метала шава) него у основном материјалу.		
Датум прихватања теме, ДП:	2015.		
Датум одбране, ДО:	2018.		
Чланови комисије, КО:	Предсједница	Др Катарина Герић, редовни професор	
	Члан	Др Дарко Бајић, редовни професор	
	Члан	Др Томаж Вухерер, доцент	Потпис ментора
	Члан,ментор	Др Марко Ракин, редовни професор	
	Члан,ментор	Др Себастиан Балаш, ванредни професор	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material printed
Contents code, CC :	Doctoral thesis
Author, AU :	MSc Milenko Perović
Mentor, MN :	Dr Marko Rakin, full professor
Mentor, MN :	Dr Sebastian Baloš, associate professor
Title, TI :	Influence of parametars of friction-stir welding to fracture resistance of high toughnees aluminium alloy butt joint
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2018.
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Podgorica, Rista Dragičevića 54
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/ graphs/appendixes)	(8/241/237/20/241/0/0)
Scientific field, SF :	Mechanical engineering
Scientific discipline, SD :	Joining Tehnologies
Subject/Key words, S/KW :	Fracture mechanical welded joint
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	The thesis presents the procedure of joining by melting of unweldable alloy of Al EW AN 7049A of status T 652 by the procedure of friction-stir welding. By using five various types of tools for welding, variation of welding velocity and number of revolutions, the welded joint shall reach the efficiency of 70% -80% of tensile strenght of basic material. Characterization of welded joint was made by standard methods for experimental determination of impact energy and impact toughness on <i>Charpy</i> tubes, and breakage mechanical properties by bending in three points of <i>SENB</i> tubes (ASTM E 1820), transversely to direction of welding in the zone of highly affected thermo mechanical impact of tool. Criteria of elastoplastic mechanics of the fracture (<i>CTOD</i> crack opening displacement and <i>J-integral</i>) determined bigger resistivity to cracking at various locations of welded joint (center, side of advancing and on retreating side of the seam metal) than on the basic material.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	2015.
Defended on, DE :	2018.
Defended Board, DB :	President: Dr Katarina Gerić, full professor
	Member: Dr Darko Bajić, full professor
	Member: Dr Tomaž Vuherer, assistant professor
	Member, Mentor: Dr Marko Rakin, full professor
	Member, Mentor: Dr Sebastian Baloš, associate professor
	Menthor's sign

ZAHVALNICA

Sa velikom zahvalnošću odnosim se prema mentorima Marku Rakinu, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu i Sebastianu Balošu, vanrednom profesoru Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu na iskazanom strpljenju, bezuslovnoj i svesrdnoj pomoći u svim fazama izrade disertacije. Naročitu zahvalnost dugujem Tomažu Vuhereru, docentu Fakulteta za strojništvo u Mariboru i vođi Laboratorije za zavarivanje, na trudu i posvećenosti u osmišljavanju i realizaciji brojnih i obimnih sadržaja eksperimentalnog dijela disertacije. Za kolegijalnost i podršku, iskrena zahvalnost pripada sugrađaninu Darku Bajiću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Podgorici sa kojim sam provodio beskrajno sadržajne minute i sate razgovora, Katarini Gerić, redovnom profesoru FTN u Novom Sadu i Dr Kati Kovačević, rukovodiocu Sektora za laboratorijska i tehnička ispitivanja ICM Nikšić, na savjetima i prijateljskoj pomoći u objašnjenju rezultata SEM i EDS analize površine preloma uzoraka.

Ovog rada ne bi bilo, sasvim je izvjesno, da me Dr Radovan Kovačević, izuzetno dragi profesor sa osnovnih studija mašinstva u tadašnjem Titogradu, sada ugledni profesor na Southern Methodist University u Dallasu – država Teksas (USA), nije početkom ovog vijeka „zarazio“ zavarivanjem trenjem miješanjem. Učinio je to na način da sve više vjerujem da moja ljubav prema zavarivanju nije samo dar od Boga, nego ovozemaljsko prokletstvo profesije kojoj svim bićem odavno i bez ostaka pripadam.

Veliki doprinos da rad na ovoj temi ugleda ljepotu svjetlosti dana dali su Dr Aleksandar Živković, zamjenik izvršnog direktora GOŠE FOM iz Smederevske Palanke u čijim su proizvodnim pogonima zavareni eksperimentalni uzorci, kao i kolega Dr Darko Veljić za zajednički rad od početka do kraja eksperimentalnih zavarivanja dvije visokočvrste legure aluminiijuma. Ogriješio bih se da ovom prilikom ne pomenem svu logistiku koju su mi pružali prof. dr Branislav Jeremić, prof. dr Petar Todorović i prof. dr Branko Tadić kao i njihov saradnik Uroš Proso sa Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu. Posebno veliko hvala kolegama Veselinu Andrijaševiću iz Nikšića i Gojku Dapčeviću iz Podgorice na stručnoj i nesebičnoj pomoći, kao i na moralnim podsticajima da ne „pogleknem“ u periodima kada je neizlječiva bolest atakovala na moje zdravlje.

Cijelo vrijeme dok sam radio na disertaciji pratilo me je iskreno prijateljstvo kolege i prijatelja Miodraga Jevtovića iz Beograda i njegove divne porodice, na čemu im se nikada ne mogu odužiti. Zahvalan sam Vesku Samardžiću i Mr Željku Gurešiću na pomoći u tehničkoj obradi teksta.

Odavno upokojenim roditeljima, ocu Mirku i majci Ljubici, ovaj rad još je jedno istinsko sinovljevo poklonjenje njihovim sjenima. Sve ove godine pratila me bezgranična ljubav brata Momčila i razumijevanje snahe Radmile. Hvala kolegama iz Kombinata aluminiijuma Podgorica i Privredne komore Crne Gore sa kojima sam dijelio i dijelim zajedničke godine profesionalnog rada.

Porodici, supruzi Radi i sinovima Mirku i Bošku, od kojih sve izvire i u koje sve ponire, a izvan kojih ne postoji ništa svetije, pripada moja vječna zahvalnica.

Podgorica, januara 2018. godine

Autor

Rezime

U ovom radu analizira se uticaj brzine zavarivanja, broja obrtaja, dužine i ugla nagiba konusa trna alata sa zavojnicom, odnosno kinematskih i geometrijskih parametara procesa zavarivanja trenjem miješanjem, na otpornost prema lomu sučeonog spoja u nekonvencionalnoj višefaznoj toploočvršćavajućoj leguri aluminijuma. Upotreba ovih konstruktivnih materijala u brojnim tehničkim sistemima u vojnoj industriji značajno je smanjena zbog nemogućnosti ostvarivanja kvalitetnog zavarenog spoja topljenjem. Primarni cilj je izučavanje sposobnosti zavarivanja metalurški posebno dizajnirane legure aluminijuma visoke čvrstoće faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu, bliske standardnoj EN AW 7049A, postupkom trenjem miješanjem, odnosno rotirajućim alatom. Pokušaj zavarivanja pokazao se eksperimentalno izvjesnim i postignuta je zatezna efikasnost spoja od 70% do 80% koliko iznosi efikasnost spoja elektro-lučnim topljenjem zavarljivih aluminijumskih legura.

Geometrijska nesimetričnost i postojanje dvije, po metalurškim transformacijama različite strane oko centra alata u MŠ, uslovia su potrebu za udarnim ispitivanjima u centru MŠ (zoni „grumena“) i na još četiri različita mjesta u ZTMU (zoni termomehaničkog uticaja), kao i ispitivanjima parametara elasto-plastične mehanike loma za određivanje krivih otpornosti na bazi konturnog J-integrala sa oštrom zamornom prslinom usmjerenoj suprotno pravcu zavarivanja u zoni zavarenog spoja i OM.

Komparacija vrijednosti odnosa energije udara potrebne da se inicira prslina E_i sa energijom potrebnoj njenom propagiranju E_p , dobijeni su na instrumentalizovanom Charpy klatnu. Položajima zareza lociranim u različitim strukturnim sadržajima zavarenog spoja (centru MŠ - zoni „grumena“ i ZTMU na strani napredovanja i povratnoj strani MŠ), pri varijaciji brzine zavarivanja i broja obrtaja kod geometrijski različitih tipova alata za zavarivanje, omogućeno je da se sagleda da je E_p preko četiri puta veća od E_i . Analizom područja stabilnog i nestabilnog rasta prsline u tri koraka (zamor, širenje prsline i zamaranje do loma) data je ocjena zamornog ponašanja zavarenog spoja u prisustvu greške tipa oštre prsline u ZTMU, koristeći SENB epruvete savijanjem u tri tačke i sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem-metodom popuštanja (ASTM E 1820). Analizom plastičnog ponašanja materijala sa prslinom dobijene su vrijednosti otvaranja vrha prsline CTOD i konturnog J integrala nezavisnog od putanje i određena vrijednost žilavosti loma K_{JIC} za OM, jezgro MŠ-zonu „grumena“ i ZTMU na strani napredovanja i povratnoj strani MŠ, koje su pokazale da najmanju otpornost prema širenju prsline posjeduje OM.

Profil i distribucija raspodjele tvrdoće u dva nivoa (donjem i gornjem) duž MŠ i upravnoj liniji iz centra poprečnog presjeka zavarenog spoja, jasno pokazuju uticaj dinamičke rekristalizacije kao posledice usitnjavanja zrna i orijentacije kristala, ali i prisustva IM faza izdvojenih na granicama zrna u strukturnoj građi OM.

Upravo su malo rastvorljivi elementi kao željezo i silicijum, a posebno naponska korozija, identifikovani skenirajućom elektronskom mikroskopijom, naslijeđjeni od prethodnih faza obrade osnovnog materijala, glavni uzrok pojave izmiješanih nerastvornih IM faza na granici razdvajanja ZTMU i ZUT i nestabilnog rasta zamorne prsline.

Kako ne postoji direktan način mjerenja osobina i karakteristika spoja tokom trajanja procesa zavarivanja, razvijen je poseban model mjerne konfiguracije praćenja promjena signala mjerljivih reaktivnih parametara procesa za vrijeme odvijanja faza i ciklusa zavarivanja. On se zasniva na monitoringu mjerenja i kontrole intenziteta sile zavarivanja F_z , oscilacija dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} , ubrzanja alata a_x , a_y i a_z i termalnoj istoriji faza prodiranja alata u OM i ciklusa zavarivanja, u cilju formiranja baze podataka za koncept tehnološkog procesora kojim bi u budućnosti moguće, mijenjajući vrijednosti ulaznih faktora, dobiti još bolje osobine zavarenog spoja.

U daljoj evaluaciji može se formirati baza podataka tehnološkog procesora kako bi se uspostavila zavisnost između tehnoloških parametara procesa i parametara mehanike loma zavarenog spoja pločastih otkovaka od visokočvrste homogenizovane vještački starene legure aluminijuma, bliske standardizovanoj leguri EN AW 7049A u stanju T652, proizvedene u domaćim industrijskim uslovima.

Ključne riječi: *zavarivanje trenjem - miješanjem, parametri procesa, energija udara, elasto-plastična mehanika loma*

Abstract

This thesis analyses influence of welding velocity, revolutions number, pin length and tilt angle of the coil tool pin cone, that is, kinematic and geometric parameters of the process of friction stir welding, resistance to fracture of the butt joint in nonconventional multiphase heat resistant Al alloy. Usage of those constructive materials in numerous technical systems of military industry has been reduced significantly due to inability to achieve the quality welded joint by fusion. Primary goal is to study the ability of welding of metallurgical specially designed alloy of Al of Al-Zn-Mg-Cu phase composition, close to standard EN AW 7049A, by friction stir procedure, that is, rotating tool. The attempt of welding proved to be experimentally certain and the efficiency of joint of 70% to 80% was achieved, which is the efficiency of joint resulting from arc welding of weldable aluminium alloys.

Geometric asymmetry and existence of two, as per metallurgical transformations various sides around the centre of tool in the welded joint metal, conditioned the need for impact tests in the centre of the welded joint metal (zone of lump) and on four more different places in the zone of thermomechanical influence and examinations of parameters of elastoplastic fracture mechanics to determine resistance curves on the basis of contour J-integral with sharp fatigue crack opposite to direction of welding in the zone of welded joint and basic material.

Comparison of ratio values of impact energy of E_u impact separated to energy necessary to initiate the crack E_i and energy required it to propagate E_p , produced on instrumentalized Sharpy pendulum in the positions of a notch located in various structural contents of welded joint (centre of welded joint metal-zone of “ lump” and ZTMU on the side of advancing and retreating side of the seam metal) for variations of welding velocity and number of revolutions, at geometrically various types of tools for welding, has shown that E_p is more than four times larger than E_i which is extremely favourable for welded construction. Analysis of the area of stable and unstable growth of the crack in three steps (fatigue, crack extension and fatigue to crack) rated the fatigue behaviour of welded joint in the presence of error of sharp crack type in ZTMU, using the SENB tubes by bending at three points and successive back down (ASTM E 1820). Analysis of plastic behaviour of material with the crack resulted in values of crack opening displacement CTOD and contour J integral independent of the path and certain value of fracture toughness K_{jic} for basic material, core of the welded joint metal –lump zone and ZTMU on the side of advancing and retreating side of seam metal which have shown that basic material has the least resistance to crack extension.

Profile and distribution of hardness in two levels (lower and upper) along the metal of seam and in the upright line from the centre of cross section of welded joint, indicate the impact of dynamic recrystallization as a consequence of grain breaking and crystal orientation and presence of IM phases separated at grain boundaries in the structural structure of basic material.

Poorly soluble elements like iron and silicon, especially voltage corrosion, identified by scanning electronic microscopy, inherited from previous phases of processing of basic material,

are main cause of the occurrence of mixed insoluble IM phases on the separation boundary of ZTMU and ZUT and unstable growth of fatigue crack in that area of welded joint.

Since there is no direct way to measure features and characteristics of welded joint during the process, it has been developed special model of measurement configuration to monitor signal changes of measurable reactive process parameters during the phases and cycles of welding. It is based on the monitoring of welding force control F_z , dynamic component of welding force F_{zd} , oscillations of tools a_x , a_y , and a_z and thermal history of tools penetration phase into the basic material and welding cycle in order to form the database for the concept of technological processor by which it would be able to get, in the future, by changing values of input factors, better features of welded joint.

Database of technological processor may be created during further evaluation in order to establish dependency between technological parameters of process and parameters of fracture mechanics of the welded joint relating to plate forgings of high strength homogenized artificially aged alloy of aluminium similar to standardized alloy of Al EN AW 7049 A of the status T652.

Key words: *friction stir welding, process parameters, impact energy, elastoplastic mechanics of fracture*

PREDGOVOR

Višegodišnje radno iskustvo u industriji aluminijuma i profesionalno opredeljenje prema spajanju metala u potpunosti su autora usmjerila da sebe pokuša pronaći u okvirima inženjerske primjene specifičnog postupka zavarivanja u spajanju karakteristične legure aluminijuma visoke čvrstoće.

Inovativna tehnologija zavarivanja materijala trenjem miješanjem u plastičnom stanju- FSW* patentirana prije dvije i po decenije, veoma je složen proces interakcije alata za zavarivanje i predmeta obrade. Ovaj postupak formiranja monolitne veze istorodnih ili raznorodnih metalnih materijala pobudio je do tada nezabilježenu pažnju uskostručne javnosti akademske zajednice. Međutim, u sjenci opsežnih istraživanja čiji je rezultat mnoštvo publikovanih radova i obilje patenata, ostala je inženjerska praksa kojoj su do danas ostali nepoznati brojni fenomeni ovog fizički kompleksnog procesa.

Dosadašnja teorijska, eksperimentalna i modelska izučavanja zasnovana su uglavnom na sagledavanju mogućnosti primjene ZTM na određene grupe metala i njihovih legura (aluminijum, titan, bakar, ređe ugljenični, konstruktivni i nerđajući čelici, kompoziti sa metalnom osnovom i dr.), karakterizaciji osobina zavarenog spoja (razvoj mikrostrukture, statička i dinamička testiranja strukturnih sadržaja i sl.) i objašnjenjima složenih mehaničkih, termodinamičkih i triboloških pojava u određenim fazama i pojedinim ciklusima procesa (dinamička rekristalizacija, transfer mase, adheziono trenje, generisanje toplote, viskoplastično tečenje, itd.). Mali broj istraživača analizirao je uticaj režima obrade ZTM, odnosno parametara procesa na zamorno ponašanje heterogene strukture zavarenog spoja "konstruktala"- Al-Zn – Mg-Cu, visokočvrstih legura aluminijuma višefaznog sastava izloženih promjenljivim vrstama opterećenja. Kako se materijali iz ove grupe, između ostalog, najviše primjenjuju u proizvodnji sredstava naoružanja od kojih se zahtijeva da u dužem vremenskom razdoblju posjeduju visoku mobilnost i nosivost, neophodnu sigurnost i pouzdanost u radnom ambijentu koji karakterišu brojni nepovoljni uslovi eksploatacije, istraživanja poput ovog su od posebnog značaja. Ta činjenica, kao i saznanje da je legura EN AW 7049 A, veoma bliska ispitivanoj leguri u ovoj disertaciji, kao najreprezentativniji predstavnici pomenute familije legura aluminijuma, izostala iz fokusa ozbiljnih naučnih i stručnih razmatranja, opredijelila je da se istraživanja u ovom radu usmjere prema definisanju koncepta modela upravljanja ulaznim parametrima procesa kojima je moguće uticati na odgovor prslinom oštećene zavarene konstruktivne strukture u uslovima složenih naprežanja.

Eksperimentalna istraživanja ovakvog tipa prvi su ali ne i jedini korak na tom putu. Kako pouzdanost zavarenih struktura u svim periodima eksploatacije tokom životnog vijeka najviše zavisi od osobina zavarenih spojeva kao heterogenih struktura, od njih se zahtijeva da zadrže dostignuti ili približan nivo mehaničkih karakteristika osnovnog materijala, uz očuvanje prihvatljive žilavosti i plastičnosti u svim konstituentima zavarenog spoja. Ovo posebno dolazi do izražaja što je obradak vještački starena, kovana i homogenizovana ploča koju odlikuje visoka čvrstoća, niska plastičnost, povećana sklonost prema prslinama u slučaju zamora i izražen senzibilitet prema naponskoj koroziji. Uopšteno, zavareni spojevi sa svojstvenom mikrostrukturnom nehomogenošću predstavljaju makronehomegana mjesta na kojima dolazi do koncentracije napona. Zbog toga su mogućnosti primjene kriterijuma mahanike loma na zavarene spojeve, pogotovo nedovoljno istražene, od izuzetne važnosti za ocjenu ponašanja ugrađenih materijala, razumijevanje mehanizma loma i diferenciranje faktora koji utiču na njegov razvoj u zavarenom spoju. U cilju dobijanja relevantnih informacija pogodnih za modeliranje ZTM, kojim je moguće izvršiti predikciju parametara u funkciji izlaznih karakteristika obradnog sistema, neophodno je realizovati obimna eksperimentalna istraživanja procesa.

FSW*-Friction Stir Welding,eng.(u prevodu i daljem tekstu disertacije ZTM- zavarivanje trenjem miješanjem)

Ovakav pristup, iako skup, opravdan je time što ne postoji potpuno pouzdan model za kontrolu pokazatelja stanja kvaliteta spoja zavarenih komada tokom trajanja procesa njihovog spajanja.

Zbog toga je glavno stanovište u radu prvenstveno bazirano na eksperimentalno potvrđenom uspješnom zavarivanju pomenute, posebno dizajnirane i namjenski osvojene legure, čiji bi spoj mehaničkim osobinama bio blizak osobinama zavarenog spoja tradicionalnim postupcima zavarivanja lako zavarljivih aluminijumskih legura. Istraživanja provedena u disertaciji imaju za cilj da se u konačnom, na osnovu ovdje dobijenih rezultata i detaljne analize termodinamičkog ponašanja alata za zavarivanje, mikrostrukturnih osobnosti MŠ, fraktografskog uvida u stanje prelomnih površina i termalne istorije procesa ZTM, razjasne pojedinačni i grupni uticaji faktora postupka na statičke karakteristike, profil tvrdoće, izduženje, prirodu zamornog rasta prsline i žilavosti loma zavarenog spoja. Takva platforma služila bi odevivanju analitičko-numeričkih korelacija koje bi pomogle drugim istraživačima u formiranju baze podataka čija bi dalja evolucija i obrada u prvoj sledećoj iteraciji, predstavljala tehnološki procesor za predikciju uticajnih parametara postupka sa ciljem povećanja otpornosti prema pojavi i razvoju prsline, odnosno predviđanja žilavosti loma ZTM formiranog spoja. Struktura budućeg novostvorenog, autentičnog i uniformnog sistema za predviđanje, upravljanje i nadzor reaktivnih parametara omogućavala bi automatsko projektovanje fleksibilnog tehnološkog procesora za ZTM kojim se povećava pouzdanost konstruktivnih struktura, smanjuju troškovi uzrokovani lomom usled zamora i povećava životni vijek vojne opreme. Autor je sa tom namjerom i krajnjim ciljem započeo sveobuhvatna eksperimentalna istraživanja. Akademske preporuke u pogledu dužine teksta između ovih korica, nametnula su njegovu redukciju, naročito u domenu numeričke obrade rezultata, simulacije i modeliranja procesa ZTM.

Svi rezultati provedenih ispitivanja urađenih za dvadeset eksperimentalnih tačaka korišćenjem pet različitih tipova alata za zavarivanje, pohranjeni su na CD i memorijskoj kartici, dostupni su na zahtjev budućim istraživačima.

SADRŽAJ

1.0 UVOD	1
1.1 Interdisciplinarnost u pristupu izučavanja teme	1
1.2 Predmet i ciljevi istraživanja	2
1.3 Očekivani naučni doprinos	4
1.4 Struktura i organizacija istraživanja	4
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA	6
2.1 Način proizvodnje, osobine i oblasti primjene kompleksnog cinkom legiranog aluminijuma visoke čvrstoće	11
2.1.1 Mehanizam očvršćavanja taloženjem legura aluminijuma visoke čvrstoće	12
2.1.1.1 Mogućnost uticaja na naponsku koroziju legura iz klase EN AW 7xxx	14
2.1.1.2 Kratak osvrt na istorijat osvajanja proizvodnje legure Al-Zn-Mg-Cu(-Cr-Zr) udomaćim proizvodnim uslovima	15
2.1.1.3 Tipična primjena legure faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu(-Cr-Zr) u domaćim sredstvima naoružanja	17
2.2 Zavarljivost topljenjem legura aluminijuma faznog sastava Al-Mg-Zn (-Cu)	22
2.2.1 Ocjena zavarljivosti postupcima topljenjem taložno ojačavajućih legura aluminijuma visoke čvrstoće	24
2.2.1.1 Metalurško- konstruktivna i operativna zavarljivost legura višefaznog sastava tipa Al-Zn-Mg-Cu	24
2.2.1.1.1 Tople prsline u zavarenom spoju	25
2.2.1.1.2 Hladne prsline u MŠ i ZUT	28
2.2.1.1.3 Poroznost u strukturi zavarenog spoja	28
2.2.1.1.4 Mehaničke osobine zavarenog spoja	29
2.2.1.1.5 Otpornost zavarenog spoja prema naponskoj koroziji ..	29
2.3 Postupak zavarivanja aluminijumskih legura u čvrstom stanju na neposredan i posredan način	29
2.3.1 Suština procesa spajanja u čvrstom stanju	30
2.3.1.1 Konvencionalne i nekonvencionalne metode spajanja trenjem ..	30
2.3.1.1.1 Nekonvencionalni postupci zavarivanja trenjem-ZTM	31
2.3.2 Fizička suština procesa ZTM	31
2.3.3 Karakterizacija zavarenih spojeva formiranih ZTM	33
2.3.3.1 Geometrijske karakteristike MŠ	33
2.3.3.2 Metalurške karakteristike MŠ	34
2.3.3.3 Tvrdoca u poprečnom presjeku MŠ starosno tretiranih legura aluminijuma	38
2.3.4 Mehaničke osobenosti zavarenog spoja	39
2.3.5 Materijal za izradu i oblici alata	40
2.4 Ciklusi i faze postupka	43
2.5 Geneza nastanka i oblici grešaka u zavarenim spojevima	45
2.6 Tehnološki parametri procesa ZTM	47
2.6.1 Kinematski parametri procesa	48
2.6.1.1 Broj obrtaja alata (n_{alata})	49
2.6.1.2 Brzina zavarivanja (v_{zav})	50
2.6.1.3 Brzina prodiranja trna alata (v_{trna})	52
2.6.1.4. Brzina utiskivanja čela alata ($v_{čela}$)	52
2.6.2 Geometrijski parametri postupka	53
2.6.2.1 Dizajn čela i trna alata	53
2.6.2.2 Ugao konusa trna alata (α)	53

SADRŽAJ

2.6.2.3 Dužina trna alata (h)	53
2.6.2.4 Ugao nagiba alata (β)	53
2.6.2.5 Dubina utiskivanja čela alata (u)	55
2.6.3 Dinamičke komponente procesa ZTM	55
2.6.3.1 Sila zavarivanja (F_z)	56
2.6.3.2 Uzdužna – longitudinalna sila (F_x)	56
2.6.3.3. Poprečna- transverzalna sila (F_y)	57
2.6.3.4 Troosne komponente ubrzanja alata (a_x, a_y, a_z)	57
2.6.3.5 Moment obtanja alata (Ma)	58
2.6.3.6 Moment trenja (Mtr)	58
2.7 Dosadašnja istraživanja u predmetnoj oblasti	6
2.8 Polazne hipoteze rada	10
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	60
3.1 Priprema za zavarivanje	61
3.1.1 Način dobijanja osnovnog materijala	61
3.1.2 Opis radnog mjesta za izvođenje zavarivanja	64
3.1.3 Alati za probna i osnovna zavarivanja legure EN AW 2024 T3 i EN AW 7049 T 652	66
3.1.3.1 Plan matrica eksperimenta	71
3.2 Tok eksperimentalnog zavarivanja uzoraka	73
3.3 Opis mjerne konfiguracije za eksperimentalno određivanje reaktivnih parametara procesa	75
3.4 Ispitivanje metodama bez razaranja	76
3.4.1 Vizuelni pregled uzoraka (VT)	77
3.4.2 Ispitivanja uzoraka penetrantima (PT)	77
3.4.3 Ispitivanja uzoraka rendgenskim zračenjem (RT)	77
3.5 Mjesta uzorkovanja epruveta za ispitivanja sa razaranjem	78
3.6 Karakterizacija zavarenih spojeva	79
3.6.1 Metalografska ispitivanja	79
3.6.1.1 Makro i mikrostruktura zavarenih spojeva	79
3.6.1.2 Distribucija i profil tvrdoće strukturnih sadržaja MŠ	81
3.6.2 Mehanička ispitivanja zavarenih spojeva	82
3.6.2.1 Geometrijski oblik epruvete iz OM za ispitivanje jednoosnim zatezanjem	83
3.6.2.2 Geometrijski oblik epruvete za ispitivanje mehaničkih osobina MŠ	84
3.6.2.3 Opis toka ispitivanja jednoosnim zatezanjem epruveta OM i MŠ	85
3.6.2.4 Određivanje karakteristika MŠ savijanjem u tri tačke	87
3.6.2.5 Određivanje energije udara i udarne žilavosti	88
3.6.2.5.1 Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom	88
3.7 Ispitivanje žilavosti loma	91
3.7.1 Mjesta uzorkovanja i geometrija SENB epruveta	91
3.7.2 Početak procedure pripreme za ispitivanja žilavosti loma	93
3.7.3 Opis testa zamornog opterećenja	95
3.7.3.1 Jednačine potrebne za proračun žilavosti loma	96
3.7.3.2 Ispitivanje SENB epruvete u tri tačke na uređaju za savijanje ... 3.7.3.2.1 Izračunavanje J – integrala	99 105
3.7.4 Kriva otpornosti J - Δa	112

SADRŽAJ

3.8 Fraktografska analiza površine preloma	112
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA	114
4.1 Rezultati mjerenja intenziteta sile zavarivanja F_z	114
4.1.1 Rezultati mjerenja dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd}	116
4.2 Rezultati mjerenja ubrzanja alata - komponente ax , ay i az	119
4.3 Termogrami faza i ciklusa zavarivanja	126
4.4 Rezultati ispitivanja MŠ metodama bez razaranja	138
4.4.1 Rezultati vizuelnog pregleda	138
4.4.2 Rezultati pregleda penetrantima korjena MŠ	140
4.4.3 Rezultati radiografske kontrole zavarenih spojeva	141
4.4.4 Rezultati analize makro i mikro strukture	143
4.4.5 Rezultati mjerenja tvrdoće poprečnog presjeka	146
4.4.6 Rezultati testa jednoosnim zatezanjem	150
4.4.7 Rezultati savojnog testa zavarenih spojeva	156
4.5 Rezultati ispitivanja energije udara	157
4.5.1 Zbirni grafički prikaz rezultata ispitivanja energije udara	164
4.6 Rezultati ispitivanja parametara mehanike loma	169
4.6.1 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 01	169
4.6.2 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 05	172
4.6.3 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 09	176
4.6.4 Rezultati ispitivanja SENB epruveta za ET 13	179
4.7 SEM/EDS analiza površina preloma	184
4.7.1 SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 01	184
4.7.2 SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 06	187
4.7.3 SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 11	189
4.7.4 SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 16	191
5.0 DISKUSIJA	195
6.0 ZAKLJUČCI	212
7.0 NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMJENE U PRAKSI	217
8.0 LITERATURA	218

1.0 UVOD

Neprekidan i intenzivan razvoj metalurgije lakih metala, naročito aluminijuma, pored značajnog porasta proizvodnje primarnog aluminijuma, doveo je do osvajanja legura podesnih za mnoge industrijske namjene. Istovremeno unapređenje postojećih i pronalazak novih postupaka zavarivanja i srodnih tehnologija spajanja, uslovio je povećanu upotrebu zavarenih konstrukcija u složenim tehničkim sistemima koja je decenijama prije toga bila daleko ispod njihovog konstruktivnog potencijala i komercijalnih potreba. Savremene zavarene konstrukcije od legura aluminijuma nalaze sve veću primjenu u različitim oblastima. Ograničenost energetske resursa i smanjen nivo sirovinskog potencijala, u uslovima ekonomske krize, dodatno su aktuelizovali potrebu njihovog još većeg prisustva u inženjerskoj praksi. Zbog toga je zavarljivost postala primarna tehnološka osobina ovih konstruktivnih materijala.

To je rezultiralo zahtjevom za razvojem klasa legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće koje će istovremeno imati zadovoljavajuću plastičnost i prihvatljivu zavarljivost, otpornost prema naponskoj koroziji i malu osjetljivost na zamor [1]. Ovako složene i protivrječne težnje, bez odgovarajućeg kompromisa, nije jednostavno ostvariti. Sve do otkrića savremenog inovativnog postupka ZTM, od velike grupe aluminijumskih legura povišene i visoke čvrstoće, legure faznog sastava Al-Zn-Mg, iako ne u potpunosti, najbolje su odgovarale postupcima zavarivanja topljenjem osnovnog i dodatnog materijala [2].

Razmatranje mogućih problema kod zavarivanja ostalih legura postupcima topljenjem, a posebno četvorne legure Al-Zn-Mg-Cu, istaklo je u prvi plan njihovu izraženu sklonost prema pojavi toplih ili rekrestilizacionih prslina i strukturnih promjena koje degradiraju metal u ZUT, što ih je učinilo praktično neupotrebljivim. Višefazne legure kompleksnog sastava Al-Zn-Mg-Cu, pored povoljnog odnosa čvrstoće i gustine, prepoznatljive su po niskoj plastičnosti, smanjenoj žilavosti i povećanom senzibilitetu na naponsku koroziju i zamor [3]. Bez obzira na dodatno uložene napore istraživača prema analizi efekata smanjenja unosa toplote i energije kao i drugih parametara kod različitih konvencionalnih postupaka zavarivanja topljenjem ili pak dodatnim legiranjem sa elementima koji otežavaju širenje ZUT, bitniji rezultati nijesu postignuti. Za eksploataciono ponašanje zavarenih struktura od legura iz ove klase presudne su osobine zavarenih spojeva bez obzira na način njihovog formiranja. Kako su pomenute legure namijenjene prvenstveno izradi sklopova i komponenata u avioindustriji, kosmonautici i raketnoj tehnici koje karakterišu nepovoljni radni uslovi kao što su izloženost dinamičkim udarima i promjenljivim temperaturama, pored dovoljne čvrstoće, moraju imati izraženu žilavost [4].

Ovo je posebno značajno kod mjesta spajanja zavarivanjem koja su heterogene mikrostrukture i sa neravnomjernom raspodjelom napona, odnosno potencijalno kritična mjesta za pojavu grešaka različitog porijekla, pa i prslina kao najopasnijeg metalnog diskontineta koje u krajnjem uzrokuje lom konstrukcija. Kao i kod postupaka spajanja topljenjem, tako i pri upotrebi metoda formiranja spoja oblikovanjem u plastičnom stanju kojima pripada i ZTM, implementacija materijala iz familije legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće, zavisi od stepena pogoršanja svojstava materijala nastalog kao posljedica primjene zavarivanja. Otuda je najznačajnije da se u strukturnim sadržajima zavarenog spoja i u njemu kao cjelini, ne stvaraju mjesta sa enormno smanjenom žilavošću i povećanom krtošću. To podrazumijeva potrebu da se kod ZTM fabrikovanih zavarenih konstrukcija izrađenih od legura aluminijuma visoke čvrstoće, u prisustvu prslina kod ravnog stanja deformacija, na standardima propisane načine eksperimentalno odrede parametri elasto-plastične mehanike loma - pomjeranje otvora na vrhu prslina (CTOD) i konturni integral (J).

1.1 Interdisciplinarnost u pristupu izučavanja teme

Područje ispitivanja i analize uticaja geometrijskih, kinematskih, dinamičkih i termomehaničkih parametara na karakter i prirodu procesa obrade ZTM, a posebno odgovor zavarenog spoja kao krajnje faze procesa na prisustvo prslina, nedovoljno je istraženo i veoma aktuelno.

1.0 UVOD

Ovo i iz razloga sto su u zavarenom spoju moguće greške tipa prsline često i pri naponima manjim od dopuštenih, tako da je njegova pouzdanost od presudne važnosti za eksploataciono ponašanje takvih struktura. To posebno dolazi do izražaja kada se u cilju smanjenja mase zavarenih aluminijumskih konstrukcija, upotrebljavaju legure visoke čvrstoće, jer povećanjem čvrstoće osnovnog materijala raste osjetljivost konstrukcije na pojavu loma.

Najveći broj stvarnih proizvodnih uslova u područjima primjene legura Al-Zn-Mg-Cu, osim statičkih naprezanja, karakteriše uticaj dinamičkog i promjenljivog opterećenja, najčešće u kombinaciji sa drugim nepovoljnim uslovima eksploatacije.

Zavarivanje plastičnim deformisanjem postupkom ZTM veoma je složen proces. Njime je obuhvaćen veliki broj uticajnih faktora - radnih parametara obrade (karakteristike aluminijumske legure, performanse mašine, geometrija i dizajn alata, brzina zavarivanja, broj obrtaja alata, ugao nagiba alata, dubina njegove penetracije i dr.), pratećih manifestacija u toku trajanja odnosa alat - zavarivani komad (troosne komponente sila i momenata, vibraciono pomjeranje alata za zavarivanje, brzina i ubrzanje alata, termalna slika procesa) i izlaznih karakteristika obrade spajanjem, oličenih u zavarenom spoju kao njihovom sintetizovanim izrazu (makro i mikrostruktura, mikrotvrdoća, izduženje, udarna energija i žilavost loma i sl.).

Analiza iskustva u dosadašnjoj upotrebi ZTM u spajanju legura aluminijuma različitog faznog sastava, strukturne građe i stepena čvrstoće, pokazala je niz prednosti u odnosu na konvencionalne tehnike spajanja topljenjem. One se ogledaju u smanjenju unosa energije, odsustvu tečne faze, drugačijem mehanizmu metalurških transformacija i raspodjeli rezidualnih napona. Međutim, ne znači da ZTM ostvaren spoj treba posmatrati drugačije nego kao kritičnu tačku u svakoj tako izvedenoj konstrukciji. Ostalo je do kraja nerazjašnjeno kako se, na koji način i u kojoj mjeri tehnološki parametri zavarivanja odražavaju na sveukupnu karakterizaciju zavarenog spoja legure EN AW 7049A. Čak je u oskudnoj literaturi iz područja aplikacija ZTM i na ostalim četvornim legurama sistema Al-Zn-Mg-Cu, uočljivo da između teorijskih tumačenja fizike procesa i dobijenih rezultata zavarivanja, postoji znatna neusaglašenost. Upravo je to razlog da se u posljednje vrijeme u većini stvarnih radnih uslova uvede modeliranje pojedinih parametara procesa u funkciji relevantnih ulaznih faktora.

U inicijalnoj odnosno u preliminarnoj verziji disertacije pretenzija je bila na određivanju korelacionog odnosa između pojedinačnog uticaja procesnih parametara ZTM - nezavisno promjenljivih s jedne, na metalurško-mehaničke osobine i svojstva, parametre za ocjenu zamornog ponašanja zavarenog spoja i njegovih strukturnih zona – zavisno promjenljivih, s druge strane. Iz razloga navedenih u Predgovoru, težište je u ovoj konačnoj verziji disertacije na smanjenom broju prezentovanih rezultata ispitanih eksperimentalnih tačaka uz istovjetan broj raznovrsnih ispitivanja, adekvatno prvobitno naznačenim fazama sledstveno planu eksperimenta.

1.2 Predmet i ciljevi istraživanja

Na do sada održanim *XI International Symposiuma on Friction Stir Welding* još nema meritornih saznanja o ocjeni zavarljivosti legure aluminijuma EN AW 7049A u vještački starenom stanju T652. Očigledno da je da ova legura u značajnoj mjeri ostala izvan pažnje stručne i naučne javnosti, čime je odredila predmet istraživanja i pokazala put ka njegovim ciljevima fragmentarno prezentovanih u okviru sadržaja ove disertacije.

Uprkos brojnim analizama procesa ZTM različitih tipova legura aluminijuma, niko do sada nije publikovao rezultate istraživanja iz domena zavarivanja ove legure sa najvećim vrijednostima zateznih karakteristika u vještački starenom stanju T6. Zbog izraženih mehaničkih karakteristika, ova legura je nezaobilazan materijal u mnogim sklopovima tehničkih sistema u vojnoj industriji. Od nje se očekuje da u uslovima dinamičkih udara i promjenljivog opterećenja, zadrži dostignutu čvrstoću, posjeduje prihvatljivu žilavost i pokaže veću otpornost na zamor i naponsku koroziju. Sadašnji stepen razvoja ovih legura specifičan je po tome što su pomenute osobine postignute

1.0 UVOD

zahvaljujući kompromisu hemijskog sastava i postupka termomehaničke obrade. Međutim, zavareni spojevi kao kompleksna i heterogena mjesta, bez obzira na način formiranja, predstavljaju opasnost narušavanja uspostavljenog sklada kombinacija osobina, degradirajućeg uticaja prelazne zone između OM i MŠ a time i anizotropije mehaničkih osobina konstrukcije u cjelini. Zbog toga je potrebno odrediti zamorno ponašanje zavarenih spojeva nastalih ZTM u prisustvu greške tipa prsline, odnosno dati ocjenu o njenoj otpornosti pri razvoju loma iz postojeće prsline ili nekog drugog koncentratora napona u zoni „grumena“ kao dijelu ZTMU (zone termomehaničkog uticaja), ZUT (zoni uticaja toplote) i OM (osnovnom materijalu). Početna istraživanja na području utvrđivanja sklonosti prema lomu zavarenog spoja legura visoke čvrstoće odnosila su se na linearnu mehaniku loma koja je omogućila da se svojstva materijala u pogledu razvoja prsline ocjenjuju na osnovu K_{JIC} - veličine kritičnog faktora intenziteta napona ili na osnovu $CTOD$ - pomjeranja otvora vrha prsline, uzimajući u obzir napon tečenja $Rp_{0,2}$, pri zatezanju [5]. Skupe epruvete i složena ispitivanja za određivanje kritičnog faktora intenziteta napona i pomjeranja otvora prsline opravdali su tendenciju da se podaci o otpornosti materijala prema razvoju prsline i lomu u prvom koraku dobijaju u većini slučajeva na osnovu realnog uzorka iz proizvodnog okruženja, a potom modeliranjem numeričkom analizom i simulacijama izvrši njihova verifikacija.

Veće vrijednosti energije loma i kritičnog faktora intenziteta napona ukazala su na plastično ponašanje materijala i na njegovu izraženu otpornost prema razvoju prsline, a tako se ponaša materijal pri ravnom stanju napona. Male vrijednosti energije loma i kritičnog faktora intenziteta napona prate krto ponašanje materijala, a odgovaraju uslovima ravnog stanja deformacije [6]. Elastično-plastično ponašanje materijala odgovara području prelaza od ravnog stanja deformacija ka ravnom stanju napona [7]. Pri uspostavljanom ravnom stanju deformacije otpornost prema razvoju prsline i lomu je najmanja, a ukoliko je plastičnost materijala više izražena, utoliko je potreban veći poprečni presjek da bi se ostvarilo ravno stanje deformacije. U takvim slučajevima određuje se vrijednost krivih otpornosti za zavareni spoj nastao promjenom režima zavarivanja i upoređuju sa krivima otpornosti osnovnog materijala. Interesantno je napomenuti da se klasično *Charpy* klatno smatralo neprikladnim za aluminijske legure, jer je neosjetljivo na promjene u otpornosti prema lomu, a ukupno područje loma za najveći broj ovih legura odgovara malim veličinama [8]. Sve ovo upućuje da su uslovi nastajanja i priroda pojave loma nedovoljno izučeni procesi da bi se jednoznačno i sa prihvatljivom pouzdanošću mogli odrediti. Većina istraživanja do sada nije bila orjentisana prema interakciji mehanizama koji dovode do formiranja zavarenog spoja i njegove karakterizacije za stanovišta eksploatacionog integriteta. Zajedničko za najveći broj radova na ovu temu jeste da je sasvim izvjesno da režim zavarivanja, definisan ulaznim parametrima procesa, presudno utiče na pojavu grešaka u zavarivanju spojeva, bez obzira na njihov položaj, vrstu i oblik. Međutim, ni jedna grupa naučnika i istraživača nije uspjela da u potpunosti utvrdi pojedinačni nivo uticaja tehnoloških parametara postupaka ZTM na karakter i tok procesa stvaranja i širenja prsline, odnosno odgovora materijala oslabljenog prslinom. Pokazalo se zapravo da se proces ZTM, upotrebom klasičnih matematičkih metoda i modela, zbog izrazite nelinearnosti, veoma teško može opisati. Prevazilaženje ovog problema podrazumijeva upotrebu odgovarajućih senzora i davača za praćenje reaktivnih parametara procesa, kao zbirnog iskaza međusobnog uticaja ulaznih faktora na materijal obrade, kao i prikladnih metoda, prije svih neuronkih mreža u obradi dobijenih rezultata. Autor smatra da je u tom pravcu moguće očekivati bitne naučne iskorake, budući da ova diseratacija nakon značajnog smanjenja broja prikazanih rezultata provedenih u svih 20 eksperimentalnih tačaka, osim u stvaranju odgovarajuće eksperimentalne podloge, nema takve pretenzije.

1.0 UVOD

1.3 Očekivani naučni doprinos

Interdisciplinarni pristup koji objedinjuje teorijska razmatranja i eksperimentalna istraživanja treba da doprinese većem razumijevanju kompleksnog procesa ZTM tokom kojeg dolazi do brojnih fizičkih fenomena. Te fenomene nije moguće mjeriti, posmatrati i vrednovati tradicionalnim konzervativnim načinima.

Pozitivne efekte treba očekivati u teoriji i svakodnevnoj primjeni u praksi zavarivanja legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće, s obzirom da je učinjen pokušaj spajanja plastičnim deformisanjem namjenski osvojene legure aluminijuma Al-Zn-Mg-Cu u stanju termomehaničke obrade kojom je postignuta maksimalna vrijednost njene čvrstoće. Drugi važan aspekt u ovom smislu je osmišljavanje baze podataka za kreiranje tehnološkog procesora originalnog modela ZTM, pogodnog za proizvodnu primjenu na osnovu uspostavljene korelacije među uticajnim faktorima i njihovog različitog odraza na parametre otpornosti na zamor zavarenog spoja.

1.4 Struktura i organizacija istraživanja

U svrhu dokazivanja hipoteza iznijetih u sledećem poglavlju disetacije, potrebno je sprovesti sistemska istraživanja u laboratorijskim uslovima. Strukturu rada čine uvodni dio i dvije tematske oblasti sadržane u teorijskim osnovama i eksperimentalnim istraživanjima. Poglavlje teorijskih razmatranja obuhvata uporednu analizu i presjek radova i studija u kojima se razmatra uticaj kinematskih i geometrijskih parametara ZTM na mikrostrukturna svojstva i mehaničke osobine konstituenta zavarenog spoja. Budući da ne postoje literaturni izvori koji bi upućivali na bilo kakve relevantne rezultate spajanja legura EN AW 7049 A, pregled publikacija koncipiran je tako da je predstavljen glavni pristup razmatranom problemu, ukazano na ciljeve radova i kvalifikovani rezultati analiza zavarenih spojeva u drugim termički ojačavajućim legurama iz serija EN AW 7xxx. Zbog toga cilj pregleda radova nije da se njihovi rezultati iskoriste za nastavak daljih istraživanja niti da se utvrdi primijenjena metodologija, već da se pojasne neki od mehanizama formiranja veze u čvrstom stanju na legurama EN AW 7xxx kao tipičnim predstavnicima familije visokočvrstih legura aluminijuma.

Njihova nomenklatura urađena je tako da je uočljiva razlika između načina uticaja faktora interakcije alata za zavarivanje i hemijskog sastava materijala obrade zavarivanjem. Saglasno tome, plan eksperimenta polazi od prethodnih a završava osnovnim istraživanjima eksperimenta. Prethodna istraživanja sastoje se od:

- prikupljanja, selekcije i analize selektovane literaturne građe,
- izbora osnovne mašine za izvođenje zavarivanja – vertikalne glodalice sa CNC upravljanjem dovoljne krutosti i snage pogona glavnog vretena i radnog stola mašine,
- izbora OM: aluminijuma i njegovih legura različite čvrstoće, stepena termomehaničke obrade (prerade), debljine i faznog sastava,
- izrade tehničke dokumentacije za oplatu–steznu ploču i podmetače, alat i pribor neophodan za eksperimentalna zavarivanja,
- izrade potrebne oplata (stezne ploče i podmetača) i alata sa različitom geometrijom i dizajnom trna alata,
- probnih zavarivanja uzoraka sa vizuelnom analizom zavarenog spoja, penetrantskim ispitivanjima lica i korjena metala šava kao i makroizbruscima poprečnog presjeka epruvete na mjestu spajanja, i
- pregleda i analize kvaliteta zavarenih uzoraka dobijenih kombinacijom različitih vrijednosti kinematskih parametara procesa, geometrijskih oblika i dizajna alata.

1.0 UVOD

Na osnovu ovako utvrđenog prethodnog plana istraživanja, definisan je osnovni plan istraživanja kroz realizaciju sledećih aktivnosti:

- sublimiranje obimne literaturne građe u štampanoj verziji i elektronskoj formi putem sinteze radova i drugih dostupnih publikacija o najznačajnijim aspektima ZTM legura aluminijuma visoke čvrstoće sa posebnim osvrtom na termički obradive,
- planiranje eksperimenta primjenom najpouzdanijeg modela višefaktornog ortogonalnog plana sa varijacijom parametara na dva granična nivoa i ponavljanjem u centralnoj tački plana,
- izvođenje glavnih eksperimentalnih istraživanja na glodalicama sa CNC upravljanjem, sukcesivnim postupcima izrade oplata, serije alata za izvođenje testnih proba i glavnih uzoraka za dalja istraživanja, kompletiranje mjerne opreme i njena kolibracija,
- izvođenje eksperimentalnog zavarivanja na pripremljenim uzorcima legure EN AW 7049A T652 praćenjem odabranih parametara procesa termomehaničkog i dinamičkog porijekla i prirode radi dobijanja potrebnih rezultata,
- provođenje kontrole metodama bez razaranja zavarenih radnih komada,
- karakterizacija kvaliteta zavarenih spojeva saglasno postojećim evropskim i anglosaksonskim standardima za predmetnu oblast,
- uzorkovanje epruveta za provođenje metoda ispitivanja sa razaranjem zavarenih komada,
- prezentacija i obrada dobijenih rezultata mjerenja i ispitivanja,
- analiza, komentar i diskusija dobijenih rezultata eksperimentalnih istraživanjima,
- donošenja validnih i relevantnih zaključaka.

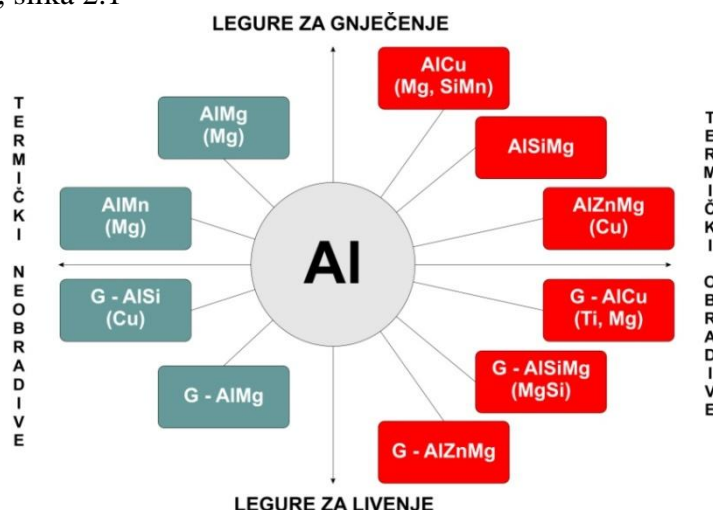
Uporednom analizom eksperimentalnih rezultata i njihovim poređenjem donose se odgovarajući zaključci relevantni za razumijevanje ZTM, njegovo unapređenje i početak proizvodne primjene u metalnom kompleksu na ovim prostorima.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

U djelovima koja pripadaju ovom poglavlju disertacije potrebno je učiniti osvrt na način proizvodnje, osobine i oblast primjene legura aluminijuma visoke čvrstoće, termički tretman postupka starenjem, greške u zavarenim spojevima, opisati postupak zavarivanja trenjem sa posebnim akcentom na ZTM, karakteristike alata i parametre procesa. Pregledom dosadašnjih istraživanja u oblasti koja je njen predmet cilj je da se kritičkim pristupom analizi rezultata, njihovoj diskusiji i donesenim zaključcima dodatno rasvijetli što više nepoznanica koje prate proces ZTM. Ukoliko ne postoje relevantni referentni izvori neophodno je svestranije sagledati odgovarajuća dostignuta ostvarenja u ZTM legura aluminijuma iz klase sa srodnim kompleksnim faznim sastavom.

2.1 Način proizvodnje, osobine i oblasti primjene kompleksnog cinkom legiranog aluminijuma visoke čvrstoće

Početak teorijskih razmatranja legure aluminijuma EN AW 7049A, izvan pregleda drugih istraživača koji se uglavnom bave legurama za avio industriju EN AW 7010 T7651, EN AW 7050 T7451, EN AW 7040 T651 (okviri trupa letilica i oplata krila), EN AW 7349 T 6511 (podne pregrade i trup) i EN AW 7075 T7651 i EN AW 7449 T7651 (donja oplata krila), pripada suštinskim elementima klasifikacije osnovnog materijala, načinu njegovog dobijanja i vrsti termičke obrade za blisku leguru čiji je ZTM sučeono zavareni spoj tema ovog rada. Aluminijumski materijali većinom su legure čistog aluminijuma sa jednim ili više od pet glavnih legirajućih elemenata: Cu, Si, Mg, Zn i Mn i manjim učešćem Fe, Cr i Ti, a u novije vrijeme često se koristi Sc (skandijum) i La (lantan) [9]. U posebne svrhe i za potrebe namjenskog legiranja dodaju se elementi: Ni, Co, Ag, Li, V, Zr, Sn, Pb i Bi. Učešće do 1% Ag povoljno utiče na naponsku koroziju, dok dodatak La smanjuje osjetljivost prema formiranju prslina. Očigledno da budućnost ovih legura pripada legiranju sa metalima iz rijetkih zemalja koje odlikuje visoka čvrstoća, mala anizotropija osobina i dobra eksploataciona svojstva u sredstvima naoružanja. U odnosu na vrstu i stepen legiranosti kao i način proizvodnje, razlikuju se legure za livenje i legure za plastičnu deformaciju (gnječenje) [10]. Granica između legura za livenje i legura za gnječenje-plastičnu deformaciju nije jasno određena, pa su neke legure za plastičnu preradu pogodne i za livenje, slika 2.1



Slika 2.1 Shematski prikaz klasifikacije legura aluminijuma [10]

Legure za plastičnu deformaciju, od kojih je jedna od najspecifičnijih (termički obradiva kovana ploča visoke čvrstoće) korišćena za ZTM u ovom eksperimentu, proizvode se livenjem u ingote koji se potom obrađuju hladnom ili toplom deformacijom-kovanjem, presovanjem ili izvlačenjem u odgovarajuće poluproizvode: otkovke, limove, take, vučene profile... Površinski

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

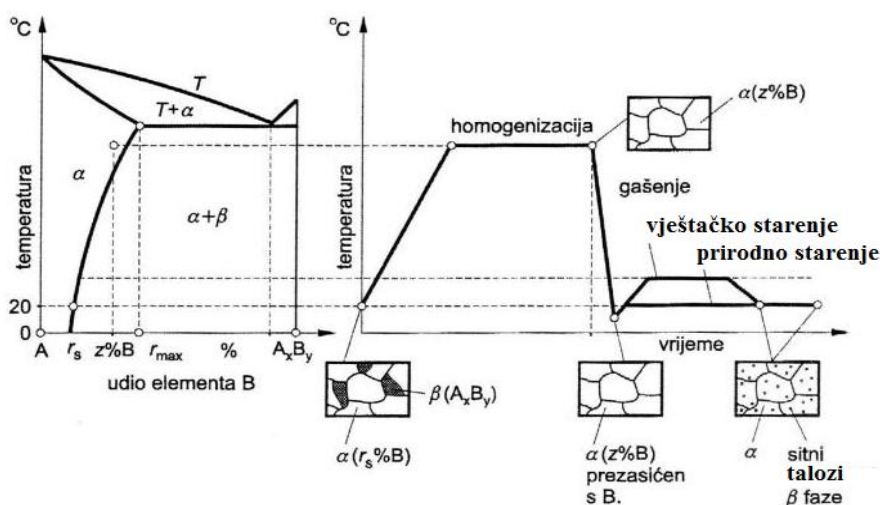
orjentisana kubna (FCC) rešetkasta struktura hladnom deformacijom očvršćava usled povećanja broja dislokacija što usporava njihovo kretanje i otežava plastično tečenje kod svih postupaka prerade. Rezultanta je porast čvrstoće, napona tečenja i tvrdoće. Sa mikrostrukturnog aspekta dominira čvrsti rastvor bez intermetalnih faza čime se povećava duktilnost, dok mehanička svojstva određuje stepen deformacije. Termički obradive legure ojačavaju taloženjem legirajućih elemenata iz prečišćenog čvrstog rastvora aluminijuma (taložno ojačavanje) na način da se makar jedan od konstituenata nalazi u području dijagrama stanja u kojem raste njegova rastvorljivost sa porastom temperature [11]. Jedan od hemijskih elemenata sa tom osobinom na visokoj temperaturi i minimalnoj rastvorljivosti na okolnoj temperaturi jeste Zn, ali i Cu, Si i Mg koji stvaraju konstituente CuAl_2 , Mg_2Si , MgZn_2 . Izraženo ojačavanje sekundarnim fazama odnosno talozima nastalim poslije provedene termičke obrade vještačkim starenjem koje izaziva izlučivanje polukoherentnih čestica, osnova je za razumijevanje mehanizma očvršćavanja taloženjem.

2.1.1 Mehanizam očvršćavanja taloženjem legura aluminijuma visoke čvrstoće

Sve što je navedeno potreban je ali ne i dovoljan uslov da svi aluminijumski sistemi očvrstnu termičkom obradom, jer rastvorljivi elementi moraju omogućiti formiranje sitnih taloga sposobnih da deformišu kristalnu rešetku matrice aluminijuma. Polazno stanje legure sastava Al-Zn-Mg-Cu sadrži heterogenu strukturu sastavljenu od α kristala aluminijuma i kristala intermetalnog spoja MgZn_2 kako bi se tokom njegovog ponovnog taloženja izlučili u koherentnom obliku. Taloženje ravnomjerno raspršenih čestica postepeno otvrdnjava leguru sve do postizanja maksimalne tvrdoće i čvrstoće sprečavajući pomjeranje dislokacija [12]. Postupak taložnog ojačavanja legura serije EN AW 2xxx, EN AW 6xxx i EN AW 7xxxx sastoji se od tri stadijuma:

- zagrijavanja legure na temperaturu rastvornog žarenja i zadržavanja dovoljno dugo vremena do potpunog rastvaranja legirajućih elemenata,
- gašenja do ambijentalne temperature da bi legirani elementi ostali u čvrstom rastvoru kada nastaje prezasićeni rastvor, i
- prirodnog starenja na temperaturi okoline i vještačkog starenja na umjereno povišenoj temperaturi u cilju izlučivanja veoma sitnih taloga u matrici aluminijuma.

Kod mehanizma taložnog ojačavanja nema alotropskih modifikacija kristalne rešetke svojstvene kaljenju čelika. Principijelna shema taložnog očvršćavanja aluminijumskih legura data je na slici 2.2.



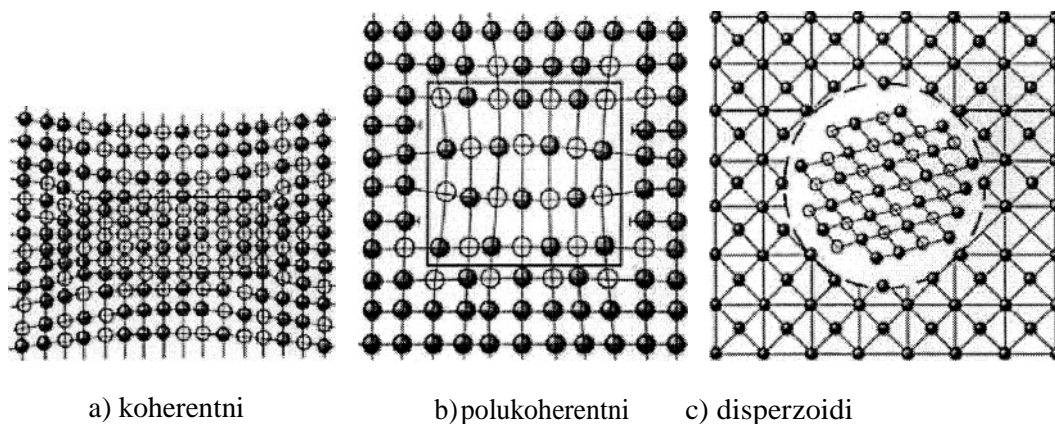
Slika 2.2 Shematski prikaz opšteg postupka taložnog očvršćavanja [13]

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Iz sheme postupka taložnog ojačavanja zapaža se da se legura koja sadrži neki od legirajućih elemenata B zagrijava u postupku rastvornog žarenja na dovoljno visoku temperaturu, dok se legirajući element rastvara u čvrstom rastvoru. Ako se legura sa X% elementa B, koja polazno sadrži α kristale aluminijuma u kojima je rastopljeno r_s % elementa B i neku intermetalnu fazu β (A_x, B_x) zagrije na dovoljno visoku temperaturu, čestice intermetalnog spoja potpuno će se apsorbovati u kristalu aluminijuma, pri čemu nastaje homogeni čvrsti rastvor koji sadrži samo kristale u kojima je rastvoreno X% elementa B [13]. Zasićenje rešetke α kristala atomima elementa B i prazninama nastaje usled velike difuzione mobilnosti atoma. Da bi došlo do toga, temperatura rastvornog žarenja mora biti iznad krive topljenja, ali ne smije doći do topljenja. Ako se ipak legura zagrije na previsoku temperaturu i granice zrna počnu topiti nastaje tehnološki škart. Legura EN AW 2024 koje su u najvećoj primjeni od svih taložno ojačavajućih legura, primjera radi, rastvorno se žari u području temperatura 488°C - 498°C, dok je eutektička temperatura (502°C), odnosno samo 4°C viša od gornje temperaturne granice rastvornog žarenja. S druge strane, ako je temperatura niska, rastvaranje neće biti potpuno i legura neće starenjem ostvariti željenu čvrstoću [14]. Otuda i zaključak da rastvorno žarenje treba biti dovoljno vremenski dugo da legura difuzijom postigne ravnotežno stanje. Kod legura namijenjenih plastičnoj deformaciji (na primjer, kovanju), trajanje rastvornog žarenja je kraće nego za livačke proizvode gruboznaste strukture čiji se veliki konstituenti teže rastvaraju. U tom pogledu najosjetljivija je serija legura 7xxx, a potom slijede legure iz serije 2xxx. Nakon što se legirajući elementi rastvore, legure se moraju gasiti na relativno nisku temperaturu kako bi se ovi elementi zadržali u čvrstom rastvoru. Kada bi se, ilustracije radi, legura sa X% elementa B sporo hladila do temperature okoline, ravnoteža bi se postigla pri svakoj temperaturi i čestice intermetalnog spoja izlučivale bi se kao disperzoidi [14]. Time bi se ponovo formirala polazna $\alpha+\beta$ mikrostruktura koja bi uzrokovala slaba mehanička svojstva i legura u ovom stanju bila bi krta zbog prisustva velikih čestica intermetalne faze. Zato se legure brzo hlade (gase) sa temperature rastvornog žarenja čime se legirajući elementi nasilno zadržavaju rastopljene u α kristalu stvarajući prezasićeni čvrsti rastvor. Zbog prezasićenja, odnosno do znatno većeg učešća legirajućeg elementa α u čvrstom rastvoru nego što je ravnotežna koncentracija, legura se nalazi u neravnotežnom stanju [15]. Primjera radi, za leguru koja sadrži element B, α kristali u gašenom stanju sadrže X% elementa B, dok je maksimalna rastvorljivost atoma ovog elementa pri temperaturi okoline u ravnotežnom stanju puno niža i iznosi samo r_s . Osim prezasićenja atomima legirajućih elemenata, α rastvor je prezasićen prazninama. Sam postupak gašenja predstavlja najosjetljiviju fazu termičkog tretmana legura EN AW 2xxx a naročito legura EN AW 7xxx. Gašenje se obavlja dovoljno brzo kako bi se legirajući elementi zadržali u rastvoru. U isto vrijeme potrebno je minimizirati zaostale napone nastale gašenjem koji mogu uzrokovati pojavu deformacija i prslina [16]. Primjenom velikih brzina gašenja postižu se najveće vrijednosti čvrstoće i najbolje kombinacije čvrstoće i žilavosti. Iako se intenzivnijim gašenjem obično poboljšava otpornost prema opštoj i naponskoj koroziji, određene legure serije 7xxx, koje ne sadrže Cu, otpomije su na naponsku koroziju ukoliko se sporije hlade. Velike brzine gašenja ostvaruju se u hladnoj vodi, ali često se primjenjuju i sporija ohlađivanja (topla ili vrela voda), kojima se djelimično smanji čvrstoća i koroziona otpornost na račun manjih deformacija [14]. Nakon rastvornog žarenja i gašenja slijedi dozrijevanje koje se izvodi na temperaturi okoline (prirodno starenje) ili nekoj povišenoj temperaturi (vještačko starenje). Prirodno starenje traje od nekoliko dana do nekoliko mjeseci, dok vještačko starenje pri temperaturi od 100°C-200°C zahtijeva kraći vremenski period (pola sata do nekoliko dana). Kako je osnova starenja difuzija koja se ubrzava porastom temperature, vještačkim starenjem ostvaruje se veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodnim starenjem [17]. U prvom stadijumu starenja atomi legirajućih elemenata nastoje da napušte čvrsti rastvor zauzimajući položaje unutar kristalne rešetke, stvarajući klice (nukleuse) novih čestica. Atomi legirajućih elemenata "sele" se iz područja većeg naponskog stanja rešetke u područja prezasićenosti prazninama pri tom formirajući gnijezda rastvorenih atoma unutar rešetke [17]. Klice se raspoznaju kao koherentni talozi istog rasporeda atoma kao i osnova zbog čega nema prekida veza u kristalnoj rešetki, ali su atomski razmaci različiti pa je

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

deformišu na način prikazan na slici 2.3 a). Izvitoperenost rešetke dovodi do unutrašnjih napona koji ometaju kretanje dislokacija usled čega se povećava čvrstoća, tvrdoća i izduženje zbog nepostojanja čestica krte intermetalne faze. Kod vještačkog starenja može doći do mjestimičnog prekida veza što stvara mogućnost stvaranja polukoherentnog stanja taloga sa osnovom povezanim samo na čvorovima rešetke, slika 2.3 b).



Slika 2.3 Vrste taloga kod aluminijumskih legura [17]

Izlučivanje je moguće samo na povišenim temperaturama što znači da kod prirodnog starenja ove pojave nema. Izlaganje legure većoj temperaturi i ubrzanju difuziji, mikrostruktura se vraća u ravnotežno stanje i koherentne i polukoherentne čestice prelaze u disperzoidne odvojene od osnove, slika 2.3 c). Usled ovih pojava izostaje deformacija kristalne rešetke čime se javlja pad tvrdoće i malo izduženje.

2.1.1.1 Mogućnost uticaja na naponsku koroziju legura iz klase EN AW 7xxx

Legure sistema Al-Zn-Mg-Cu imaju sklonost prema naponskoj koroziji, ali se dobrim izborom hemijskog sastava, pravilnim odnosom legirajućih elemenata, a naročito mehaničkom obradom i termičkim tretmanom, može smanjiti osjetljivost prema naponskoj koroziji i očuvati mehaničke osobine na visokom nivou. Za četvorne aluminijumske legure Al-Zn-Mg-Cu koje očvršćavaju vještačkim termičkim starenjem, veliki je opseg parametara režima termičke obrade za ostvarivanje uticaja na naponsku koroziju. Podstareno stanje ima veoma nisku otpornost prema naponskoj koroziji za razliku od prestarenog stanja kod kojeg je ona najveća. Prezasićeni čvrsti rastvori kojima pripadaju sve legure iz serije EN AW 7xxx, dobijeni gašenjem sa temperature rastvarajućeg žarenja, posjeduju manje ili više izraženu rezistentnost prema naponskoj koroziji [18]. Ukoliko se poveća vrijeme termičkog taloženja, kao posledica ogrubnjavanja zrna u kratkom vremenskom intervalu, bitno se smanji čvrstoća, a njen manji pad, uz značajniju otpornost prema pojavi naponske korozije, ostvarljiv je dvostepenim termičkim taloženjem. Objašnjenje za ovu pojavu je u plastičnoj deformaciji, odnosno njenom karakteru. Turbulentno klizanje stvara ravnomjerno raspoređene dislokacije u zrnima što povećava otpornost, dok planarno klizanje nagomilava dislokacije na granicama zrna koja smanjuje otpornost [19].

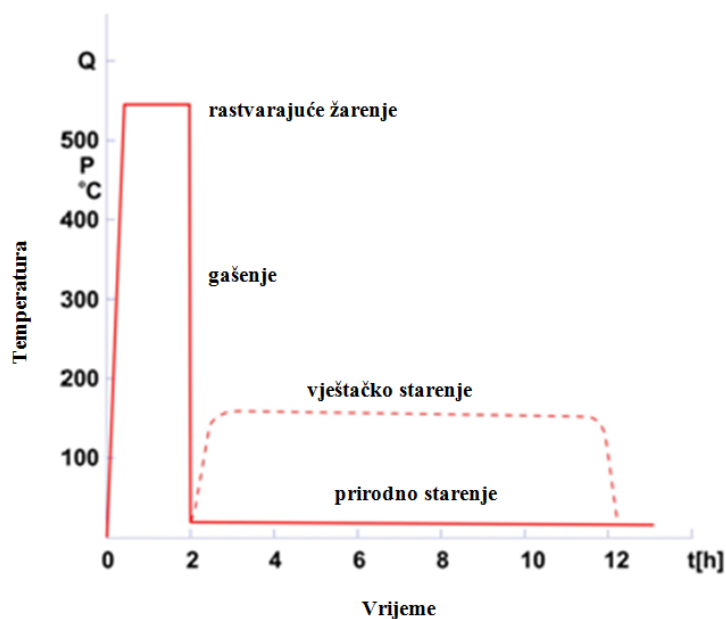
Osobine termički obradivih legura aluminijuma, već je apostrofirano, postižu se uglavnom preko posebne termičke obrade ojačavanja starenjem koje za legure faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu, u većini primijenjenih legura u namjenskoj industriji, obuhvata [20]:

- rastvarajuće žarenje kojim se na povišenim temperaturama neophodni legirajući elementi (Zn, Mg, Cu, Zr, Cr, Mn) rastvaraju u aluminijumskoj osnovi stvarajući miješane kristale,
- gašenje direktnim hlađenjem sa temperature rastvarajućeg žarenja, dok se potrebna brzina hlađenja podešava zavisno od vrste legure iz klase EN AW 7xxx, i

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

- vještačko starenje na temperaturi između 120°C i 180°C

Rastvarajuće žarenje u principu omogućava da se kod legura EN AW 7xxx čvrsti rastvor obogati legirajućim komponentama koji utiču na otvrdnjavanje. Uz dovoljno brzo hlađenje, obogaćeni čvrsti rastvor se transformiše u prezasićeno stanje [21]. Tokom starenja počinje stvaranje taloga iz prezasićenog čvrstog rastvora uglavnom tipa $AlZn_2$ ili Al_2CuMg . Kod rijetkog prirodnog starenja nastaju koherentni talozi, što znači da ostaju neporemećeni odnosi između kristalnih rešetki miješanih kristala i taloga pri čemu nastaje samo elastično deformisanje rešetki. Kod vještačkog starenja nastaju međustabilne faze čija građa kristalnih rešetki odstupa od građe rešetke miješanih kristala, ali koja pokazuje određenu koherentnost u odnosu na ravni rešetke osnove [22]. Razlike u međuatomskom rastojanju dovode do koherentnih napona. Koherentnost između rešetki i djelimična koherentnost taloga je ograničena, dok disperzoidi uvijek imaju građu rešetki značajno različitu od legirajuće osnove. Uopšteni shematski prikaz starenja legura sistema EN AW 7xxx dat je na slici 2.4.



Slika 2.4 Shematski prikaz termičkog ciklusa obrade starenjem [23]

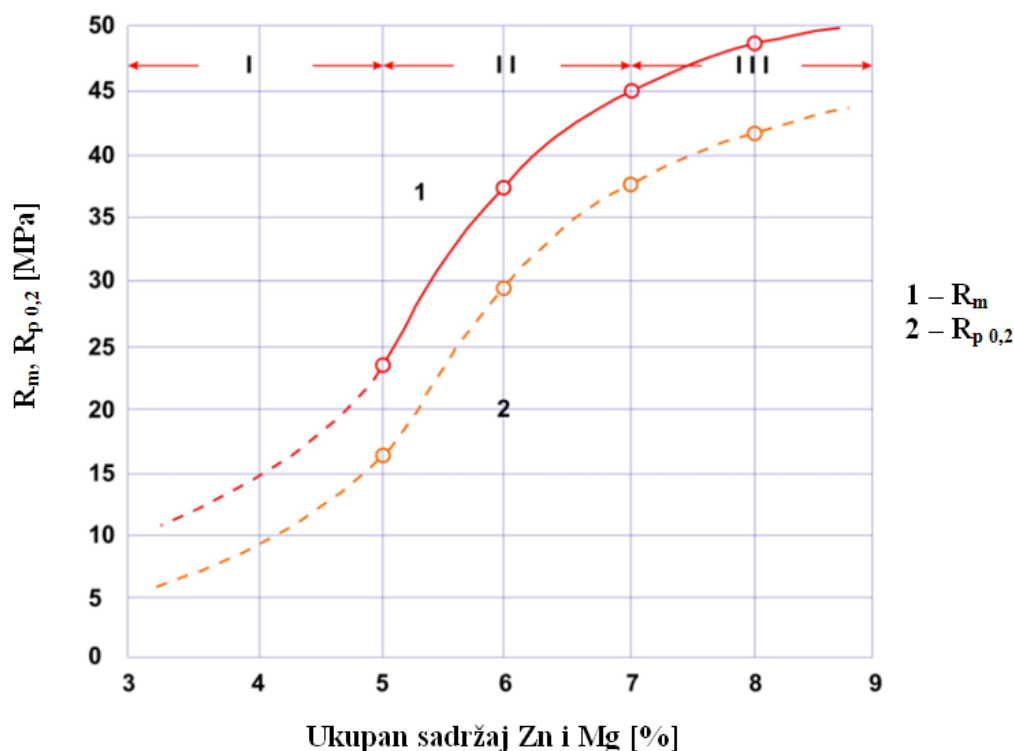
2.1.1.2 Kratak osvrt na istorijat osvajanja proizvodnje legure Al-Zn-Mg-Cu(-Cr-Zr) u domaćim proizvodnim uslovima

Moderna vojna oprema, kojoj pripadaju i sredstva naoružanja u armijama moćnijih zemalja svijeta, posjeduju odlične tehničko-taktičke i borbene – eksploatacione karakteristike. Visoka pokretljivost i nosivost, velika borbena moć uz izraženu sigurnost i pouzdanost, mala masa u odnosu na gabarite i dug vijek trajanja, samo su neki od elemenata raspoznavanja i dominacije vojne u odnosu na druge grane industrije. Ovo je moguće ostvariti samo ako se u izradi elemenata, podsklopova i sklopova borbernih sredstava na zemlji, po vodi i u vazduhu upotrebljavaju materijali povišene, visoke i ultravisoke čvrstoće i plastičnosti, otporni prema lomu u statičkim i dinamičkim uslovima i rezistentni prema svim oblicima korozije [24]. Ovako specifične zahtjeve, najčešće u međusobnoj koliziji, nema ni u jednom pojedinačnom materijalu. S toga se koriste materijali koji predstavljaju najoptimalniji spoj adekvatnog odgovora na različite namjene. Iz tih razloga posebno dizajnirane legure aluminijuma najbolje su rešenje za malu masu i relativno visoku čvrstoću u korozionim sredinama i na niskim temperaturama, pri čemu se odnos između čvrstoće i plastičnosti mijenja dodatnim legiranjem, stepenom deformacije i stanjem termičke obrade.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Kako bi osigurao visoko postavljene vojne ciljeve za karakteristikama legure od strane tadašnjeg Saveznog sekretarijata za narodnu odbranu SFRJ, u početku osvajanja kvalifikovane tehnologije za proizvodnju nove legure aluminijuma specifičnih karakteristika (tadašnjeg internog naziva PD 33) u tipično domaćim industrijskim uslovima, Kombinat aluminijuma Titograd u okviru jedinstvenog jugoslovenskog projekta "Kapela", krenuo je u analizu odnosa i uticaja legirajućih elemenata i nečistoća na mehaničke karakteristike proizvoda u kovanom stanju, prvenstveno za fazni sistem Al-Zn-Mg. Mijenjajući zbirni sadržaj Zn i Mg u Al-Zn-Mg leguri, kao i međusobni odnos ovih elemenata, odnosno uvodeći u Al-Zn-Mg leguru dodatke kao što su Cu, Mn, Cr, Zr, B, V, Ti i Ag i primjenjujući različite režime termičke obrade, teško se dolazilo do grupe elektrolučno zavarljivih legura koje imaju širok spektar povoljnih osobina za primjenu u namjenskoj industriji. Naime, mehaničke i tehnološke karakteristike Al-Zn-Mg legura, u osnovi i u prvom redu, zavise od ukupnog sadržaja Zn i Mg, odnosno njihovog međusobnog odnosa. Sa porastom ukupnog sadržaja Zn i Mg, rastu vrijednosti čvrstoće, ali i sklonost ka naponskoj koroziji [25].

Na slici 2.5 i slici 2.6 prikazana je promjena zatezne čvrstoće početne trojne Al-Zn-Mg legure sa odnosom Zn : Mg = 2,0 - 2,3, u zavisnosti od zbirnog sadržaja Zn i Mg. Sa povećanjem sadržaja Zn i Mg u Al-Zn-Mg leguri, čvrstoća se naglo povećava [26]. Međutim, relativno brzo ($Zn + Mg > 5\%$) pojavljuje se osjetljivost prema naponskoj koroziji, područje I na dijagramu prikazanom na pomenutim slikama.

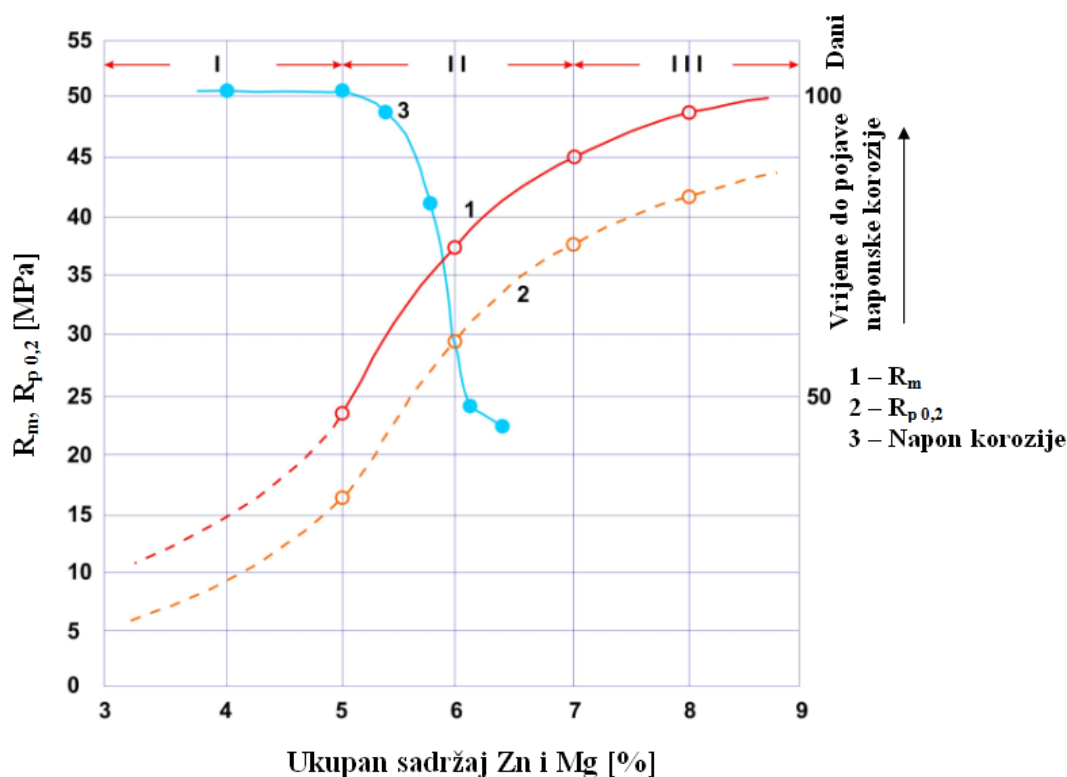


Slika 2.5 Zavisnost zatezne čvrstoće i granice tečenja od ukupnog sadržaja Zn + Mg bez uticaja ostalih legirajućih elemenata [26]

Legure sistema Al-Zn-Mg koje sadrže od 5,5% do 7,0% (Zn+Mg), poslije termičke obrade na maksimalnu čvrstoću, područje II na istim slikama, podložne su naponskoj koroziji [26]. Međutim, sklonost prema naponskoj koroziji može biti izbjegnuta bez smanjenja čvrstoće. Zbog toga se pokušavalo da se sa povećanjem sadržaja Zn u srednje legiranim Al-Zn-Mg legurama, poveća čvrstoća, a da se sa povećanjem sadržaja Mg poveća otpornost prema naponskoj koroziji. Sa izmjenom odnosa Zn i Mg, pri stalnom ukupnom sadržaju, mijenja se mikrostruktura legura. Povećanje sadržaja Zn ubrzava disperziona izlučivanje uz obrazovanje uskih zona slobodnih od

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

taloga na granicama zrna [27]. Kod visokolegiranih Al-Zn-Mg legura čiji je zbirni sadržaj Zn + Mg > 8% čvrstoća se relativno blago povećava, tehnološki problemi proizvodnje rastu, a sklonost prema naponskoj koroziji moguće je izbjeći jedino visokotemperaturnim starenjem, što je povezano sa padom čvrstoće, pa samim tim i dodatak legirajućih elemenata nije u potpunosti iskorišćen, područje III na slici 2.5 i slici 2.6 [27].



Slika 2.6 Zavisnost karakteristika jačine i pojave naponske korozije od Zn+Mg bez prisustva ostalih legirajućih elemenata [27]

Najveći broj do tada razvijenih Al-Zn-Mg legura pripadao je grupi srednje legiranih. Ove legure sa malim dodacima optimalno izabranih elemenata od kojih su najvažniji Mn, Cr, Zr, Ti, Ag i V imaju zadovoljavajuće mehaničke karakteristike i povećanu otpornost prema naponskoj koroziji. Tek u kasnijim koracima ka osvajanju postupka proizvodnje pomenute legure u domaćim proizvodno-industrijskim uslovima u ovaj trojni sistem uveo se Cu [28].

2.1.1.3 Tipična primjena legure faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu(-Cr-Zr) u domaćim sredstvima naoružanja

Tokom osvajanja recepture za leguru aluminijuma za potrebe vojne industrije, iskustvo je pokazalo da se u izradi borbenih vazduhoplova najviše koriste legure aluminijuma iz serije EN AW 2xxx (EN AW 2017, EN AW 2024 i EN AW 2014), koje posjeduju relativno visoku čvrstoću i dobru plastičnost, kao i solidnu rezistentnost na zamor, stvaranje i rast zamorne prsline [28].

Za iste namjene kasnije su počele sa upotrebom legure EN AW 8xxx (Al-Li) koje imaju manju specifičnu masu i viši napon tečenja, a bolja zavarljivost joj otvara mogućnost primjene kod komponenata letjelica sa zahtjevnom strukturnom otpornošću.

Posljednjih decenija u razvoju i modernizaciji oklopnih borbenih sredstava nezamjenljive su legure iz serije EN AW 7xxx. U tabeli 2.1 prikazani su nazivni hemijski sastav i mehaničke osobine najviše zastupljenih aluminijumskih legura u sredstvima naoružanja [29].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Tabela 2.1 Osnovni podaci o najčešće korišćenim standardizovanim legurama aluminijuma u sredstvima naoružanja

Sistem	Oznaka	Nazivni hemijski sastav, mas (%)						Prosječne mehaničke osobine		
		EN AV	Zn	Cu	Mg	Mn	Si	Cr	R_m , (MPa)	$R_{\sigma z}$, (MPa)
Al-Cu-Mg	2014		4,5	0,6	0,8	0,8	0,1	420	280	18
	2017		4,0	0,6	0,7			420	280	18
	2024		4,4	1,5	0,6			460	320	18
	2030		4,0	0,8	1,0	Pb=0,1		420	280	12
Al-Zn-Mg	7005	4,5		1,4	0,5		0,15	380	320	12
	7039	4,0		3,0	0,3		0,3	450	370	12
	7007	6,5		2,0	0,4		0,2	510	460	12
Al-Zn-Mg-Cu	7075	5,6	1,6	2,5			0,25	540	480	10
	7079	4,3	0,6	3,3	0,2		0,2	530	460	14
	7178	6,8	2,0	2,7			0,25	600	530	9
	7001	7,4	2,1	3,0				630	570	9
	7049	7,7	1,6	2,3			0,22	640	570	10
	7050	6,2	2,3	2,3	0,1			530	460	11
Al-Li-Mg	8090		1,2	0,75	Li=2,5			420	310	9
	8091		2,9	0,8	Li=2,5			600	550	10

Izraženi zahtjevi za drumskom mobilnošću, "plivanjem" u rječnim, jezerskim i morskim vodama, prenošenjem u vazduhu i velikom nosivošću na kopnu, povećali su potrebu za izradom balističkih kupola, oklopnih djelova i elemenata transmisije u obliku debelih limova i profila od ekstrudiranih i kovanih poluproizvoda [29].

Najveći broj svjetski poznatih aluminijumskih kompanija ne navodi dovoljno sigurne podatke o svojstvima upotrijebljenih legura i zaštićenih rješenja. Buduci da oklop tenka, primjera radi, čini skoro pola njegove mase, od čega je dvije trećine udio mase kupole, razumljivo je zašto se koriste eufemizmi da je "oklop složen, laminiran, poboljšan, ..." [30].

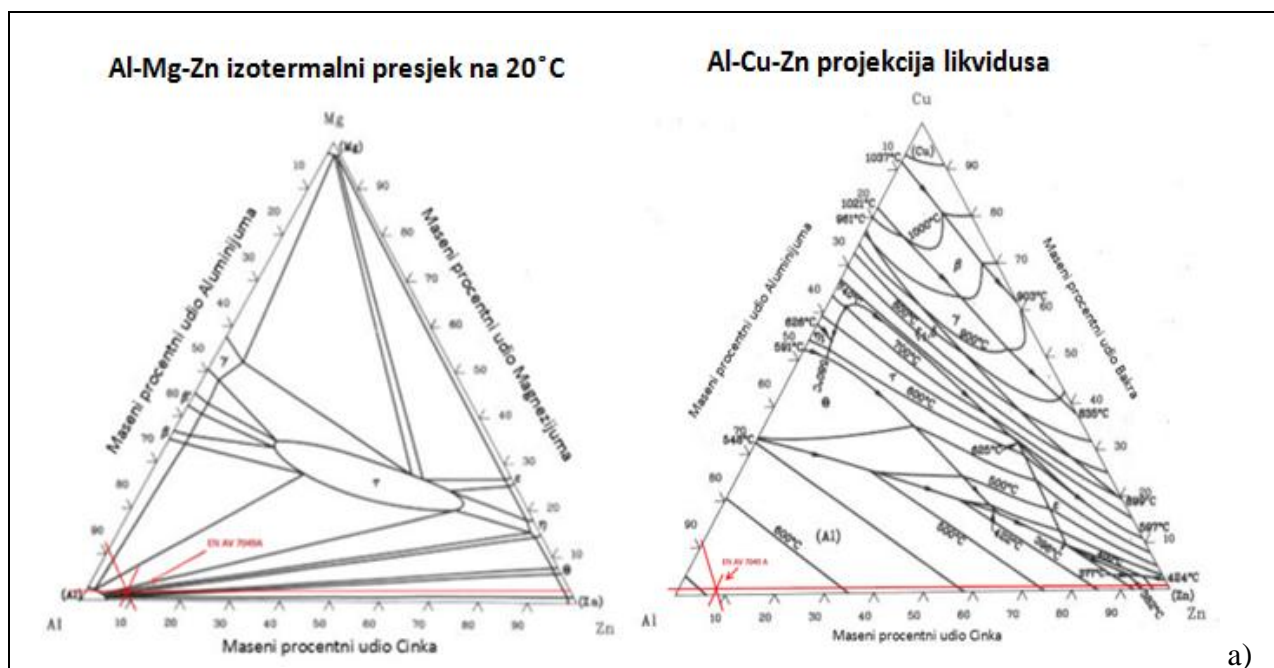
Kao mjera za ocjenu relativne efikasnosti oklopne zaštite često se uzima *masena efektivnost* (ME) koja predstavlja odnos površinske mase pancirnog dijela oklopa zadanog nivoa zaštite od dejstva određenog projektila i površinske mase izabranog tipa oklopa istog nivoa zaštite. Među legurama iz tabele 2.1 posebnu pažnju tadašnjih istraživača zaokupila je legura EN AW 7049.

Jedan broj država u svijetu, a među njima i SFR Jugoslavija, početkom 80-tih godina prošlog vijeka, razvila je proizvodnju legure izuzetno visoke čvrstoće, solidne otpornosti na lom i zadovoljavajuću plastičnost, odnosno leguru Al-Zn-Mg-Cu (-Cr-Mn-Zr). Ovaj tip legura u Francuskoj poznat je kao A-Z8GU specijal, SAD-u 7049A i tadašnjem SSSR-u kao V-93 i V-96, upotrebljava se kao osnovni materijal u izradi komora, pregradnih zidova i mlaznica raketnih motora, tijela i krilaca stabilizatora, kapa, kontejnera i otpadajućih segmenata na potkalibarnim projektilima [31].

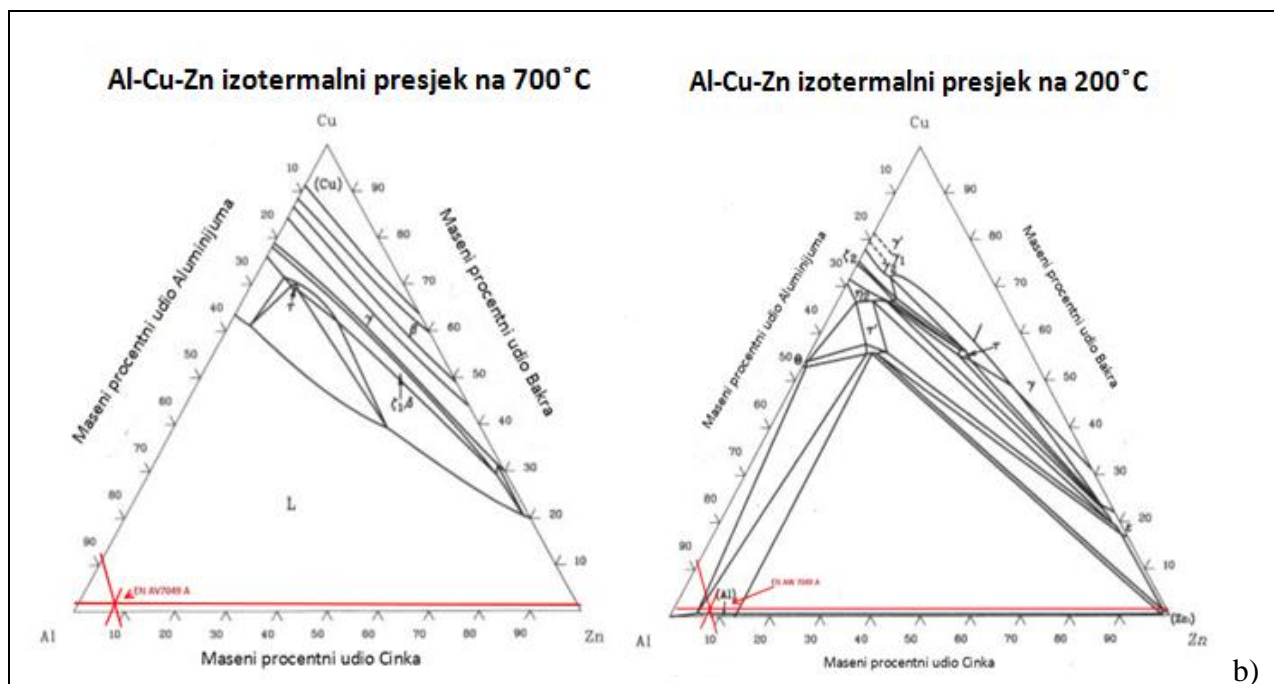
U nekadašnjim sredstvima domaće borbene tehnike, pomenuta legura aluminijuma našla je primjenu u različitim namjenama. Stepennjene upotrebe zavisio je od potreba jedinstvene vojne organizacije i od mogućnosti upotrebe domaćeg naoružanja u sistemima odbrane drugih nacionalnih armija zemalja u svijetu.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Na Mondolfovim trojnim (trinarnim) dijagramima stanja [32] ucrtane su presječne tačke za standardnu aluminijumsku leguru EN AW 7049A u pojedinim presjecima u zavisnosti od masenog učešća elemenata i temperature, slika 2.7 a), b), c) i d).



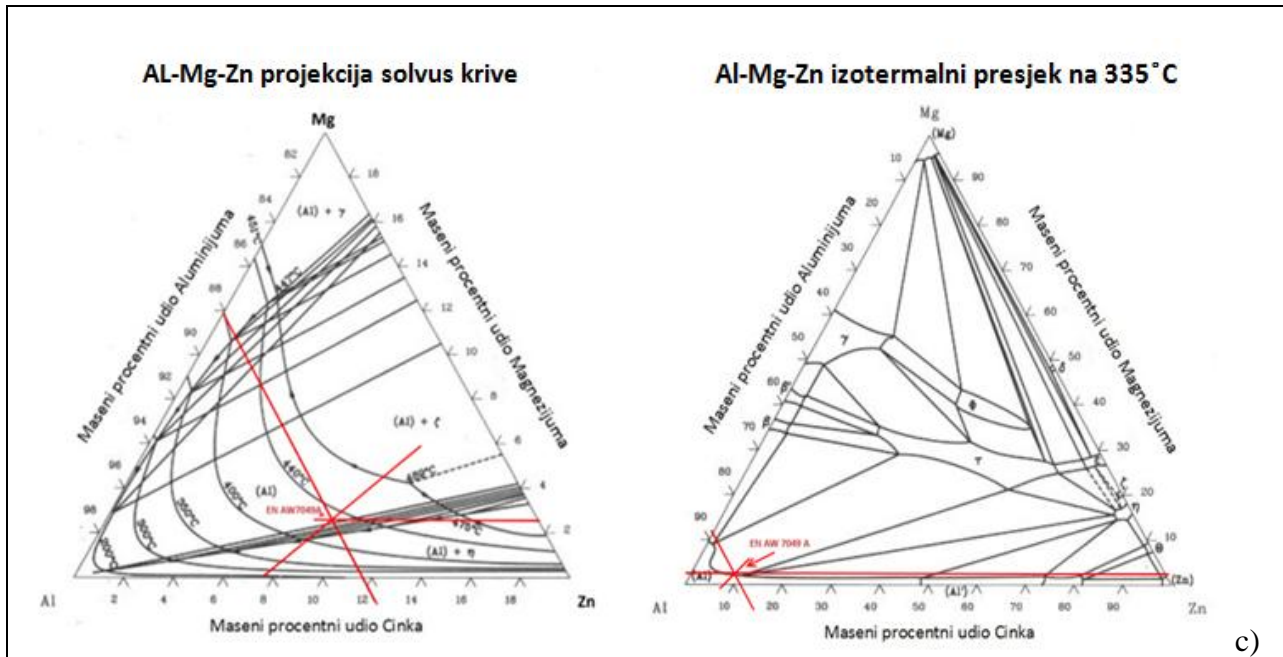
Slika 2.7 a) Presječna tačka EN AW 7049A u izotermalnom presjeku 20°C i projekcija likvidusa



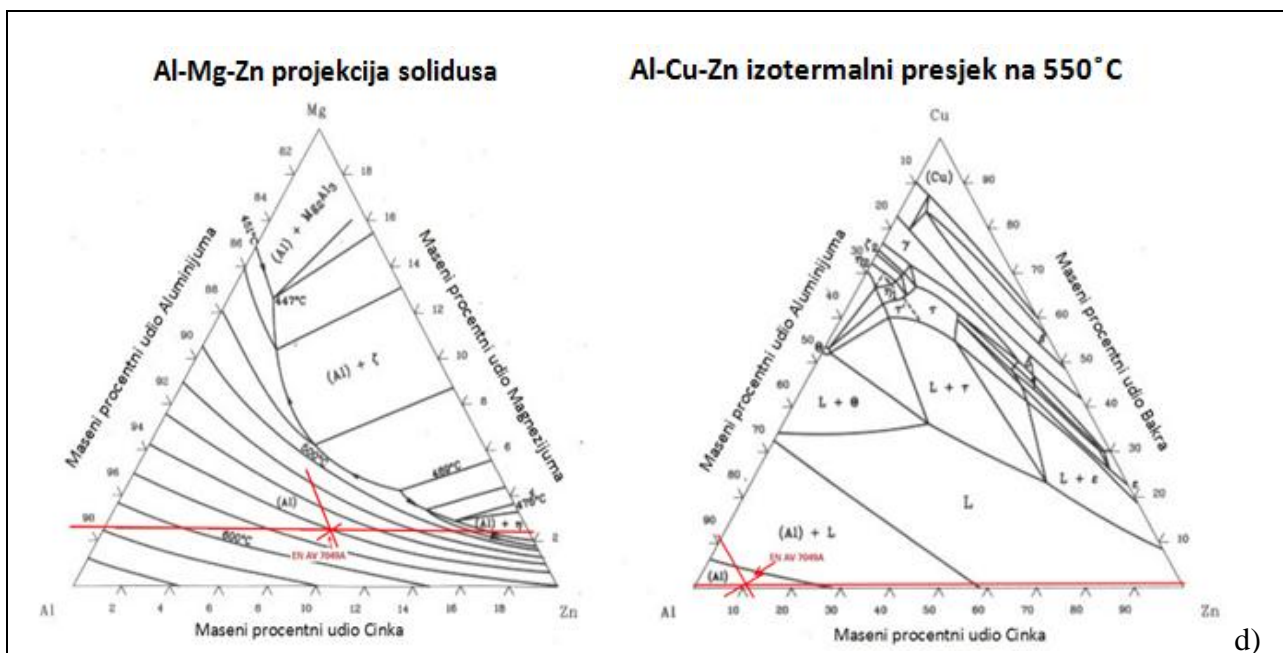
Slika 2.7 b) Presječna tačka EN AW 7049A u izotermalnim presjecima na 700°C i 200°C

Mondolfovim dijagramima obuhvaćeno je ucrtavanje presječnih tačaka ispitivane legure za projekciju izotermalnih presjeka na drugim temperaturama i projekcijama solidusa i likvidusa.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



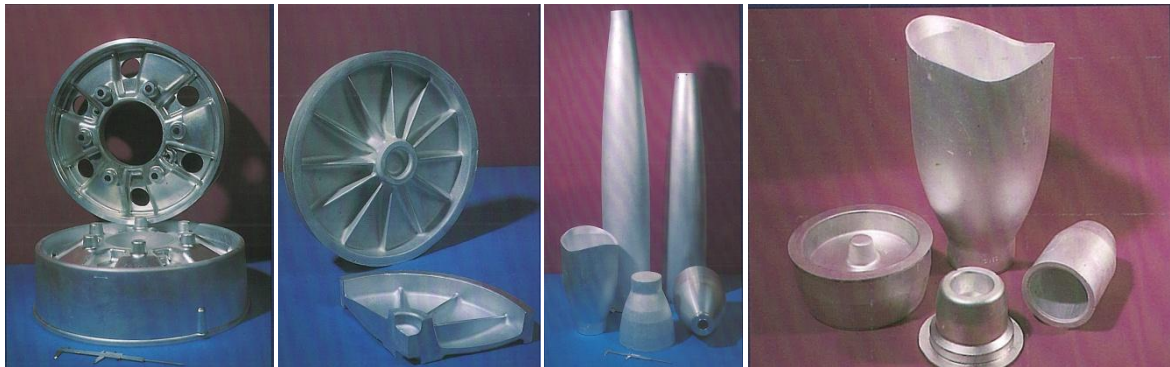
Slika 2.7 c) Presječna tačka EN AW 7049A u izotermalnim presjecima na 335°C i projekcija solvusa



Slika 2.7 d) Presječna tačka EN AW 7049A u izotermalnim presjecima na 550°C i projekcija solidusa

Domaća namjenska industrija je tokom prošlog vijeka, kovane polufabrikate od naznačene legure aluminijuma koristila, između ostalog, u izradi pojedinih djelova i sastavnih komponenta borbenih oklopnih sredstava i raketne tehnike, prikazanih na slici 2.8 ugrađivanih u artiljerijska sredstva od kojih su neka prikazana na slici 2.9.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.8 Komponente od legure PD30 i PD 33 za domaća oklopna borbena sredstva i raketnu tehniku [33]



Slika 2.9 Domaća oklopna borbena sredstva u kojima je korišćena legura PD 33 a) tenk M-84 b) višecijevni bacač raketa [34]

Za borbena oklopna vozila kao što su tenk i višecijevni bacač raketa, ova posebno dizajnirana legura aluminijuma visoke čvrstoće, korišćena je kako bi se povećali domet izradom nosača eksploziva i zaštita od neprijateljskih dejstava.

Kod vojnih formacija tipa pješadije legura EN AW 7049A primjenjivana je u proizvodnji ručnog oruđa zbog relativno male mase i izuzetno visoke sposobnosti da izdrži veliki broj aktiviranja u malom vremenskom razdoblju, slika 2.10 ili kao pojedinačno naoružanje nakon što prođu fabrički test od 1000 ispaljenih hitaca pod vodom, slika 2.11.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.10 Izgled ručnog oruđa u čijim komponentama se upotrebljava legura PD 33 a) M80 - zolja b) M79 – osa [35]

Zastupljenost u ličnom naoružanju legura PD 33 našla je u izradi rama pištolja CZ -99 čiji je izgled prikazan na slici 2.11.



Slika 2.11 Izgled rama pištolja CZ -99 domaće proizvodnje [36]

2.2 Zavarljivost topljenjem legura aluminijuma faznog sastava Al-Mg-Zn (-Cu)

Legure aluminijuma u principu mogu se zavariti konvencionalnim i nekonvencionalnim postupcima, zavisno od uticaja vrste i količine legirajućih elemenata na njihovu sposobnost da ostvare zadovoljavajući spoj. Ova uopštena ocjena o zavarljivosti aluminijumskih materijala izvedena je na osnovu dva veoma značajna kriterijuma karakteristična samo za postupke zavarivanja topljenjem [37]:

- osjetljivosti prema nastanku vrućih prslina i drugih grešaka homogenosti zavarenog spoja, i
- otpornosti na promjene u ZUT naročito prema smanjenju čvrstoće.

Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na proces obrazovanja prslina istraživan je od mnogih autora [38-41]. Njihovi rezultati ukazuju na kompleksnost problema koji se ogleda u nemogućnosti da se utvrdi apsolutna osjetljivost prema pojavi prslina pri zavarivanju aluminijuma i njegovih legura.

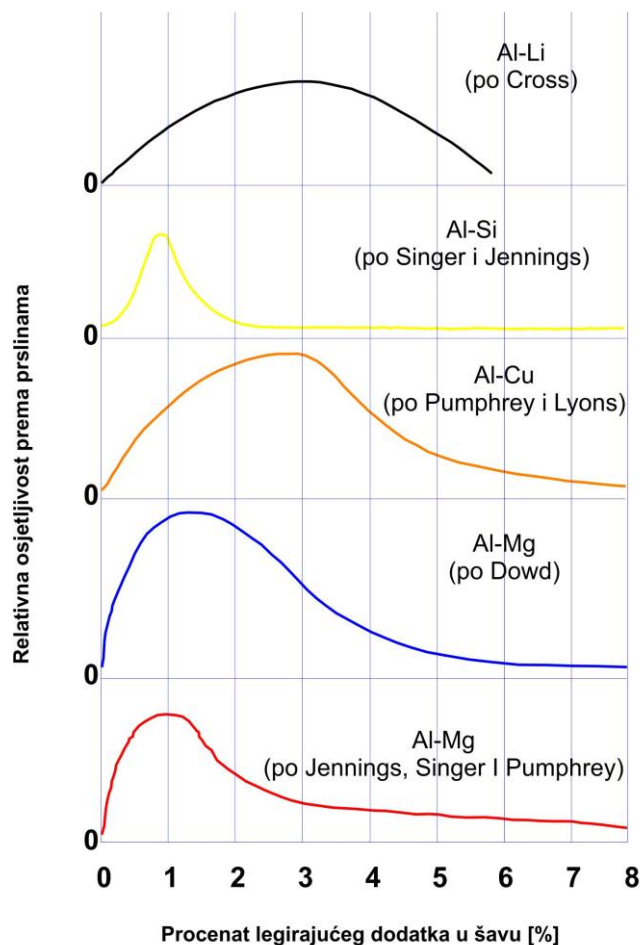
Zbog toga se u literaturi daje samo zavisnost procenta legirajućeg dodatka prema relativnoj osjetljivosti legure na prslina, slika 2.12 [41].

Već je istaknuto da se promjenom količine i kombinacijom različitih legirajućih elemenata i modifikatora (Cu, Mg, Zn, Mn, Ti i dr.), povećanjem stepena čistoće legura u odnosu na primjese (Fe, Si i sl.), termičkom i termomehaničkom obradom postižu zavidne mehaničke osobine legura aluminijuma.

Međutim, mogućnosti obrade zavarivanjem prvenstveno zavise od hemijskog sastava legure i od načina tehnološke prerade, odnosno sposobnosti deformacionog oblikovanja i odgovora materijala na uticaj povišenih temperatura radnog komada [42].

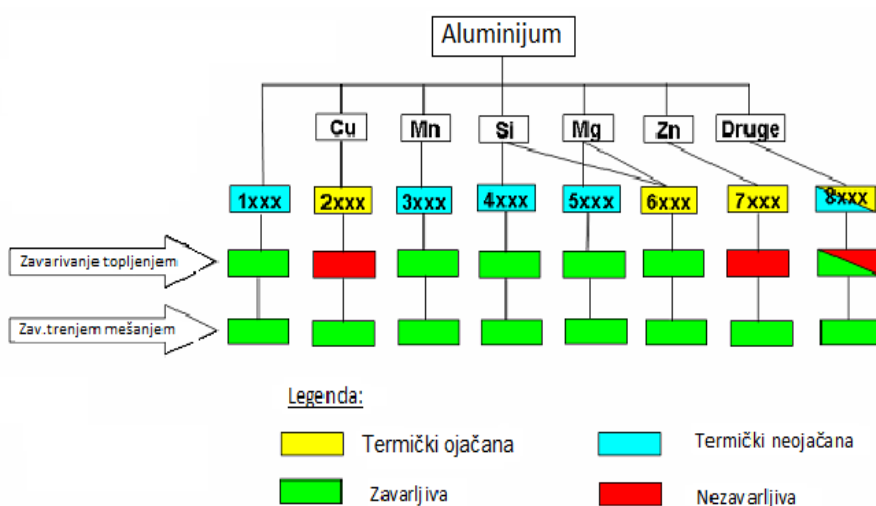
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Ovo je posebno važno u ovom radu kod spajanja legura aluminijuma plastičnim deformisanjem, uz generisanje toplote usled trenja miješanjem, što je suština tehnike ZTM.



Slika 2.12 Uticaj sadržaja legirajućeg elementa na relativnu osjetljivost pojave prslina[41]

Ovim postupkom moguće je veoma uspješno zavariti sve poznate legure aluminijuma, čak i one koje je teško ili nemoguće zavariti na drugačiji način, odnosno topljenjem osnovnog i dodatnog materijala, slika 2.13 [43].



Slika 2.13 Podjela aluminijumskih legura prema legirajućem elementu i njihova zavarljivost u odnosu na primijenjeni postupak zavarivanja [43]

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

2.2.1 Ocjena zavarljivosti postupcima topljenjem taložno ojačavajućih legura aluminijuma visoke čvrstoće

Legure aluminijuma ove grupe, kao što je prethodno istaknuto, najveću čvrstoću postižu termičkom obradom. Njena vrijednost zavisi od vrste legure, prisustva legirajućih elemenata i stepena deformacije gnječenjem (deformacijom). Višekomponentne legure aluminijuma tipa Al-Zn-Mg-Cu pripadaju legurama visoke čvrstoće koja je postignuta zahvaljujući mogućnosti rastvaranja legirajućih elemenata u osnovnoj površinski orjentisanoj rešetki, kao i mogućnostima da rastvorljivost legirajućih elemenata raste sa porastom temperature, a da kao posledica nastaje ojačavanje taloženjem. Ovako postignuto povećanje čvrstoće znatno je veće u odnosu na livene legure. Ovdje treba prevashodno imati u vidu temperature pri kojima se izvrši ojačavanje aluminijumske legure. Naime, hladno ojačavajuće legure (Al-Mg-Si i Al-Cu-Mg), poslije homogenizacionog (rastvornog) žarenja, gašenja i prirodnog starenja na sobnoj temperaturi (hladno ojačavanje), nakon nekoliko dana dostižu maksimalnu čvrstoću. Ponovnim žarenjem mogu se prevesti u meko stanje, a naknadnim gašenjem i starenjem vraćaju se u tvrdo stanje. Za razliku od njih, toplo ojačavajuće legure poslije gnječenja, homogenizacionog žarenja, gašenja i starenja na povišenoj temperaturi (toplo ojačavanje), nakon nekoliko sati postižu najveću čvrstoću. Sam način prevođenja iz mekog u tvrdo stanje i obratno, potpuno je istovjetan sa hladno ojačavajućim legurama aluminijuma [44]. Kada je riječ o drugim mehaničkim osobinama legura aluminijuma, one se uglavnom određene sadržajem legirajućih elemenata, modifikatora i primjesa, kao i hladnom deformacijom. Ovi pokazatelji nalaze se u složenoj zavisnosti od temperature i vremena. Pri izradi zavarenih konstrukcija od svih aluminijumskih legura, javlja se problem dobijanja istih pokazatelja, odnosno jednakih mehaničkih osobina za zavareni spoj i osnovni materijal. Povratak mehaničkih osobina u zavarenim spojevima formiranih topljenjem u legurama aluminijuma koje ojačavaju taloženjem, može se postići ponovnim gašenjem cijelog zavarenog mjesta i toplim ojačavanjem (vještačkim starenjem). Međutim, takva termička obrada, ponekad konstrukcije u cjelini, nije tehnički izvodljiva zbog njenih gabarita ili potrebe za zadržavanjem tolerisanih mjera [45]. Neke od samogašućih legura sistema Al-Zn-Mg, poslije zavarivanja topljenjem, dostižu normalnu čvrstoću zavarenog spoja hladnim ojačavanjem (prirodnim starenjem) nakon tri mjeseca [46]. Ove legure poslije zavarivanja mogu biti podvrgnute i toplom ojačavanju čime se postiže znatno povećanje čvrstoće zavarenih spojeva.

Materijali iz serije legura 7xxx imaju temperaturno područje rastvornog homogenizacionog žarenja znatno niže od drugih faznih sistema. Zbog toga ne dolazi do brzog gašenja kao kod drugih legura tipa Al-Mg-Si i Al-Cu-Mg [46]. Toplota oslobođena pri elektrolučnom zavarivanju djeluje kao vrsta rastvornog žarenja kod Al-Zn-Mg legura, jer je brzina hlađenja sasvim dovoljna da utiče na ponovno otvrdnjavanje materijala u ZUT [47]. Na tome se zasniva specifična pogodnost primjene ove legure kod visoko opterećenih zavarenih konstrukcija. Problemi nastaju kada se leguri Al-Zn-Mg dodaje Cu kao legirajući element.

2.2.1.1 Metalurško-konstruktivna i operativna zavarljivost legura višefaznog sastava tipa Al-Zn-Mg-Cu

Zavarljivost četvornih legura Al-Zn-Mg-Cu ocjenjuje se na osnovu sledećih kriterijuma:

- otpornosti metala šava i osnovnog materijala u zoni uticaja toplote prema pojavi toplih i hladnih prslina,
- otpornosti metala šava prema pojavi nehomogenosti tipa poroznosti i oksidnih uključaka,
- mehaničkih osobina zavarenog spoja kao cjeline u odnosu na mehaničke osobine osnovnog materijala legure, i

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

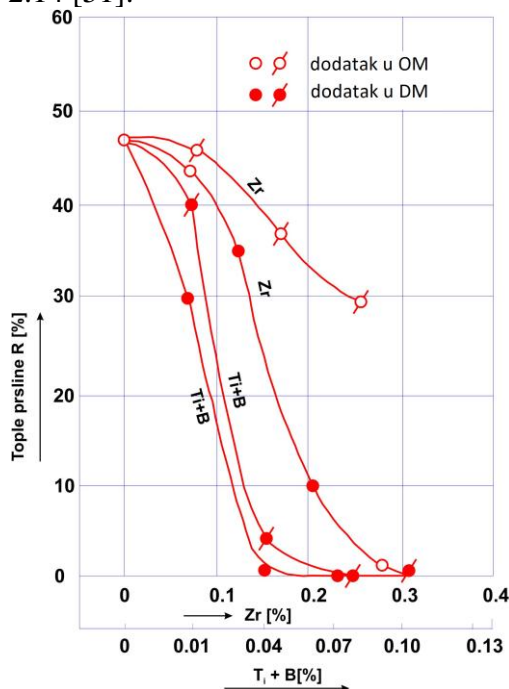
- sklonosti zavarenih spojeva prema pojavi korozije u radnom medijumu.

Zbog značaja kojeg ova legura ima za razmatranja u disertaciji, potrebno je posebno apostrofirati uticaj i uslove nastanka prslina i anizotropije mehaničkih atributa kod topljenjem formiranih zavarenih spojeva.

2.2.1.1.1 Tople prsline u zavarenom spoju

Uzrok pojave toplih prslina je efektivni interval kristalizacije (očvršćavanja) ili temperaturni interval solidus – likvidus stanja, kao karakteristika legure. U ovom intervalu, čvrstoća i plastičnost materijala imaju sasvim male vrijednosti. Ispitivanja udarne žilavosti zavarenog spoja pokazale su da za obrazovanje početne prslina treba uložiti samo malo više energije nego za prekid tečnog materijala [48]. Ova osobenost svojstvena je ne samo kristalizacionim prslinama koje se javljaju u MŠ, nego i „podsolidusnim“ koje nastaju u ZUT, neposredno uz granicu odnosno liniju stapanja. U mehanizmu obrazovanja ovih prslina treba razdvojiti metalurški faktor koji zavisi od hemijskog sastava i strukture, od naponskog faktora koji zavisi od napona i deformacija.

Jedan od načina smanjenja ove sklonosti uz istovremeno zadržavanje ili čak povećanje nivoa zateznih karakteristika je legiranje elementima Mn, Cr, Ti, Zr, Ag, V, B, pojedinačno i u određenim kombinacijama. Prisustvo ovih legirajućih elemenata, prije svega Zr, Ti i B, ima bitan uticaj i na zavarljivost Al-Zn-Mg-Cu legura, a naročito na pojavu kristalizacionih prslina, pojavu zapreminskih nehomogenosti i na strukturne promjene u ZUT [49]. Brojna ispitivanja na smanjenju osjetljivosti prema pojavi toplih prslina pokazali su da je ono moguće, ali ne u potpunosti [50]. To je osnovni tehnološki problem legura serije 7xxx. Legiranja osnovnog metala od 0,1% Zr do 0,3% Zr, odnosno od 0,04% do 0,07% (Ti + B) dolazi do smanjenja sklonosti ka pojavi toplih prslina, a ukoliko OM sadrži preko 0,03% Zr odnosno 0,07% (Ti + B) pojave prslina mnogo su rjeđe, slika 2.14 [51].

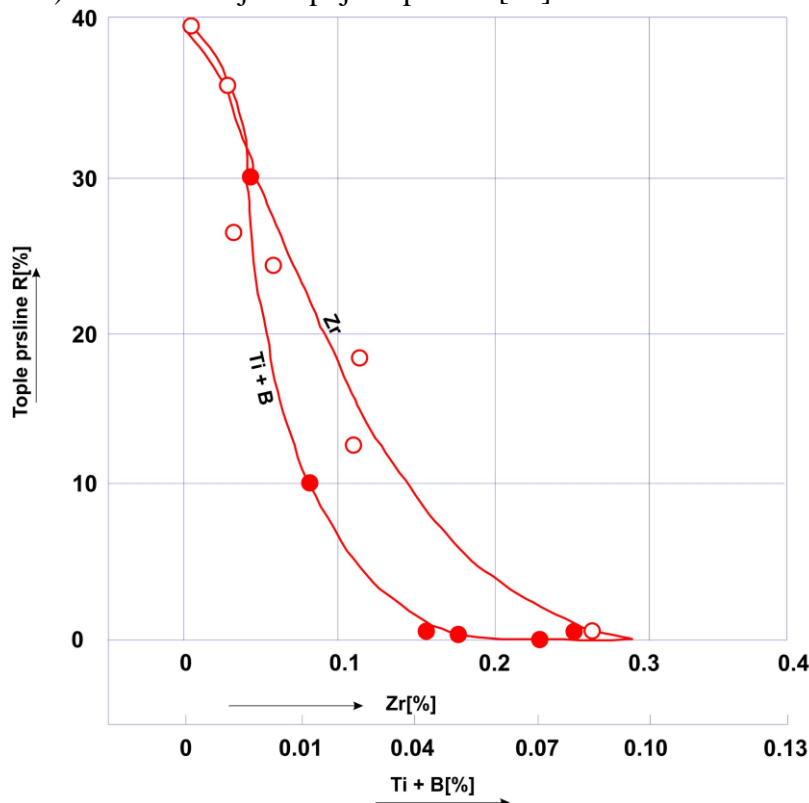


Slika 2.14 Uticaj Zn i Ti + B iz osnovnog i dodatnog uticaja na pojavu prslina (osnovni metal Al-4,5%, Zn-1,25%, Mg i dodatni materijal Al-4%, Mg-2%Zn) [51]

Isti efekti postižu se i pri legiranju dodatnog metala kompleksom (Ti + B), dok je koeficijent smanjena dužina prslina pri legiranju dodatnog metala sa Zr manji u odnosu na prisustvo istog

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

procenta Zr u OM [52]. Do ove razlike dolazi zbog toga što pri legiranju osnovnog i dodatnog materijala sa (Ti + B), ukupna količina (Ti + B) prelazi u MŠ što nije slučaj i sa Zr iz dodatnog materijala, jer je u MŠ sadržaj Zr smanjen sa 1/2 do 1/3 u odnosu na sadržaj u dodatnom materijalu [53]. Time se u stvari objašnjava veći procenat javljanja prslina u MŠ iako je sadržaj Zr u osnovnom i dodatnom materijalu isti. Na slici 2.15 dat je dijagram zavisnosti između sadržaja Zr i (Ti + B) u MŠ koeficijenta pojave prslina [52].



Slika 2.15 Zavisnost između sadržaja Zr ili Ti+B u metal šava i pojave toplih prslina [52]

Mehanizam uticaja Zr i Ti na smanjenje sklonosti Al-Zn –Mg –Cu legura prema pojavi prslina pri zavarivanju nije dovoljno jasan. Međutim, od mnogobrojnih faktora koji su od uticaja na pojavu prslina kao što su veličina zrna, širina temperaturnog intervala rekristalizacije, struktura očvršćavanja, oblik i raspored lako topljivih faza na granici zrna, neki su eksperimentalno dokazani [53].

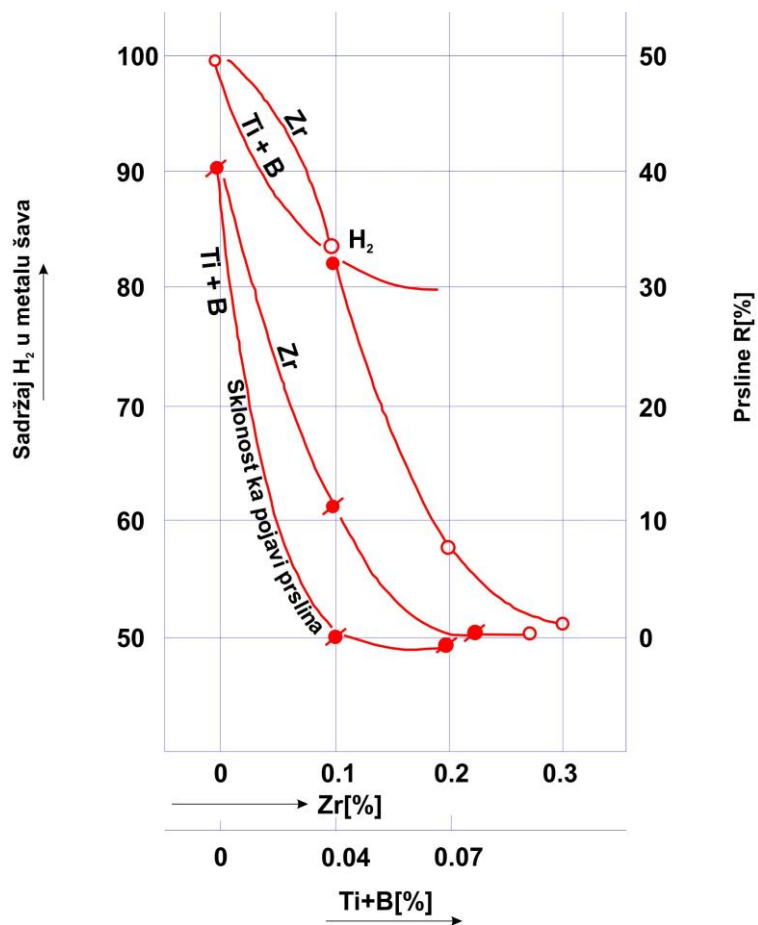
Izvjescno je da pojava kristalizacionih prslina zavisi od veličine zrna, odnosno sklonost legura sa sitnozrninom strukturom prema pojavi toplih prslina manja je u odnosu na legure sa krupnozrninom strukturom, dok (Ti + B) utiču na smanjenje veličine zrna i to u većem stepenu od Zr, što dovodi do smanjenja sklonosti Al-Zn-Mg-Cu legura prema pojavi toplih prslina [54]. Zatim, učešće (Ti + B) pokazuje uticaj i na sniženje H_2 u zavarenom spoju, a čime se smanjuje sklonost ka pojavi prslina, ali je to zanačajno manje nego što su efekti koji se postižu pri legiranju sa Zr, slika 2.16 [55].

Smanjenje osjetljivosti Al-Zn-Mg-Cu legura prema pojavi toplih prslina pri legiranju sa Zr može se objasniti tako što Zr utiče na usitnjavanje zrna i primarnu strukturu kristalizacije MŠ, na oblik i karakter rasporeda lakotopljivih faza po granicama zrna i na sniženje sadržaja H_2 u MŠ [56]. Smatra se da je uticaj Zr na oblik i raspored lakotopljivih faza na granicama zrna primarni faktor u mehanizmu smanjenja pojave prslina koje nastaju neposredno iznad solidus parametara kada je smanjena količina tečnog rastvora između zrna kristala [57].

Ukoliko legure ovog sastava nijesu legirane sa Zr, komponente sa niskom tačkom topljenja raspoređuju se po granicama zrna i imaju oblik opni. U prisustvu Zr, ove komponente se takođe

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

raspoređuju po granicama zrna, ali se u ovom slučaju uglavnom grupišu na tri mjesta na granici zrna i imaju sferoidan oblik [58].



Slika 2.16 Uticaj Zr ili Ti +B na sadržaj H₂ u metalu šava i sklonost prema pojavi toplih prsline [55]

Stanje tečne faze određeno je odnosom energije tečne i čvrste faze na granici podjele [59]. Dakle, jasno je da je ZUT najkritičnije mjesto u zavarenom spoju i nju čine tri područja. Prvo se nalazi neposredno uz samu granicu rastapanja (spoj osnovnog i dodatnog materijala), gdje termički ciklusi izazivaju djelimično topljenje sekundarnih faza koje se nalaze na granicama zrna, pojavu segregacije usled selektivnog migriranja pojedinih elemenata prema područjima sa višom temperaturom i porast zrna [60].

Drugo područje je oblast koju predstavlja čvrsti rastvor odnosno područje gdje dolazi do rastvaranja sekundarnih faza, a što zavisi od vremena trajanja termalnog ciklusa i brzine hlađenja, dok u trećem području, gdje su temperatura obično ispod temperature homogenizacionog rastvornog žarenja, a iznad normalnih temperatura starenja, dolazi do koagulacije već postojećih izlučenih faza i izdvajanja novih sastojaka [61].

Najkritičniji dio ZUT sa stanovišta izdržljivosti je područje neposredno uz zonu topljenja, odnosno područje u kome je temperatura zavarivanja između 580°C do 600°C i područje gdje dolazi do tzv. „prestarivanja“ legura [62]. U dijelu ZUT, između ova dva područja, poslije zavarivanja dolazi do izlučivanja očvršćavajućih faza, to jest do očvršćavanja procesom prirodnog i vještačkog starenja materijala. Pojedina eksperimentalna ispitivanja pokazala su da je kod legura sa višim ukupnim sadržajem Zn+Mg, odnosno sa izraženijim efektima gašenja i starenja, očigledan pad tvrdoće, ali je on uvijek viši nego kod legura sa nižim ukupnim sadržajem Zn+Mg. Međutim, legura sa manjim učešćem Zn+Mg u ukupnom hemijskom sastavu imaju veću plastičnost i energiju udara [63].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Iako u literaturi postoje podaci o uticaju prirodno odnosno vještački starenog stanja legure Al-Zn-Mg na osobine ZUT, kroz eksperimente nijesu uočene neke bitnije razlike [64]. Međutim, ukoliko se zavaruje metal u gašenom stanju zavarenih spojeva pri ispitivanju zatezanjem dolazi do loma u MŠ, dok u ZUT ne dolazi do pada tvrdoće [65].

Ovakvo ponašanje osnovnog materijalu može se objasniti činjenicom da Al-Zn-Mg legure imaju prilično veliki inkubacioni period starenja i temperatura ima neznatan uticaj na očvršćavanje. Kada se zavarivanje izvodi neposredno poslije gašenja, najvjerovatnije da tokom oslobađanja toplote ne dolazi do „prestarijevanja“ kao i do strukturnih napona i deformacija. Kada je riječ o naponskom stanju kao uzroku pojave toplih prslina, onda se to u najvećoj mjeri odnosi na zatežuće napone i deformacije.

Prsline nastaju u MŠ koji još nije potpuno očvrstnuo. Ako je MŠ uspio da očvrstne, tople prsline se ne mogu javiti [66].

2.2.1.1.2 Hladne prsline u MŠ i ZUT

U zavarenom spoju nastalom topljenjem legura Al-Zn-Mg-Cu, najčešće je moguća pojava hladnih prslina, čak nakon par mjeseci poslije zavarivanja [67]. Kao rezultat reaktivnih napona i zateznog opterećenja u zavarenoj konstrukciji, čiji zbir prevazilazi napon tečenja, javlja se plastična deformacija i izvjesni porast napona tečenja MŠ i ZUT. Do porasta vrijednosti napona tečenja može doći i usled otvrdnjavanja (starenja). Ovaj dopunski priraštaj napona je u tijesnoj vezi sa raspadom čvrstog rastvora i predstavlja strukturne napone [67].

Početni period obrazovanja hladnih prslina je karakterističan po koncentraciji grešaka kristalne građe metala, a posebno na granicama zrna. Kinetički mehanizam obrazovanja naknadnih prslina – usporeni lom, nedovoljno je proučen. Poznato je jedino da se osjetljivost zavarenog spoja Al-Zn-Mg-Cu legura prema širenju naknadnih prslina povećava sa porastom odnosa Zn i Mg, odnosno sa se sklonost prema iniciranju prslina i njihovom rastu, povećava sadržajem legirajućih elemenata [68]. U isto vrijeme, promjene mehaničkih osobina zavarenih spojeva nijesu direktno proporcionalne porastu stepena legiranja.

Sa povećanjem sadržaja Zn zatezne osobine rastu, porastom učešća Cu naglo se povećava čvrstoća, dok Mg povoljno utiče i na korozijsku postojanost [69].

2.2.1.1.3 Poroznost u strukturi zavarenog spoja

Izdvajanje vodonika koji je rastvoren u tečnom metalu rezultira pojavom pora u MŠ aluminijumskih legura. One se stvaraju još u tečnom stanju, prije njegove kristalizacije i pri naglom smanjenju rastvorljivosti vodonika [70]. Sklonost metala prema obrazovanju pora nije samo vezana funkcionalnom zavisnošću sa porastom rastvorljivosti gasa pri prelazu metala iz tečnog u čvrsto stanje, kako se ranije smatralo [71]. Veliki značaj pripada gradijentu rastvorljivosti gasa u tečnom metalu, posebno u oblasti bliskoj temperaturi topljenja, tako da što je veći gradijent rastvorljivosti, veća je sklonost MŠ prema pojavi pora.

Pri visokim temperaturama, kakve su kod svih elektrolučnih postupaka zavarivanja, poroznost mogu da izazovu i drugi lako isparljivi elementi, kao što su u prvom redu Zn i Mg [72]. Povećana poroznost krajnje negativno utiče na plastičnost, koncentraciju napona i ukupno stanje otpornosti prema korozijskim zavarenim spojevima.

2.2.1.1.4 Mehaničke osobine zavarenog spoja

Pri izradi zavarenih konstrukcionih materijala od legura aluminijuma javlja se problem dobijanja istih pokazatelja mehaničkih osobina za MŠ i OM. U zavarenim spojevima termički neobrađivih legura sistema Al-Mg, koeficijent čvrstoće kreće se od 0.9 do 1 [73]. Znatno veći problem javlja

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

se kada treba ostvariti zavarene spojeve jednakih ili približno sličnih mehaničkih karakteristika koje ima osnovni materijal kod termički obradivih legura aluminijuma. Pokazatelji zatezne čvrstoće, napona tečenja i drugih parametara nalaze se u složenoj zavisnosti od temperature i vremena [74]. U praksi se za ocjenjivanje promjena osobina metala koriste dijagrami izotermalnog preobražaja, odnosno transformacije pothlađenog čvrstog rastvora. tzv. "S" krive.

Samogasive legure sistema Al-Zn-Mg poslije zavarivanja dostižu normalnu jačinu zavarenog spoja „hladnim“ otvrdnjavanjem - prirodnim starenjem poslije tri mjeseca. Takve legure nakon zavarivanja mogu biti podvrgnute i „toplom“ otvrdnjavanju - vještačkom starenju kada je jačina zavarenih spojeva veoma blizu jačine osnovnog materijala [75].

2.2.1.1.5 Otpornost zavarenog spoja prema naponskoj koroziji

Za ostvarene zavarene spojeve legure sistema Al-Zn-Mg(-Cu) karakteristična je veća sklonost prema naponskoj koroziji nego za osnovni materijal. Osjetljivost prema navedenom tipu korozije zavisi od hemijskog sastava, uslova termičke obrade i tehnologije dobijanja polufabrikata [76]. Sa povećanjem zbirnog sadržaja Zn i Mg iznad 6,5% - 7%, otpornost prema korozionom lomu naglo opada [77]. Veća otpornost zavarenih spojeva prema korozionom lomu može se postići ako se ispuni niz uslova [78]:

- osnovni materijal prije zavarivanja treba podvrgnuti potpunom“ toplom“ otvrdnjavanju, jer će u osnovnom materijlu biti onemogućene strukturne transformacije do kojih dolazi u toku zavarivanja u zoni spajanja i ZUT (rekristalizacija, segregacija legirajućih elemenata, izlučivanje sekundarnih faza),
- poslije zavarivanja preporučuje se „toplo“ otvrdnjavanje oko mjesta spajanja i ako je izvodljivo konstrukcije u cjelini po režimu (100°C,10 h – 20 h +175°C,4-6 h), a sve sa ciljem da se umanje naponi usled zavarivanja,
- primjena dodatnog materijala sa istovremenim prisustvom Cr i Zr, pri čemu sadržaj Mg ne treba da bude više od 5,5% a Fe i Si od 0,2%, respektivno,
- smanjenje pogonske energije, odnosno unosa toplote adekvatnim izborom postupka zavarivanja, a kod opterećenijih konstrukcija upotrijebiti mjere za smanjenje brzine hlađenja zavarenih spojeva.

Sve navedeno upućuje na zaključak da legure iz serije EN AW 7xxx nijesu pogodne za zavarivanje postupcima kojima se oslobađa toplota koja osnovni materijal dovodi u tečnu fazu.

2.3 Postupak zavarivanja aluminijumskih legura u čvrstom stanju na neposredan i posredan način

Nakon što je ukazano na glavne probleme zavarljivosti različitih vrsta aluminijumskih legura sa akcentom na termički očvršćavajuće legure serije 7xxx, u ovom potpoglavlju detaljnije se razmatraju teorijske osnove klasičnog rotacionog zavarivanja trenjem sa posebnim osvrtom na ZTM. Izbor postupaka spajanja prvenstveno zavisi od fizičko-hemijskih osobina OM, oblika i dimenzija radnih komada, kao i veličine proizvodne serije.

2.3.1 Suština procesa spajanja u čvrstom stanju

Zavarivanje pritiskom se, po pravilu, izvodi u čvrstoj fazi bez dovođenja metala na mjestu spajanja u rastopljeno stanje. Nerazdvojni spoj nastaje kao rezultat zbližavanja strukturnih

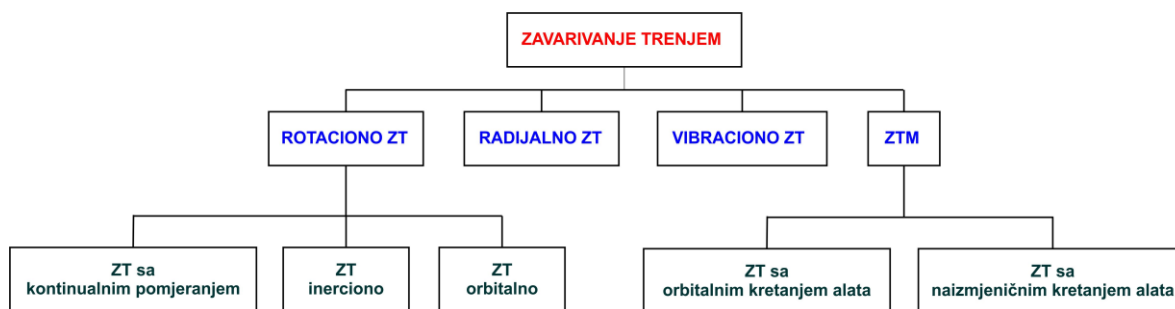
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

elemenata površina u kontaktu do rastojanja jednakih ili bliskih međuatomskim rastojanjima tako da se mogu uspostaviti međuatomne metalne veze [79]. S obzirom da svaki od njih pojedinačno ima malu čvrstoću, realni zavareni spoj dobija se samo onda kada elementarne veze postoje po cijeloj nominalnoj površini dodira. Jedino u tom slučaju postaje neprekidan i može da ima i druge odgovarajuće karakteristike [80]. Pojedini metali (Cu, Al, Pb, Ag i dr.) imaju dovoljnu plastičnost u normalnim uslovima tako da se mogu zavariti pritiskom u ambijentalnim uslovima [81]. Međutim, mnogi metali nemaju osobinu visoke plastičnosti na sobnoj temperaturi. Njihovo spajanje u nerastavljivu vezu moguće je povećanjem plastičnosti zagrijevanjem površina metala koji se spajaju na direktan (neposredan) i indirektan (posredan) način.

Iako temperatura u takvim slučajevima može da bude relativno visoka, ona ne prelazi vrijednost od $0,8T_t$ metala sa nižom T_t u spoju [82]. To je veoma važna karakteristika zavarivanja u čvrstoj fazi iz koje slijede mnoga preostala dobra svojstva spojeva ostvarenih na ovaj način.

2.3.1.1 Konvencionalne i nekonvencionalne metode spajanja trenjem

Zavarivanje trenjem je postupak spajanja pritiskom u čvrstoj fazi kojim se spoj ostvaruje plastičnim deformisanjem tokom direktnog ili indirektnog generisanja toplote na dodirnim površinama predmeta obrade. U zavisnosti od načina generisanja toplote, metode su konvencionalne ili nekonvencionalne. Po svojoj lokaciji, toplotni izvor je unutrašnji, što znači da je generisanje toplote strogo lokalizovano i dešava se u tankim površinskim slojevima metala. Osnovni postupci zavarivanja trenjem prikazani su na slici 2.17.



Slika 2.17 Shema postupaka zavarivanja trenjem[83]

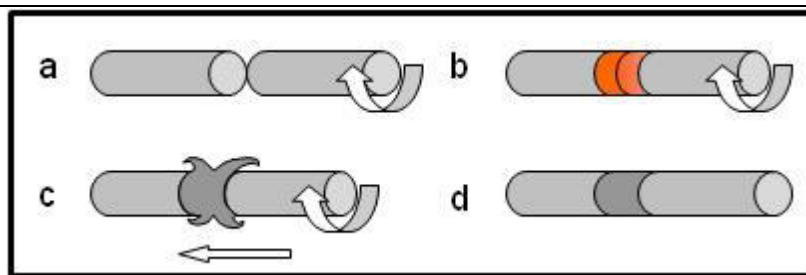
Osnovni principi konvencionalnog zavarivanja trenjem najočigledniji su na primjeru zavarivanja trenjem sa neposrednim pogonom. Proces je ilustrativno prikazan na slici 2.18.

Očigledno je da jedan komad miruje, dok se drugi obrće oko svoje ose, aksijalno se primičući stacionanom radnom komadu, slika 2.18 a).

Slijedi faza intenzivnog trenja tokom koga se čeone površine zagrijavaju, slika 2.18 b) stvarajući „okovratnik“, slika 2.18 c).

Nakon završenog spajanja nastala neravnina obično se mašinskim putem odstanjuje, slika 2.18 d).

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.18 Ilustracija zavarivanja trenjem rotacijom [84]

Ovaj proces praćen je nizom pratećih pojava od kojih su najznačajnije brzo, intenzivno i mjestimično generisanje toplote usled raskidanja funkcionalnih veza u zoni dodira, naglo hlađenje malih količina materijala, elastično deformisanje tankih površinskih slojeva, zatim rekristalizacija i difuzija strukturnih elemenata [84]. Bitno ograničenje u komercijalnoj upotrebi ovog postupka je mogućnost zavarivanja radnih komada samo ako je jedan na mjestu spajanja cilindričan.

2.3.1.1 Nekonvencionalni postupci zavarivanja trenjem-ZTM

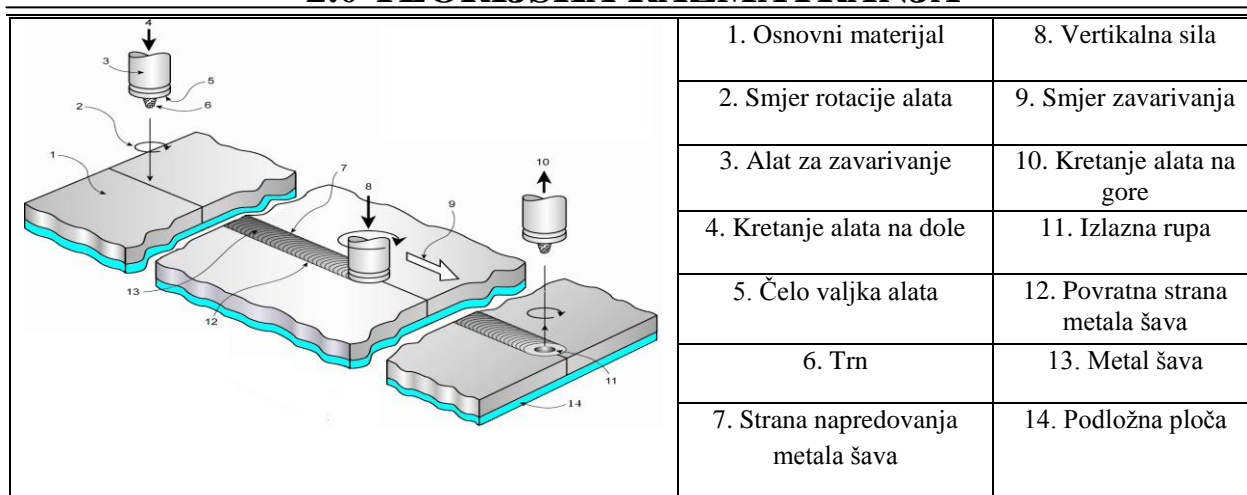
Između više varijanti i modifikacija zavarivanja trenjem, dominira ZTM kao tehnika spajanja metalnih materijala u odsustvu tečne faze, odnosno bez topljenja osnovnog i dodatnog materijala. Ono je nastalo iz potrebe prevazilaženja problema u otklanjanju mnogobrojnih teškoća u ostvarivanju zavarljivosti u prvom redu aluminijuma, posebno legura aluminijuma visoke čvrstoće. Postupak je patentiran u TWI (*The Welding Institute*) - Institutu za zavarivanje u Abingtonu nadomak Kembridža, Velika Britanija, prije dvije i po decenije pod vođstvom *Wayna M.Thomasa* [85]. Prve aplikacije u industriji zabilježene su u brodogradnji u Švedskoj potom u autoindustriji i u izradi vagona za željeznički transport 1995. godine. Nedugo zatim počinje primjena ZTM u Japanu, SAD i Australiji za različite potrebe, čak i mnogo ranije nego što se razumjela njegova suština.

Za limove se do tada koristilo frikciono zavarivanje rotacionim diskom, a sada se primjenom ZTM spajaju limovi većih debljina (legura aluminijuma čak do 75 mm dvostrano) i različitih materijala (konstruktivni čelici, visokolegirani čelici, legure Mg, Cu, Ti čak i kompozitni materijali). Važno je naglasiti da se jedino kod spajanja čeličnih limova sa povećanim učešćem Cr i Mn, kao zaštitni gas koristi Ar ili He koji sprečavaju negativan uticaj atmosfere [87]. Alat je u takvim slučajevima izrađuje od legure reniuma-veoma rijetke vrste metala izuzetno otpornog na habanje u prisustvu ekstremno visoke temperature. Ograničenja diktirana mjestom i položajem zavarivanja, upotrebom CNC (*Computer Numerical Control*) tehnologije i praktično su neograničene. Moguće je zavarivati sučeone, preklopne i ugaone spojeve u horizontalnom, kosom, orbitalnom i vertikalnom položaju. Izuzetno su velike mogućnosti automatizacije i robotizacije postupka. Fizička suština generisanja toplote kod ZTM je istovjetna kao i kod klasičnog rotacionog zavarivanja trenjem, samo što se kod ovog postupka toplota ne oslobađa direktno međusobnim trenjem zavarivanih radnih komada, već posredstvom specijalno dizajniranog alata koji se kombinovano kreće po liniji dodira pločastih materijala.

2.2.2 Fizička suština procesa ZTM

Ostvarivanje spoja ZTM realizuje se u laboratorijskim uslovima uglavnom na sledeći način: osnovni materijal u obliku limova (1) sučeono su pritisnuti u dvije ravni za oplatu (podložno-steznu ploču) (14), koja može da se translatorno kreće, slika 2.19.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.19 Ilustracija postupka ZTM [88]

Za generisanje toplote koristi se specijalni alat najčešće cilindričnog oblika nosača (3). Njega čine tijelo čela (*Shoulder*) alata (5) značajno većeg prečnika od trna (*Pin*) alata (6). Prelaz između tijela (5) i trna alata (6) uglavnom je zaobljen, dok je lice na tijelu alata konveksna, konkavna ili ravna površina različite profilacije. Alat se nalazi normalno ili pod uglom do 3° suprotno od smjera zavarivanja sa silom zavarivanja u aksijalnom pravcu (4) sa smjerom u liniji dodira limova.

U tom položaju alatu se zadaje rotaciono (2) i translatorno kretanje vertikalno naniže (4), a trn (6) uranja po sredini spoja istovremeno u oba lima pri čemu se usled trenja generiše toplota. Osnovni materijal se zagrijava do blizu T_t i postaje plastičan. Reakcije veze metala u čvrstoj fazi nastaju zahvaljujući povećanom pritisku i difuziji zbog čega se javlja viskoplastično stanje u kontaktnom području koje kasnije u nastavku procesa hlađenjem očvršćava.

Kao takav materijal se kreće oko trna što utiče na stepen njegovog miješanja. Intezitet miješanja zavisi uglavnom od oblika trna alata. U trenutku kada čelo alata (5) djelimično prodre u gornje površine limova, vrh trna alata je u blizini podmetača na steznoj ploči-postolju. Prekida se njegovo kretanje u vertikalnom pravcu, nakon kraćeg zadržavanja počinje horizontalno translatorno kretanje radnog stola - postolja ili alata.

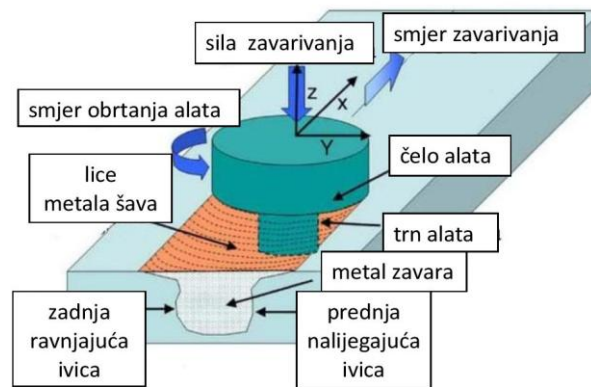
U toku daljeg rada, alat izvodi kombinovano obrtanje (*Rotation speed*) i kretanje u smjeru zavarivanja (*Welding speed*), dok se novi materijal zagrijava postajući mekan i neprekidno se miješa. Za to vrijeme iza tijela alata očvršćavanjem konsoliduje se spoj ograničen stranama (7)-strana napredovanja i (12)-povratna strana MŠ.

U ravni formiranja spoja izgled površine odgovara profilu čela alata, dok sa donje strane podložna ploča stezne oplata utiče na konsolidaciju MŠ (13). Zavarivanje se prekida onog trenutka kada alat ili postolja završe translatorno-uzdužno kretanje, alat nastavi određeno vrijeme sa obrtanjem, a nakon toga kretanjem prema gore u aksijalnom pravcu, napušta zavarene radne komade (10). Nakon okončanja zavarivanja, ostaje rupa čija geometrija odgovara obliku trna alata (11).

Na slici 2.20 dat je shematski prikaz osnovnih koordinata procesa kretanja alata, sile zavarivanja (aksijalne sile) i ivica alata u odnosu na MŠ.

Prednja nalijegajuća ivica MŠ je na strani napredovanja alata (identični smjerovi vektora ugaone brzine alata i smjera zavarivanja), a zadnja ravnijajuća ivica je na povratnoj strani MŠ (suprostavljeni smjerovi vektora brzine obrtanja alata i vektora smjera zavarivanja). Prostor ograničen prečnikom alata je lice MŠ i njegova širina je jednaka prečniku čela alata.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.20 Ilustrativna shema osnovnih kinematskih i geometrijskih obilježja ZTM [89]
(Napomena: smjer obrtanja alata suprotan je smjeru kretanja kazaljki na časovniku)

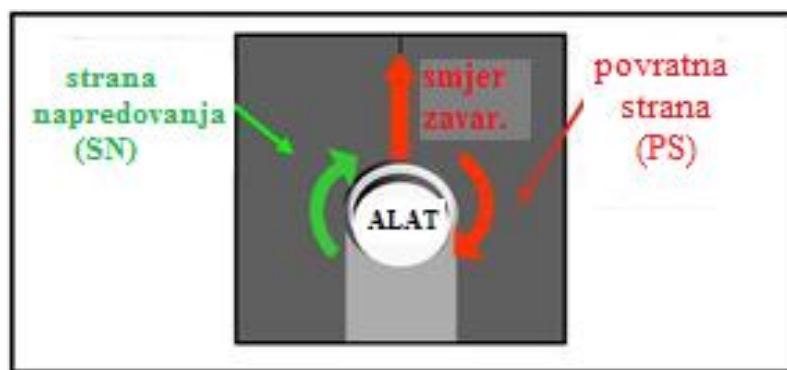
Suprotno od lica MŠ, na korjenoj strani u širini koja odgovara prečniku trna alata, nalazi se neznatno šira zona oko korjena vizuelno prepoznata po izmijenjenoj boji usled uticaja toplote.

2.3.3 Karakterizacija zavarenih spojeva formiranih ZTM

U poređenju sa zavarenim spojem nastalim izvođenjem postupcima topljenja, MŠ kod ZTM formiranog mjesta spoja ima niz geometrijskih, metalurških i mehaničkih razlika i osobenosti.

2.3.3.1. Geometrijske karakteristike MŠ

Za razliku od osnosimetričkog poprečnog presjeka zavarenog spoja kod postupaka zavarivanja topljenjem, MŠ kod ZTM obrazovanog spoja je asimetričan. Ovakav oblik posledica je rotacije alata i smjera zavarivanja, odnosno načina prenosa (protoka) materijala u odnosu na pravolinijsko kretanje alata. U tom smislu, kod primjene osnovnog tipa alata i u slučajevima kada alat rotira u istom smjeru tokom trajanja svih faza i ciklusa procesa, geometrijska slika jasno diferencira dvije strane MŠ, slika 2.21.

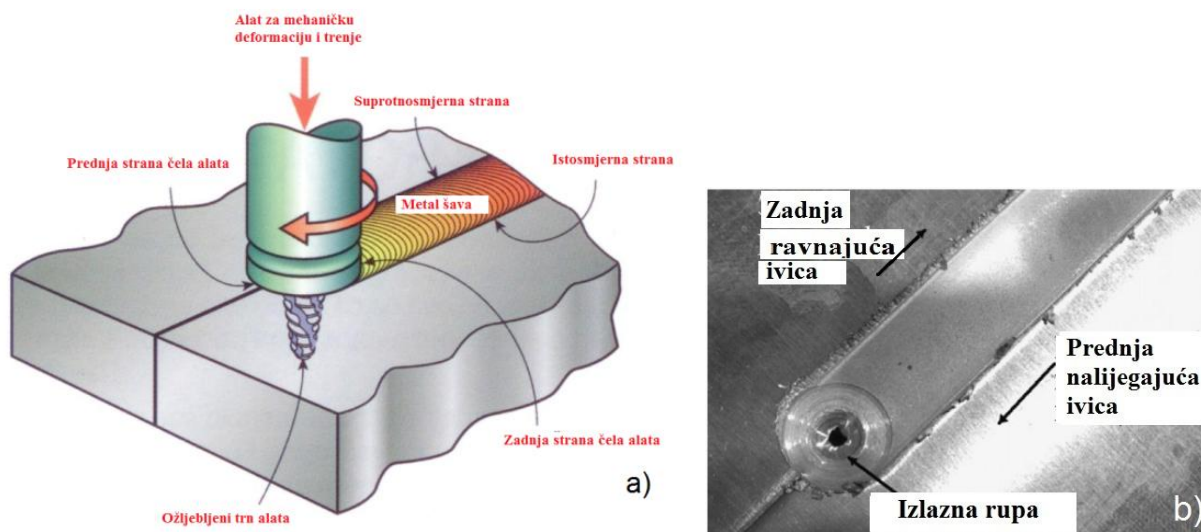


Slika 2.21 Dvije različite strane MŠ u odnosu na smjer obrtanja alata i smjer zavarivanja [90]

Istosmjerna strana (*Advancing side*) određena je podudarnošću smjerova vektora ugaone brzine obrtanja alata i vektora brzine translatorskog kretanja alata, dok su suprotnosmjernoj strani (*Retreating side*) ovi vektori suprotno orjentisani, slika 2.21 [90].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Sledstveno ovoj analogiji, takođe se razlikuju prednja nalijegajuća ivica na istosmjernoj (strani napredovanja) i zadnja ravnajuća ivica na suprotnosmjernoj strani (povratnoj strani). Prednji dio alata posmatrano u smjeru zavarivanja je vodeća, a zadnji dio alata je prateća ivica alata, slika 2.22.



Slika 2.22 Modifikovani prikaz a) identifikacije ivica alata b) fotografija spoja kod ZTM [91,92]

Površina koju oblikuje čelo alata i koja ostaje nakon prolaska alata po gornjoj površini zavarenih komada je lice MŠ, a korjen je površina kojoj pripada i linija spajanja sa donje strane u čijem oblikovanju najviše učestvuje dio oplata-podložna ploča (podmetač).

Lice MŠ čija je širina jednaka prečniku čela alata ima reljef u obliku polukružnih ivica dimenzija koje zavise od profila čela alata i ugla nagiba alata u smjeru suprotnim od smjera zavarivanja. Najmanje su kod potpuno ravnog i glatkog izgleda čela alata. Međusobno rastojanje između njih odgovara putu koji alat pređe krećući se pravolinijski po gornjim površinama komada za vrijeme jednog obrtaja alata. Kod mekših materijala na suprotnosmjernoj strani lica MŠ najčešće dolazi do istiskivanja materijala kojeg napravi zadnja ravnajuća ivica alata na njegovom putu u smjeru zavarivanja. Ova pojava „naboravanja“ osnovnog materijala naziva se bljesak (*flash*) efekat i može se smanjiti optimalnim izborom parametara zavarivanja, prije svih manjom dubinom prodiranja alata, podešavanjem ugla nagiba alata i korekcijama izgleda čela alata. Kod realizacije postupka ZTM sa alatom koji ima fiksnu visinu trna, na kraju zavarivanja ostaje rupa (*keyhole*). Ovaj nedostatak eliminiše se na način što se odsiječe dio zavarenog komada koji sadrži otvor ili, kao kod orbitalnog zavarivanja cijevi, nastavi dionica zavarivanja na materijalu u obliku trake iz koje se izvlači alat. Nastavak se poslije zavarivanja mehanički odstrani. Ovo je najčešće rješenje u samom začetku procesa razvoja ZTM, mada se u posljednje vrijeme sve više koriste i drugačiji tipovi alata sa mnoštvom kombinacija geometrije i međusobnog odnosa alata i obratka (sa trnom koji se uvlači u tijelo nosača alata, primjera radi).

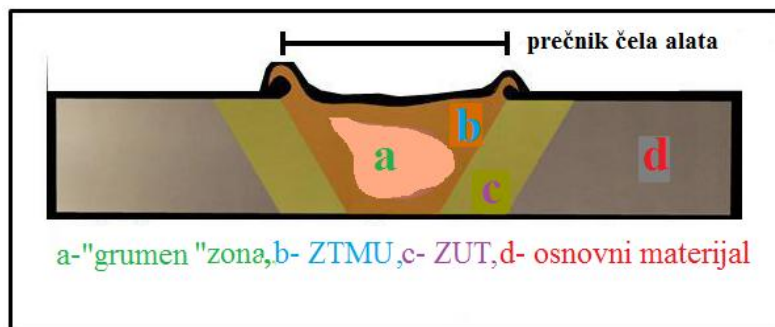
2.3.3.2 Metalurške karakteristike MŠ

Proizvod plastične deformacije na povišenim temperaturama u ZTMU manifestuje se promjenom strukture u MŠ kroz procese rekristalizacije, rastvaranja taloga, povećanja finoće zrna i njihove gustine u pojedinim njegovim sadržajima [93].

Prva metalografska diferencijacija strukture MŠ kod spojeva formiranih ZTM urađena je tokom patentiranja na aluminijumskim polufabrikatima. Autori su u leguri aluminijuma na osnovu kristalne građe sadržaja svih zona zavarenog spoja razlučili postojanje tri specifična znatno različita područja. Na slici 2.23 shematski je prikazan poprečni presjek sa slovno numerisanim

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

zonama koje se razlikuju po mjestu formiranja, izgledu mikrostrukture i veličini odnosno orijentaciji zrna.



Slika 2.23 Shematski prikaz karakterističnih konstituenata matala zavara kod ZTM [93]

Ovako načelna shema u daljoj makrostrukturnoj analizi može se raspoznati i na osnovu odnosa tamne i svijetle boje, to jest forme prikaza na makroskopskom izbrusku iz probnog eksperimentalnog zavarivanja za potrebe ove disertacije čiji je izgled dat na slici 2.24.



Slika 2.24 Makrostrukturni prikaz strukturnih sadržaja zavarenog spoja u jednoj od eksperimentalnih tačaka urađenih za vrijeme probnih zavarivanja legure EN AW 7049A T 652

Jezgro MŠ (*Stirred Zone*) pri dnu je lavorastog a na vrhu elipsastog izgleda. Formirano je od regije kroz koju prođe trn alata i obuhvata ZG- zonu „grumena“ kao dio zone termomehaničkog uticaja (ZTMU) omeđenoj prečnikom čela alata na gornjoj strani i podmetačem oplata sa donje strane. Lavorasti oblik jezgra formira se pri manjim ugaonim brzinama alata, dok je elipsasti prisutniji kod zavarenih spojeva ostvarenim sa većim brojem obrtaja alata. U stručnoj literaturi, iako se svi autori slažu da se radi o tranzicionoj zoni, prisutna su dva tretmana u analizi regiona koji pripadaju ZTMU. Prvi je da zona „grumena“ i korjen ne pripadaju ZTMU, već da predstavljaju posebne oblasti.

Drugi prilazi na način što, osim jezgra u kome je i rukavac blizu lica MŠ, koji se formira tako što prednja ivica alata pređe sa povratne strane preko već konsolidovanog grumena na stranu napredovanja, kao područje koje pripada ovoj rekristalizovanoj zoni smatraju i korjen MŠ sa ledne strane MŠ. Rukavac se nalazi neposredno ispod čela nosača alata sa orijentacijom od suprotnosmjernje prema istosmjernoj strani, odnosno od povratne ka strani napredovanja. Zona termomehaničkog uticaja, posebno ZG uglavnom se raspoznaje po postojanju ultrasitnih rekristalizovanih zrna nastalih uticajem plastičnih deformacija od alata i toplote generisane trenjem aktivne površine alata o gornje kontaktne površine ploča legure aluminijuma.

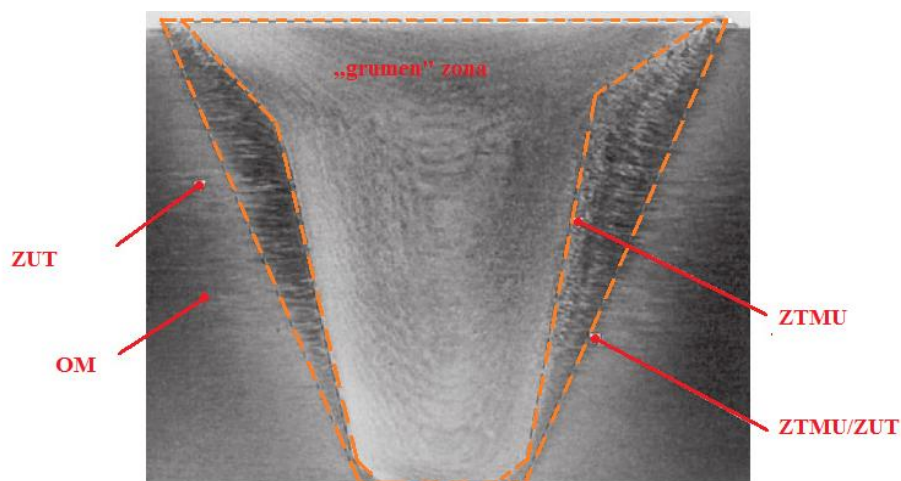
Na našim prostorima već postoji razvijen originalni analitički model za proračun količine angažovane snage na alatu koja se transformiše u toplotnu. Pojavni oblici dinamičke rekristalizacija rezultuju generacijom finih i jednakih zrna.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Ovakva tvrdnja tačna je samo za ZG dok cijela ZTMU može biti samo djelimično rekristalizovana ili čak nerekrystalizovana [96]. Veličina ovih zrna zavisi od vrste legure i režima zavarivanja i kreće se od 1-10 μm .

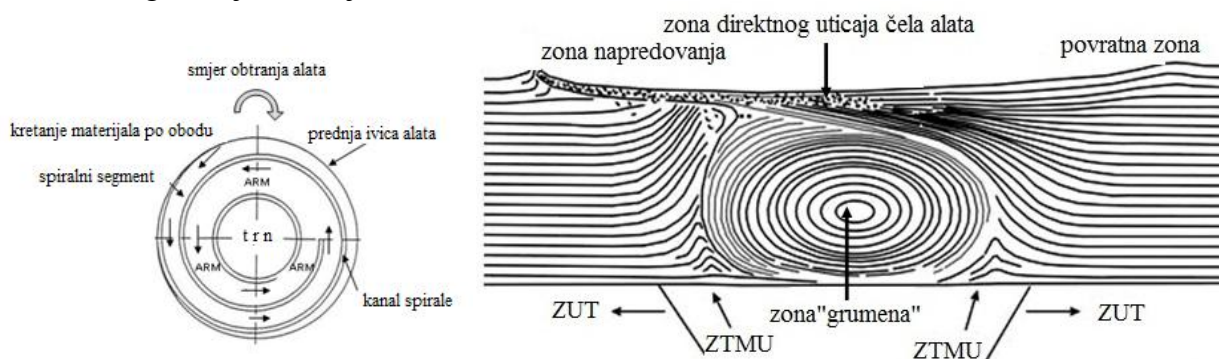
Zona uticaja toplote neposredno do ZTMU, izložena je samo uticaju toplote u odsustvu plastične deformacije, zbog čega je njeno zrno grubo i trakasto izduženo u smjeru od povratne prema strani napredovanja alata. Ispod temperature 250°C ima istu strukturu kao OM.

Na mjestima oštrijih prelaza iz jedne u drugu zonu vidljivo je odsustvo plastičnih deformacija i slabiji uticaj toplote prema ZUT, slika 2.25 [94].



Slika 2.25 Prelazna područja između zona MŠ [94]

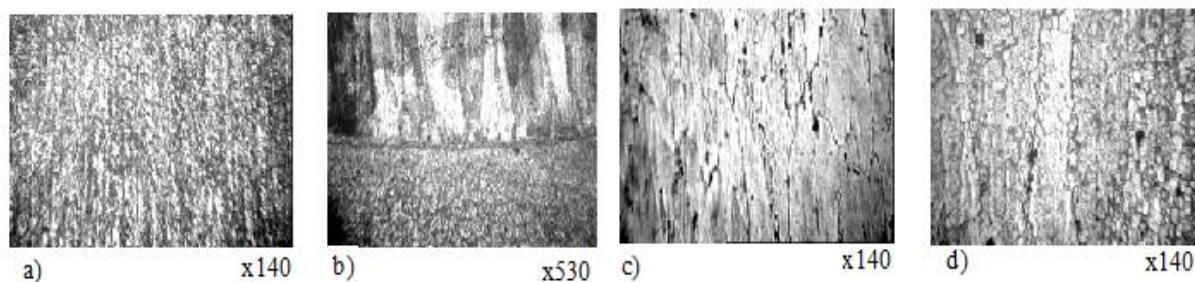
Ovo je razlog da jedan broj istraživača, potpuno ispravno tretirajući omekšani materijal kao nenjutonovski fluid, ide na rigoroznije razdvajanje strukturnih sadržaja opredeljujući se za diferencijaciju isključivo na osnovu intenziteta toka i transfera linija tečenja (*Void*) koje je u primarnoj fazi najveće oko trna alata, dok sve ostale zone ispod čela alata sadrže elemente sekundarnog tečenja materijala, slika 2.26.



Slika 2.26 Ilustracija toka tečenja materijala kod alata sa graviranom površinom čela [95]

Mikrostruktura sadržaja zavarenog spoja direktna je posledica lokalnog zagrijavanja i tečenja materijala. Na slici 2.27 prikazani su mikroizbrusci zavarenog spoja uzorka iz prvih priprema za glavna eksperimentalna zavarivanja ovog rada.

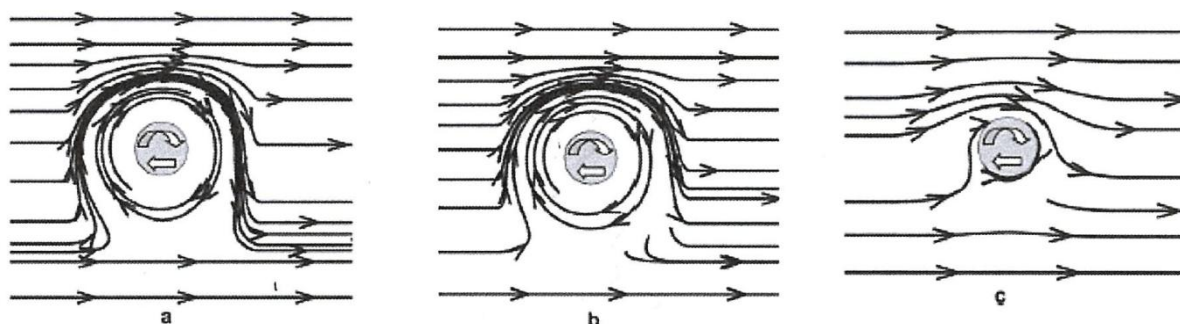
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.27 Klasičan izgled mikrostrukture zavarenog spoja iz perioda probnih eksperimentalnih zavarivanja legure EN AW 7049A T652 a) jezgro metala zavara-ZG b) ZTMU- prelaz od ZG prema ZUT c) ZUT d) OM [96]

Očigledno je da ovako radikalna transformacija mikrostrukture na malom prostoru potiče iz prirode tečenja materijala tokom ostvarivanja procesa zavarivanja. Istraživači su saglasni da je ono posledica dvije na prvi pogled suprotstavljane struje tečenja-primarnog tečenja materijala u horizontalnom pravcu oko trna (podsjeća na laminarno strujanje fluida oko rotirajućeg cilindra) i sekundarnog tečenja materijala u vertikalnom pravcu duž ose alata. U modelima plastičnog toka materijala na višim elevacijama, oblik strujnica upućuje na prisustvo recirkulacionog toka materijala u zoni rotacije oko vrha alata, slika 2.28a). Njene debljine najviše zavise od karakteristika legure, parametara zavarivanja i brzine prelaska toplote na alat. Oblik strujnica na slici 2.28b), karakterističan za srednju elevaciju, pokazuje područje izvan recirkulacionog plastičnog toka, odnosno tranzicionu zonu u kojoj se transfer mase odvija na zadnjoj ravnojajućoj ivici sa elementima povratka materijala na stranu prednje nalijegajuće ivice u blizini vrha alata, dok se na slici 2.28c) jasno uočava relativno pravolinijska putanja na nižim elevacijama [97].

Generalno, kod prve struje tečenja potrebno je transportovanje dovoljno velike količine prethodno omekšanog materijala od povratne prema strani napredovanja, dok se kod druge struje tečenje materijala odvija ispod čela alata na licu prema korjenu MŠ. Usled toga profilišu se i čelo alata i reljef trna tako da potiskuju plastifikovani materijal prema naličju MŠ. Prvi tok materijala je oko trna alata gdje se omekšani materijal vrti, drugom toku pripada potiskivanje materijala usled zavojnice na trnu prema podložnoj ploči na oplati, dok u trećem toku dolazi do istikivanja udaljenih količina plastifiranog materijala prema čelu alata.

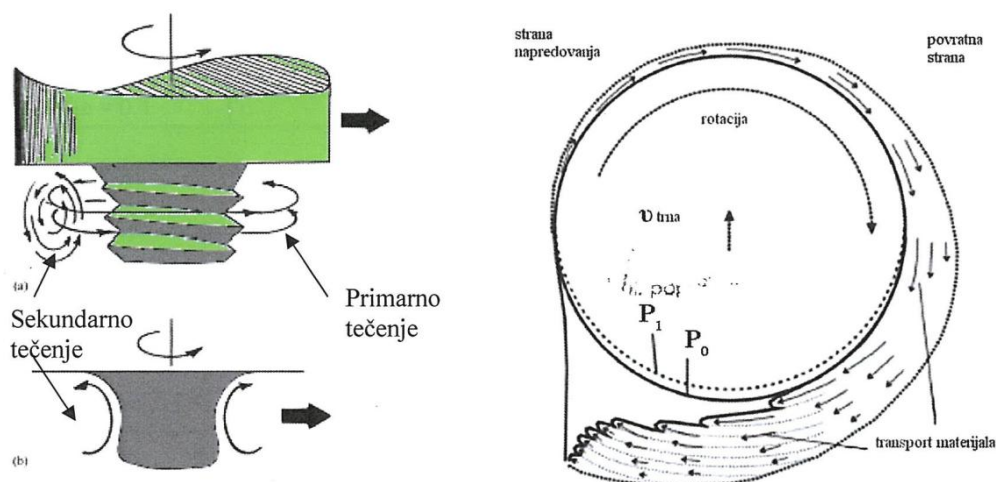


Slika 2.28 Principijska ilustracija struja i linija tečenja materijala kod ZTM [97]

Sve iznijeto upućuje da se sekundarno tečenje odvija u tri područja po visini trna alata. U prvom području, neposredno ispod čela alata na povratnoj strani, omekšani materijal u tankom sloju kružno cirkuliše do mjesta prelaska na zaobljeni dio trna alata što uzrokuje pojavu tzv. "luk – prsten" strukture, potom se na sredini visine trna materijal vrtložno spušta na stranu napredovanja sve dok ne dospije ispod trna alata gdje se relativno kreću alat i materijal podmaklog stadijuma plastičnosti.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

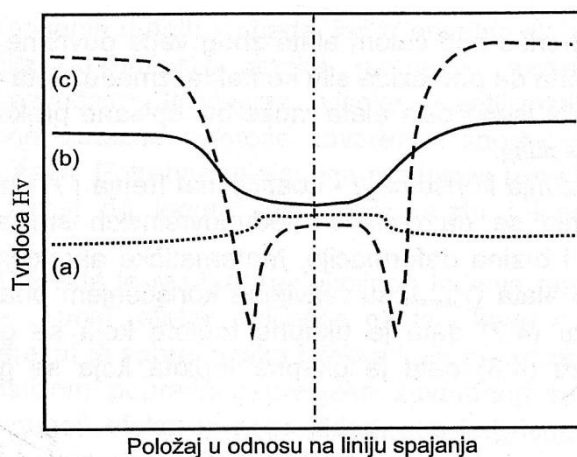
Veći dio toka materijala je na zadnjoj ravnajućoj ivici koji iza alata formira MŠ. Ukupno kretanje materijala je proizvod međusobne interakcije svih pomenutih kretanja, slika 2.29.



Slika 2.29 Shematski prikaz primarne i sekundarne faze tečenja materijala kod alata sa trnom sa zavojnicom [98]

2.3.3.3 Tvrdoća u poprečnom presjeku MŠ starosno tretiranih legura aluminijuma

Metalurške transformacije određuju sve osobine zavarenog spoja. Tvrdoća zavarenog spoja kao njihov produkt razlikuje se kod legura koje ojačavaju termičkim taloženjem od tvrdoće legura koje ojačavaju deformacijom ili kod čistog aluminijuma kod kojih je tvrdoća MŠ manja od tvrdoće OM. Ovo se objašnjava pojavom lokalnog žarenja kod ZTM koje umanjuje broj dislokacija, slika 2.30.



Slika 2.30 Profili tvrdoće kod različitih vrsta aluminijumskih legura a) termički neobrađene legure aluminijuma sa malim porastom tvrdoće u ZG b) deformaciono ojačavajuće legure aluminijuma sa padom tvrdoće u ZG c) termički obrađene aluminijumske legure sa padom tvrdoće neposredno iza ZG u ZTMU [99]

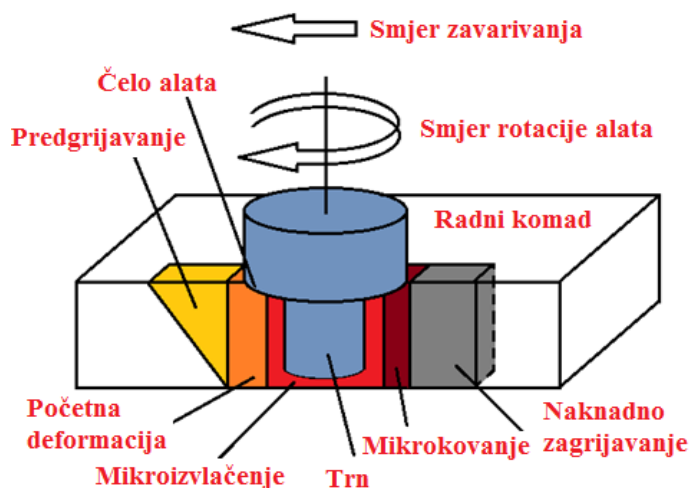
Dijagram odnosa vrijednosti tvrdoće u zavisnosti od centra MŠ kod termički ojačavajućih legura aluminijuma ukazuje da je najmanja vrijednost tvrdoće neposredno izvan ZG u oblastima tranzicionog prelaza ZTMU prema ZUT karakterističnim po smanjenom učešću sitnih čestica i o grubljavanju taloga.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Neki istraživači su mišljenja da povećanju tvrdoće u ZG najviše doprinosi povećanje brzine zavarivanja zbog manjeg unosa toplote u zonu miješanja, odnosno bržeg hlađenja [100].

2.3.4 Mehaničke osobenosti zavarenog spoja

Zavareni spojevi nastali ZTM specifičniji su iz razloga što se sa mikrostrukturnog aspekta može posmatrati kao sinteza dvije tehnologije obrade plastičnim deformisanjem na mikro nivou-izvlačenje i kovanje. Začetak prve pojave povezan je sa ciklusom transverzalnog kretanja alata u prvim trenucima zavarivanja, dok je druga pojava posledica povećane ugaone brzine alata još u fazi prodiranja alata, slika 2.31.



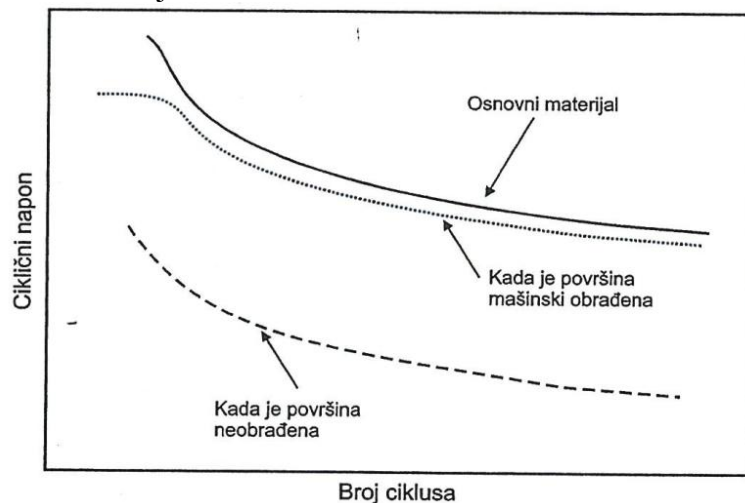
Slika 2.31 Modifikovani prikaz termomehaničkih segmenata postupka ZTM [101]

Predgrijavanje ispred trna alata potiče od trenja i adijabatskog zagrijavanja nakon mehaničke deformacije. Nivo temperature predgrijavanja zavisn je od geometrije alata i brzine zavarivanja, a posebno od toplotne provodljivosti radnih komada. Ovo je univerzalni pristup jer se tokom procesa izvlačenja koje se dešava kretanjem alata u smjeru zavarivanja, materijal zahvata i primarnom i sekundarnom fazom tečenja. Zonu mikroizvlačenja materijala na strani napredovanja i povratnoj strani MŠ određuje izotermalna reakcija [101]. Izvan ove zone temperatura i deformacija nijesu dovoljne da ostvare transfer omekšanih čestica bez učešća mikrokovanja od hidrostatičkog pritiska koji sabija taj materijal iza trna alata prema korjenu metala zavara. Dominantno učešće u mikrokovanju imaju čelo alata i oplata. Odvođenje toplote nakon mikrokovanja ima postepeni konduktivni oblik prenosa usled čega se javlja naknadno zagrijavanje.

Zbog ovakog procesa spajanja materijala deformacije postaju neravnomjerne pri svakoj testnoj probi zatezanja zavarenog spoja poprečno na pravac zavarivanja, pa se granica tečenja materijala i izduženje ne smatraju mnogo značajnim parametrima za ocjenu kvaliteta zavarenog spoja. Mnogo su bitniji parametri energije udara i udarne žilavosti, a posebno krivih otpornosti na strani napredovanja i na povratnoj strani MŠ u pravcu zavarivanja koje pokazuju da materijal zavarenog spoja često ima bolje osobine od OM. Ovo se može prihvatiti tim prije što se proces odvija na način da se oko trna alata formira početna masa materijala koja se premješta sa jedne na drugu stranu i tako adijabatski zagrijava cijelu zonu zavarivanja. Početno deformisanje materijala i njegovo transverzalno kretanje pomjeranjem prema odredištu ispred trna alata izvlači zaostalu količinu materijala, dok se drugi, mnogo manji dio materijala ispod trna alata sa gornje strane i podložne ploče kao dijela oplata sa donje strane, neprestano izlaže mikrokovanju [102].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Veličina deformacije od mikroizvlačenja i mikrokovanja, kao i stepen predgrijavanja i naknadnog zagrijavanja najviše zavise od brzine prodiranja alata, vremena zadržavanja alata prije početka zavarivanja, broja obrtaja, oblika alata i brzine zavarivanja. Svi ovi parametri su od primarnog uticaja na mikrostrukturu odnosno na mehaničke osobine zavarenog spoja. Dosadašnji rezultati ispitivanja iz domena žilavosti loma i zamora aluminijskih legura, ukazuju da je mašinski obrađen MŠ često boljih zamornih osobina od OM, slika 2.31 [102].



Slika 2.31 Odnos cikličkog napona i broja ciklusa sa različite kvalitete obrade zavarenog spoja [102]

Zaostali naponi u zavarenom spoju mjereni X –zracima ili neutronsom difrakcijom, iako zavisni da načina i pravca mjerenja, mnogo su manji od rezidualnih napona kod zavarenih spojeva dobijenih topljenjem [103]. U zavisnosti od prirode opterećenja u eksploataciji, njihov se intenzitet kreće kod legura faznog sastava Al-Cu-Mg-Mn (EN AW 2xxx) i Al –Zn-Mg-Cu (EN AW 7xxx) i preko 100 MPa. Vjerovanje da su oni manji počiva na odsustvu tečne faze kod ZTM. Oplata koja se koristi za stezanje i pričvršćivanje ploča koje se spajaju ovim postupkom, otpor su širenju i skupljanju komada tokom zavarivanja i hlađenja. To može dodatno povećati koncentraciju napona. Uostalom, istraživanjima se upozorava da su zaostali naponi veći kod rekristalizovanih i djelimično rekristalizovanih zona zavarenog spoja, kao i da je kod longitudinalnog pravca karakter napona zatežući, a kod transverazalnog pravca pritisni [103].

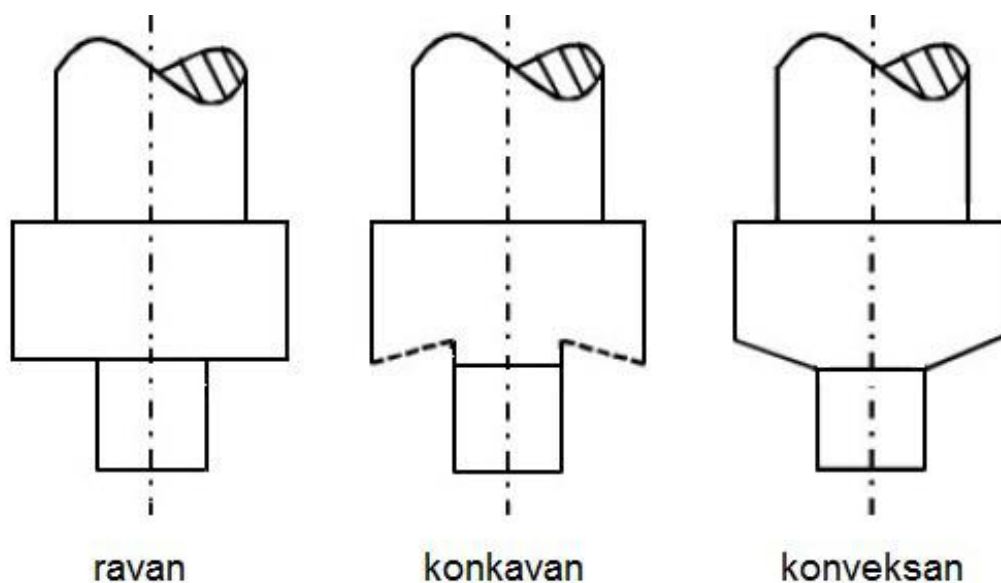
2.3.5 Materijal za izradu i oblici alata

Ishod postupka zavarivanja termički ojačavajućih legura aluminijuma značajno zavisi od pravilnog izbora vrste materijala i konstruisanja alata – moguć je pad tvrdoće alata na povišenim temperaturama tokom dužeg kontakta sa materijalom koji se zavaruje. Problem sa odabirom materijala kod zavarivanja riješen je korišćenjem nisko ili visokolegiranih alatnih čelika za rad u toplom stanju (X 38 Cr MoV5-1 i X 56 Ni Cr Mo V7) za zavarivanje materijala iz klase lakih metala i legura. Za spajanje ugljeničnih i nerđajućih čelika, legura Ni, Ti i drugih materijala, koristi se legure sa osnovom od Re, ali su zbog enormno visoke cijene, najviše zastupljeni alati izrađeni od legura na bazi W ili od PCBN (*polikristalnog kubnog bor nitrida*). Oni obezbjeđuju visoke mehaničke i termičke performanse, otpornost na termički zamor i habanje u nepovoljnim tribološkim uslovima nastalih adhezijom-trenjem dodirnom materijala.

To je istraživače kasnije podstaklo da rješenja geometrije alata traže u redizajniranju osnovnog oblika alata prema vrsti spoja i boljem tečenju materijala za vrijeme mehaničkog miješanja.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

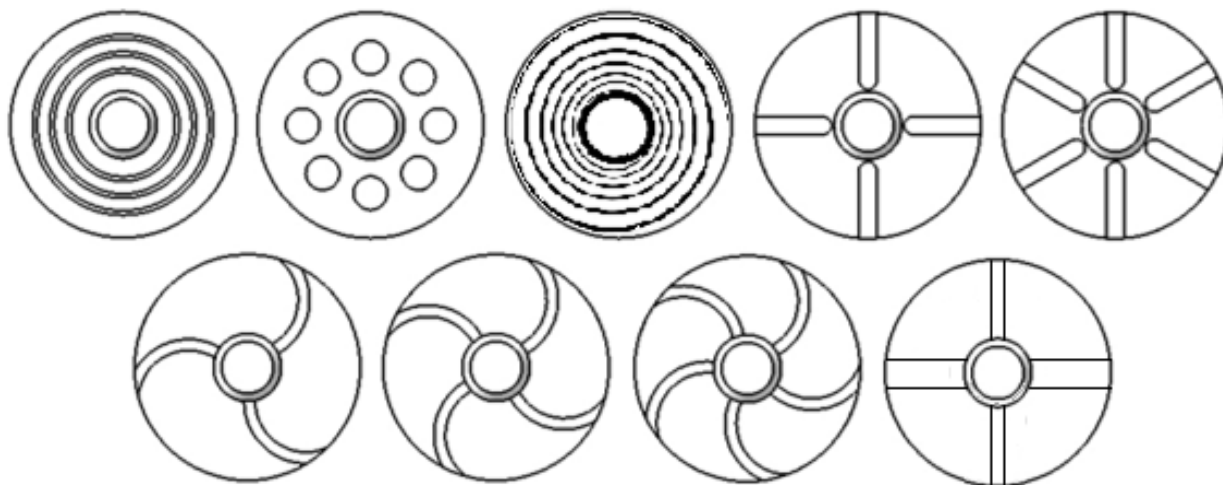
U početku se krenulo promjeni ravne geometrije čela alata prema konkavnoj ili konveksnoj površini, dodatno profilisanoj kako bi se povećao intenzitet trenja kontaktnih površina, slika 2.32.



Slika 2.32 Različiti oblici geometrije čela alata uobičajenih konstrukcija [104]

Ovo je omogućilo da se prihvatljivijim pokaže alat sa profilisanim čelom zbog manjeg prečnika i većim efektom na termičku istoriju procesa.

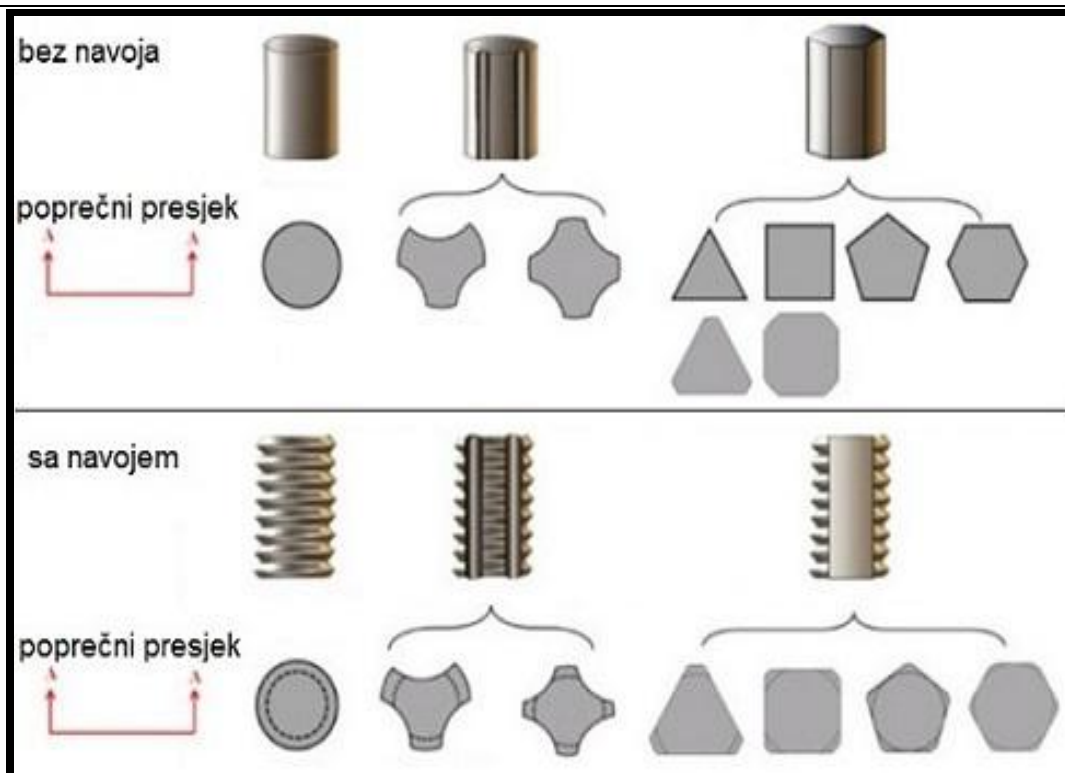
Izgled takvog čela alata je privremeni rezervoar za istisnuti materijal ispod alata čime dodatno pospješuje sekundarnu komponentu tečenja, slika 2.33.



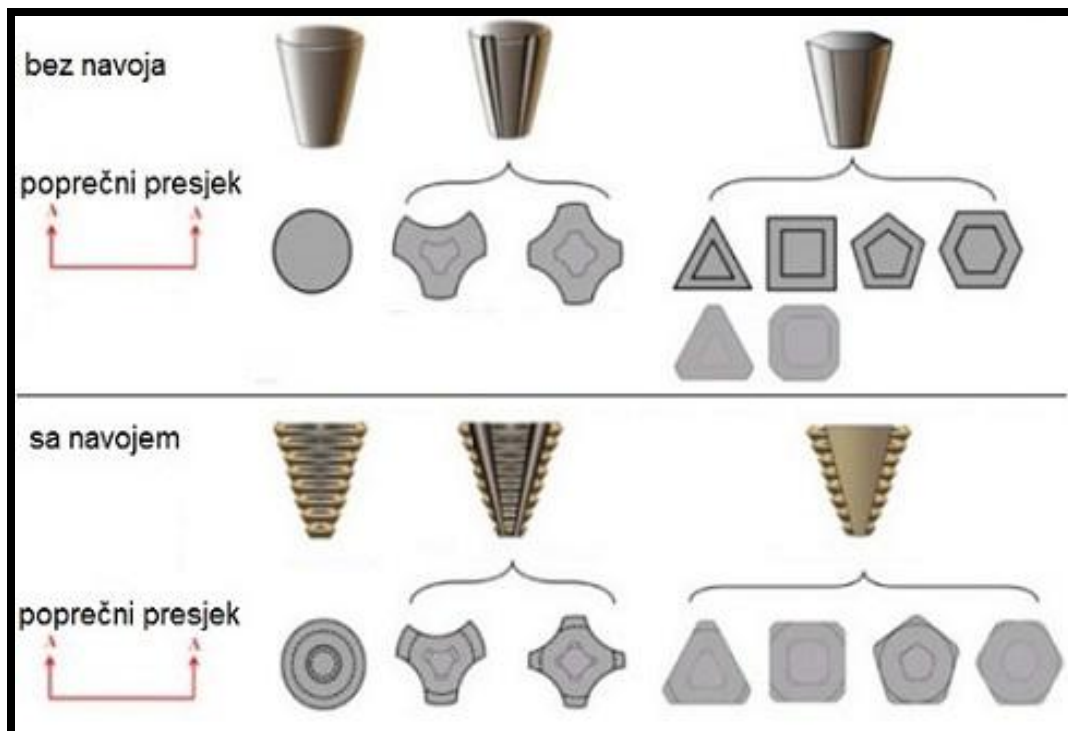
Slika 2.33 Primjeri različitih izgleda gravure čela alata [105]

Uporedo sa evolucijom u izmjenama dizajna čela alata, inovirani su izgled i reljef trna alata. Umjesto početnih cilindričnih trnova alata, slika 2.34, počela je upotreba konusnih trnova sa različitim izgledima boka, slika 2.35.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.34 Prikaz različitih tipova cilindričnog oblika trna alata [106]

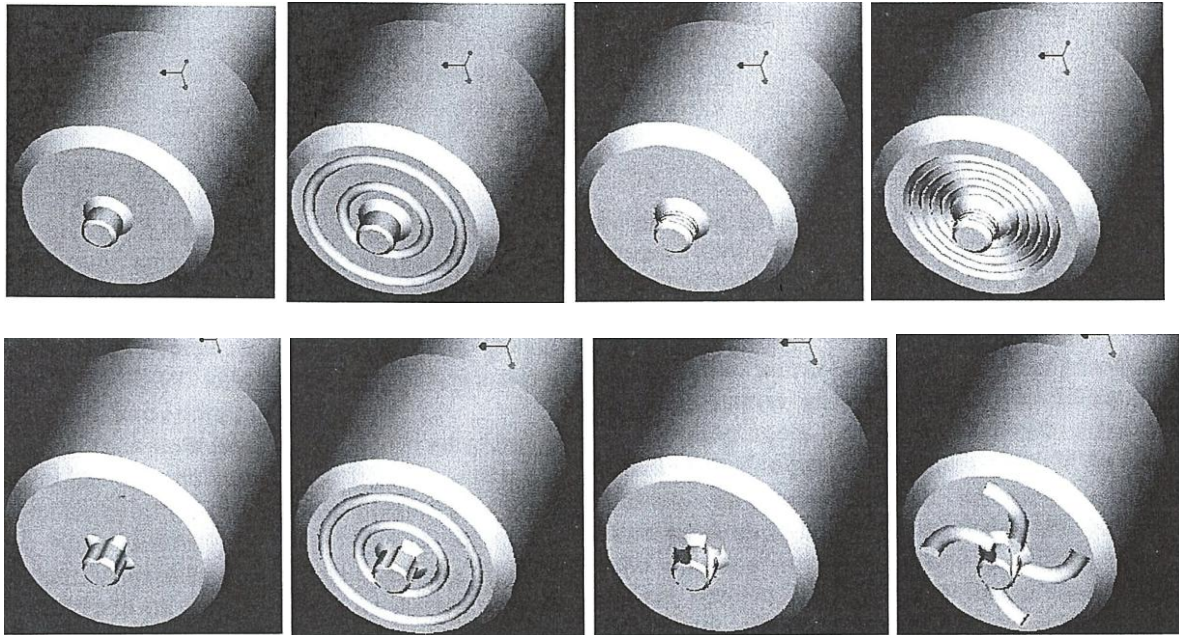


Slika 2.35 Prikaz različitih oblika konusnog oblika trna alata [106]

Svrha svih izmjena alata svodila se na optimizaciju procesa zavarivanja kroz smanjenje sile zavarivanja, brže generisanje potrebne količine toplote preko odnosa zapremina trna i rezervoara na čelu alata, uklanjanje oksidnih slojeva, povećanje brzine zavarivanja, smanjenje širine ZUT kao degradirajuće strukture, mogućnost zavarivanja komada većih debljina i zavarivanja raznorodnih lakih materijala, slika 2.35.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Na slici 2.36 u 3D izgledu su neki od mogućih modaliteta za izradu lakih varijanti izgleda gravure čela i trna alata.



Slika 2.36 Mogući oblici alata za zavarivanje legura lakih metala [107]

Skorijeg datuma stvorene su pretpostavke za modalitetima konstrukcije mašine (hidrauličko stazanje ploča sa donje strane, vakuumsko stezanje radnih komada) i alata (podešavajući trn i dovod zaštitnog gasa u zonu spajanja), naizmjenični smjer kretanja alata („*Re –stir*“ sa mnogim varijantama izvođenja) i položajem alata u odnosu na ravan zavarivanja („*bobin*“ alati), kako bi se izbjegla asimetričnost zavarenog spoja, omogućilo ostvarivanje tačne udaljenosti trna od donjih površina ploča (dubina penetracije alata) i nestanak izlazne rupa na kraju zavarivanja.

2.4 Ciklusi i faze postupka

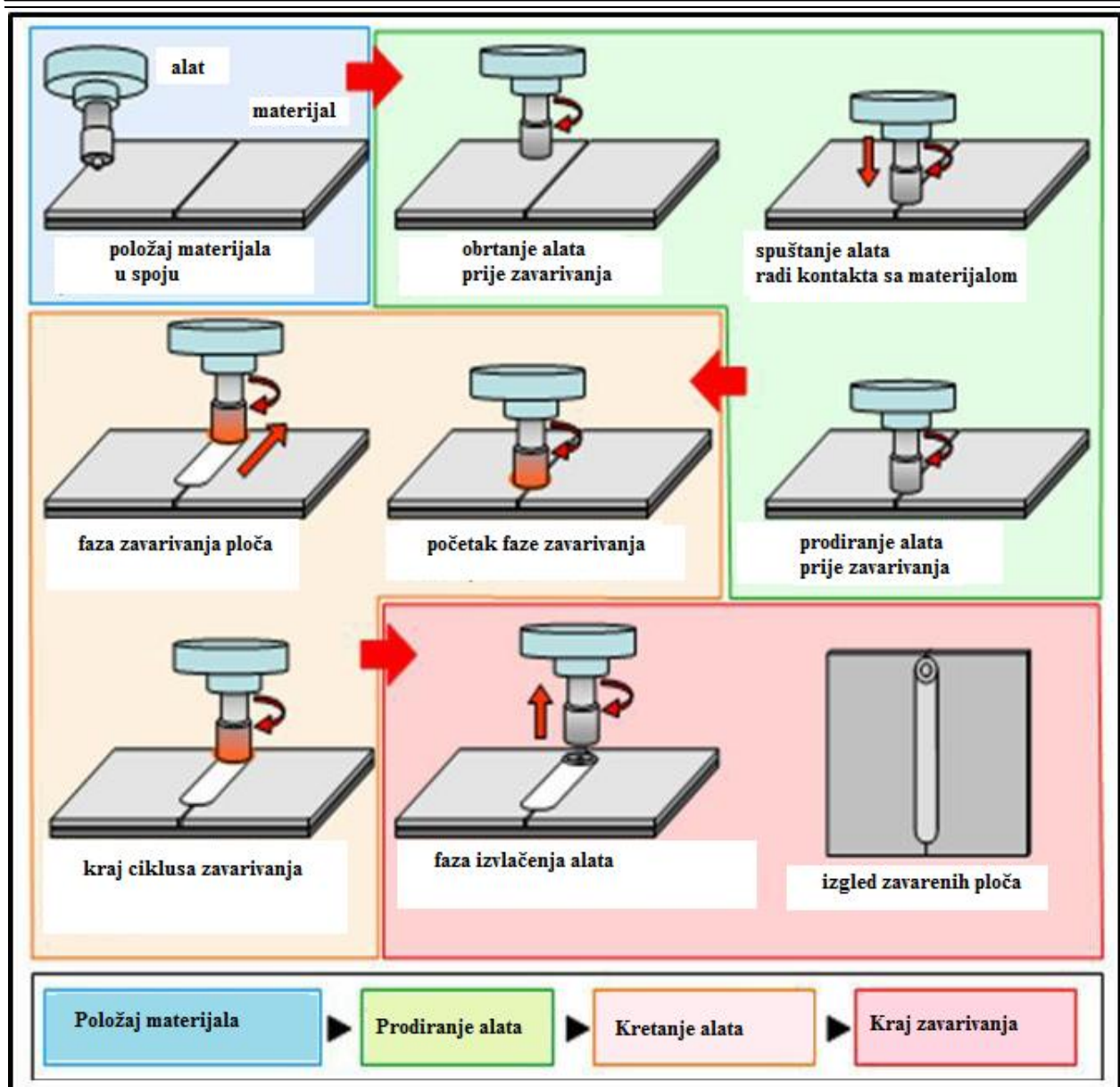
Usavršavanjem procesa ZTM rasle su i dileme u pogledu jasnog razgraničenja ciklusa i faza procesa. U početku se smatralo da se cio proces ZTM može podijeliti na ciklus vertikalnog i horizontalnog kretanja alata.

Ciklus vertikalnog kretanja alata određen je u odnosu na ravan zavarivanja i obuhvatao je dvije faze: fazu prodora alata prije i fazu izlaska alata poslije zavarivanja. Ciklus horizontalnog kretanja alata predstavljao je kraj uranjanja alata, formiranje ulazne rupe na početku dionice i završetak procesa konsolidovanja MŠ iza alata do trenutka napuštanja zavarenog radnog elementa. Kasnija objašnjenja procesa ZTM uvode u razmatranje još dvije međufaze zastoja vertikalnog kretanja alata prije početka zavarivanja i jednu međufazu na kraju procesa zavarivanja.

Prva međufaza zastoja je kada trn alata završi sa prodorom u materijal i još nije otpočeo sa horizontalnim kretanjem u longitudinalnom pravcu, odnosno u pravcu zavarivanja.

Druga međufaza zastoja počinje kada alat čelom završi aksijalno kretanje i treća međufaza kada alat još nije krenuo da napušta zavareni materijal, to jest zonu zavarivanja. Međutim, danas je sasvim izvjesno da se ZTM odvija kroz osam stadijuma: dva ciklusa, tri faze i tri međufaze, slika 2.37.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.37 Shematska ilustracija geometrijsko-kinetičkog odnosa alata i materijala kod ZTM [108]

I ciklus: pozicioniranje alata tokom kojeg se rotacioni alat dovodi u položaj da mu vrh trna dotakne zavarene ploče tačno na liniju spoja,

I faza: prodiranje trna alata sa konstantnom brzinom u Z-pravcu i brzinom obrtanja alata do trenutka dodira čela nosača alata sa gornjom površinom limova, odnosno do prvog zaustavljanja aksijalnog pomjeranja alata naniže. Kao rezultat trenja aktivnih površina trna alata i materijala počinje oslobađanje toplote koja raste sa dubinom penetracije, što je karakteristika nestabilnog trenja,

I međufaza: zadržavanje aksijalnog kretanja alata u trajanju od par destina sekundi tokom kojih alat vrši samo rotaciono kretanje čime se već plastifikovana mala količina materijala dodatno miješa što dovodi do stabilizacije procesa trenja malog intenziteta,

II faza: prodiranje čela alata u materijal do konačne unaprijed određene dubine uranjanja tokom kojeg dolazi do sabijanja one količine omekšanog materijala koja je istisnuta od strane trna alata, kao i do intezivnijeg trenja prstenaste površine čela alata. Ovo ima za posledicu porast generisane toplote koja je najmanja na početku uranjanja, a najveća na njegovom kraju,

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

II međufaza: zadržavanje vertikalnog kretanja alata tokom kojeg je brzina aksijalnog pomjeranja jednaka nuli i koje traje takođe par desetina sekundi. U tom periodu dolazi do naknadne stabilizacije ispod čela alata. U ovoj međufazi materijal se još više plastifikuje zbog povećanog učešća sada znatno veće izmiješane količine materijala u proces kretanja duž trna alata,

II ciklus: zavarivanje koje počinje translatorskim kretanjem alata tokom kojeg dolazi do konstituisanja spoja iza alata u pravcu zavarivanja. Ovaj ciklus karakterističan je po tome što su jedino u njemu načini generisanja toplote različiti u odnosu na faze procesa. Zbog stalnog kontakta sa predgrijanim materijalom na frontalnom dijelu alata u smjeru napredovanja, odnosno trna i čela alata pravcu zavarivanja, najveća količina generisane toplote stvara se upravo na toj površini alata, dok je na drugim funkcionalnim površinama njen intezitet znatno manji. Duž linije kontakta, iza alata koji rotira oko sopstvene ose i translatorsno se kreće, ledna površina alata je u kontaktu sa već omekšanim i zagrijanim materijalom, što dovodi do fenomena samoregulišeg karaktera toplote koja se održava na nivou ne većem od 80% od tačke topljenja “topljivijeg” materijala u spoju,

III međufaza: zadržavanje alata u kojem je translatorska brzina alata jednaka nuli, a rotaciona brzina ima konstantu vrijednost kao na početku prve faze. Ovo zadržavanje je kratkotrajno, ali dovoljno dugo da alatom zavareni materijal sa povratne strane pređe nekoliko puta na stranu napredovanja alata obrćući se oko sopstvene ose,

III faza: izvlačenje alata iz zone zavarivanja, translatorska brzina je jednaka nuli, dok se alat i dalje rotaciono kreće konstantnom ugaonom brzinom uz istovremeno pomjeranje naviše usled čega se udaljava od zavarenog komada,

Analiza ovih međufaza, faza i ciklusa pokazuje da je postizanje adekvatnog pritiska alata u fazi trenja ima veliki značaj na termodeformacione pojave, naročito u *II ciklusu*. Njegovim pravilnim izborom stvara se uslov da se u *II ciklusu* uspostavi ravnoteža između oslobođene toplote i plastičnog deformisanja od alata. Ukoliko je mali intezitet sile zavarivanja ne obezbjeđuje se potrebno zagrijavanje između čelne površine alata i materijala obratka, jer je količina toplote mala u odnosu na toplotu odvedenu u preostali dio osnovnog materijala i podložnu ploču-oplatu. Visoka vrijednost sile zavarivanja, suprotno ovom, dovodi do lokalnog pregrijavanja kontaktnih slojeva komada koji se zavaruju čime se povećava hrapavost lica MŠ što nepovoljno utiče na zamor.

2.5 Geneza nastanka i oblici grešaka u zavarenim spojevima

Iako u mnogim aspektima ZTM pokazuje superiornost u odnosu na bilo koji od postupaka zavarivanja topljenjem, moguće su pojave grešaka u zavarenim spojevima. Zavisno od funkcionalnih potreba izrade određenog elementa nekada se namjerno teži izazivanju greške tipa „tunela“ [109]. One su gotovo po pravilu rezultat mnogobrojnih uzroka, u prvom redu neusklađenosti geometrijskih oblika čela i trna alata, kinematskih parametara procesa sa fizičko-hemijskim osobinama i debljinama zavarivanih komada. U osnovi, sve greške koje se mogu pojaviti svojstvene su samo ovom postupku zavarivanja, ali su neke od njih specifične imajući u vidu genezu nastanka, izgled, uticaj na kvalitet spoja i metodu identifikacije.

Razlikuje se postojanje sledećih vrsta grešaka:

- a) nagomilavanje istisnutog materijala na licu MŠ koje je vidljivo na povratnoj strani, a koje nastaje tako što se višak materijala ispod čela alata od strane napredovanja prenosi prema povratnoj strani i na njoj ostaje,
- b) pojava greške tipa „tunela“, dominantno zapreminskog defekta, nastaje uglavnom kao posledica velike brzine zavarivanja i male vrijednosti sile zavarivanja što uzrokuje nedovoljan protok materijala od povratne prema strani napredovanja. Ovaj tip greške nastaje odmah na početku ciklusa zavarivanja i ne može se eliminisati do njegovog okončanja,

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA


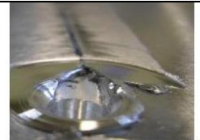
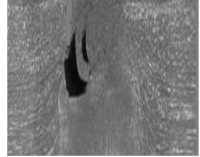
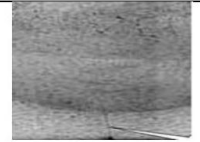


c) nedostatak korjena - „neprovar“ je greška koja nastaje usled nedovoljne krutosti pri spajanju bočnih površina limova u oplati tokom zavarivanja, male dužine trna alata ili nedovoljne dubine prodiranja - penetracije čela alata. Svaki od ovih uzroka utiče na kvalitet difuzionog spajanja u korjenu MŠ,

d) uključci u zoni „grumena“ nastaju kada oksidni depozit sa površina radnih komada mišešanjem dospije u zonu zavarenog spoja što značajno utiče na opadanje mehaničkih osobina,

e) ostali metalni diskontinuiteti obuhvataju pojave mjestimičnog lokalnog deformiteta nastalog od velikog broja obrtaja i male translatorne brzine alata zbog čega se stvaraju naslage materijala na pojedinim dionicama zavarivanja. U donjoj tabeli opisane su greške sa ilustracijama, metode identifikacije i osnovni uzroci njihovog porijekla

Navedena klasifikacija važi kod spajanja potpuno istorodnih lakih materijala. Međutim, kod zavarivanja legura aluminijuma različite čvrstoće i tvrdoće, bolje karakteristike metala zavara dobijaju se kada se slabija i mekša legura postavi na strani napredovanja alata zbog većeg efekta mehaničkog mišešanja i smanjenja uslova za pojavu defekata u spoju. U tabeli 2.2 koja slijedi prikazani su nazivi grešaka, mjesta njihovog nastanka, znaci raspoznavanja, postupci identifikacije i uzroci pojave.

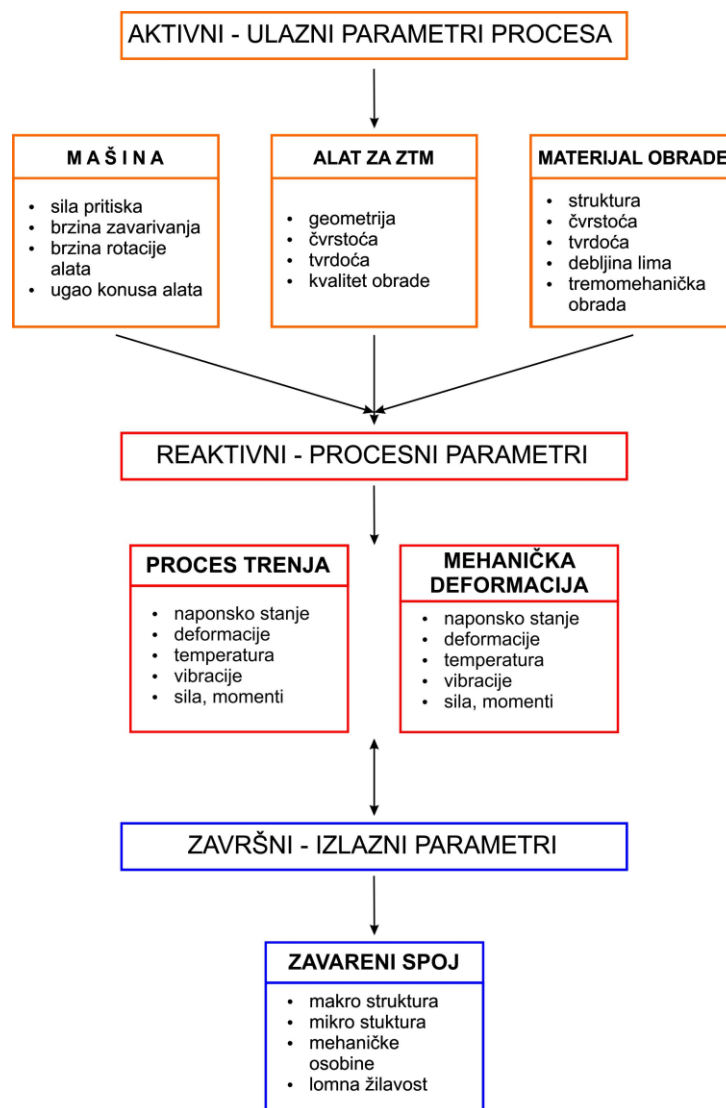
Tabela 2.2 Vrste,lokacija i uzroci pojave grešaka kod zavarenih spojeva

GREŠKE I POSTUPCI IDENTIFIKACIJE GREŠAKA				
Vrsta greške	Loakacija	Znak raspoznavanja	Postupak identifikacije	Uzrok
„bljesak“	lice metala šava -povratna strana		VT,RT	<ul style="list-style-type: none"> •oštre ivice alata •velika sila zavarivanja •duboka penetracija •mala brzina zavarivanja
„tunel tip I“	lice metala šava		VT,PT,makrograf	<ul style="list-style-type: none"> •umanjena sila zavarivanja
„tunel tip II“	ZTMU-„grumen“ sredina		VT,UT,makrograf	<ul style="list-style-type: none"> •veliki zazor u spoju •velika brzina. •zavarivanja •veliki prečnik alata
„neprovaren korjen“	nedostatak korjena „grumen“		PT,savojni test,makrograf	<ul style="list-style-type: none"> •mala dužina trna •niska penetracija čela •smaknuće ivica u korjenu
oksidni depozit	ZTMU		VT,mikrograf	<ul style="list-style-type: none"> •izostanak mehaničkog čišćenja •izostanak hemijskog čišćenja
ostali metalni diskontinuiteti	ZUT,ZTMU		VT,PT,UT,RT	<ul style="list-style-type: none"> •neadekvatna uskladenost procesnih parametara •greške prethodne termičke obrade starenjem

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

2.6 Tehnološki parametri procesa ZTM

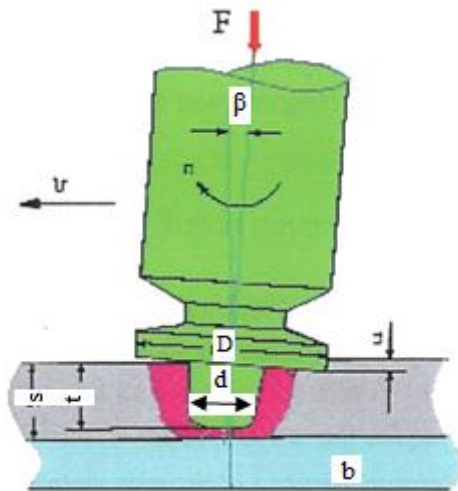
Parametri procesa su od presudnog uticaja na njegovu stabilnost i kvalitet zavarenog spoja. U odnosu na konvencionalno zavarivanje trenjem rotacijom, kod ZTM proces stvaranja toplote vrši se posredstvom alata. ZTM se može upravljati regulacijom procesa preko parametara zavarivanja zadatih od mašine za izvođenje postupka, geometrijskog izgleda i fizičko-hemijskih osobina alata, termofizičkih svojstava materijala obratka, reaktivnih promjenljivih veličina u procesu i kontrolom osobina zavarenog spoja, što je prikazano na slici 2.38.



Slika 2.38 Shematski prikaz uticajnih faktora kod postupka ZTM

U zavisnosti od izbora ovih parametara, njihovih vrijednosti i kvaliteta materijala predmeta obrade utiče se na stepen mehaničke deformacije i intezitet trenja, a time na količinu toplote, unijetu energiju, brzinu i razvoj temperaturnih polja. Uticajni parametri procesa ZTM mogu biti kinematski (brzina zavarivanja, broj obrtaja alata i brzina prodiranja alata u zavarivani materijal), dinamički (prvenstveno sila zavarivanja, momenti trenja i uvijanja alata, odnosno troosne komponente oscilacija alata) i geometrijski (prečnici trna i čela alata, položaj alata u odnosu na pravac zavarivanja, ugao konusa trna, dubina prodiranja trna i čela alata i sl.), slika 2.39.

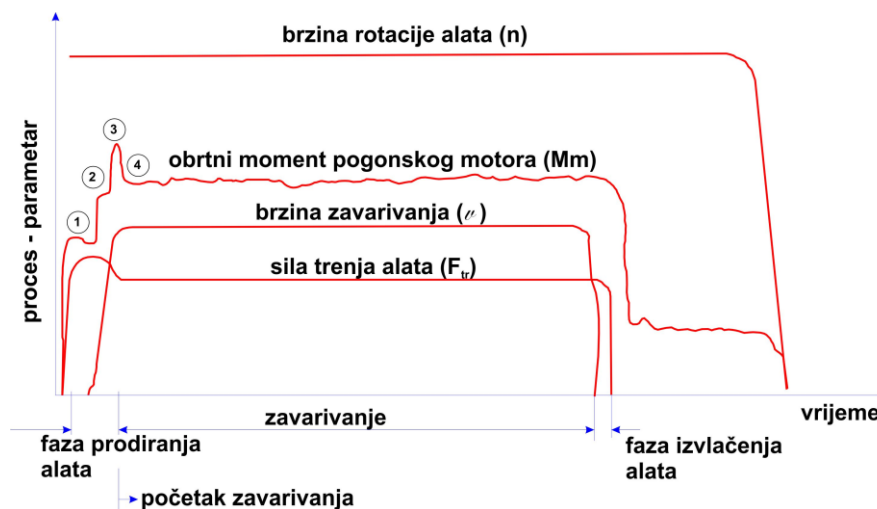
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



- Brzina rotacije alata (n)
- Brzina zavarivanja (v)
- Pritisna sila (F)
- Veličina nagibnog ugla alata (β)
- Prečnik valjka alata (D)
- Dubina utiskivanja čela (u)
- Prečnik trna alata (d)
- Dubina prodiranja (u)
- Materijal i debljina radnog komada (s)
- Materijal alata
- Debljina podložne ploče (b)

Slika 2.39 Uticajni geometrijski i kinematički faktori postupka ZTM [110]

Iako se vrijednosti parametara iskustveno izaberu prije početka ciklusa zavarivanja, one se ne mijenjaju za vrijeme ciklusa zavarivanja, dok se u pojedinim fazama (faza prodiranja trna i čela alata i faza izvlačenja alata) njihova vrijednost može znatno mijenjati, slika 2.40.



Slika 2.40 Odnos između uticajnih parametara ZTM i dužine trajanja pojedinih faza i ciklusa zavarivanja [111]

Vrijednosti promjenljivih parametara, odnosno ulaznih faktora postupka najviše zavise od termofizičkih osobina materijala i debljine limova koje treba zavariti, a njihove optimalne vrijednosti još uvijek se određuju intuitivno ili empirijski. Za kvalitetan zavarenog spoja osnovni tehnološki parametri ne mogu biti birani nezavisno jedan od drugog.

2.6.1 Kinematski parametri procesa

Kinematski parametri od kojih zavisi proces ZTM su broj obrtaja alata, translatorska brzina alata (brzina zavarivanja), brzina prodiranja trna alata i brzina utiskivanja čela odnosno tijela alata u zavarivane komade.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

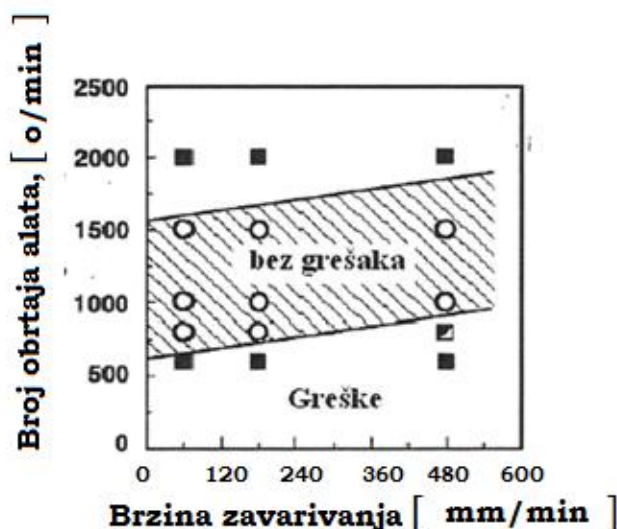
2.6.1.1 Broj obrtaja alata (n_{alata})

Ugaona brzina alata ω ili kako se najčešće izražava preko broja obrtanja alata $n_{alata} \text{ min}^{-1}$, vektorski može biti usmjerena prema smjeru kretanja kazaljki na časovniku ili suprotno od tog smjera. To je u stvari obodna brzina alata i ona najviše zavisi od svojstava materijala. Njeno povećanje rezultira prisustvom veće količine generisane toplotne energije, odnosno većim prisustvom materijala i smanjenom silom zavarivanja, ali i do pada vrijednosti ukupnog momenta zbog povećanja plastičnosti materijala. Tada je raspored tvrdoće poprečno na zonu spoja ujednačeniji, a povećava se i veličina kristalnih zrna [112]. Empirija je pokazala da sa smanjenjem brzine rotacije raste lijepljenje materijala na aktivne površine alata, što utiče na stepen njegove pohabanosti i brzinu trošenja. Zbog toga je od posebne koristi da se vrijednost periferne brzine alata, odredi analogno određivanju ovog kinematskog parametra kod rotacionog zavarivanja trenjem. Efekti rotacione brzine alata najočigledniji su kada se tokom procesa sila zavarivanja F_z i brzine zavarivanja v_{zav} održavaju na konstantnom nivou. Istraživanja veličine zone "grumena" u jezgru MŠ pokazuju da se ona povećava sa povećanjem rotacione brzine-broja obrtaja alata. Najveći broj istraživača, broj obrtaja dovodi u komparitivni odnos sa brzinom zavarivanja u želji da odredi optimalniju vrijednost za koju se dobijaju zavareni spojevi visokog kvaliteta. Tako su *Mishra* i autori utvrdili da između brzine rotacije alata i brzine zavarivanja važi jednačina [113]:

$$\frac{T}{T_m} = K \left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4} \right)^\alpha \dots\dots\dots (2.1)$$

gdje je T - radna temperatura osnovnog materijala °C, T_m - temperatura topljenja osnovnog materijala °C i bezdimenzioni α - eksponent u opsegu od 0,04 do 0,06, a K konstanta vrijednosti od 0,65 do 0,75. U literaturi postoji obilje podataka o vrijednostima broja obrtaja i brzine zavarivanja za koje se dobijaju spojevi bez grešaka.

Na slici 2.41 prikazan je odnos broja obrtaja i brzine zavarivanja na pojavu grešaka kod različitih vrsta aluminijumskih legura koji može poslužiti istraživačima postupka da ostvare spoj bez greške. U praktičnom radu ipak je bolje koristiti već provjerene rezultate za tačno određenu leguru, odabrani tip alata i debljinu osnovnog materijala.



Slika 2.41 Uticaj broja obrtaja alata i brzine zavarivanja na pojavu grešaka [114]

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Najveće dovođenje toplote rezultat je povećanja obodne brzine čela alata. Ukoliko je ona izvan optimalnih okvira, naglo omekšava okolna zona oko alata i dolazi do njegovog istiskivanja izvan prečnika čela alata, a niska vrijednost obodne brzine znatno redukuje zonu miješanja ispod i oko čela alata. Iz odnosa obimne brzine alata i brzine zavarivanja u transverzalnom pravcu moguće je odrediti dvije vrijednosti [115]:

- posmak po obrtaju l_0 mm, i
- obrtaj po posmaku ω_0

koje su od značaja za ocjenu o unosu toplote po jediničnoj dužini zavara.

Od ovih odnosa zavisi izgled lica metala šava koji najčešće podsjeća na izgled djelimičnih godova kod posječenih stabala drveta. Često je za potrebe eksperimenta potrebno odrediti odnos između broja obrtaja alata i brzine zavarivanja i na osnovu dobijenog količnika sačiniti uporedne analize kvaliteta dobijenih spojeva da bi se u daljem postupku mogla obaviti optimizacija njihovih vrijednosti.

2.6.1.2 Brzina zavarivanja (v_{zav})

Brzina zavarivanja je translatorno pomjeranje alata u pravcu zavarivanja, odnosno stezne ploče sa uzorcima - radnog stola mašine za izvođenje ZTM ili kombinacija ova dva kretanja. Ona je jedan od najvažnijih tehnoloških parametara procesa jer direktno utiče na stepen progrijanosti materijala. Ako alat nije dovoljno zagrijan što se dešava kod velike brzine zavarivanja, izvjesna je pojava zapreminskih grešaka tipa nehomogenosti u MŠ. Niže vrijednosti brzine zavarivanja od optimalnih dovode do mjestimičnih lokalnih topljenja lica MŠ, što umanjuje njihov estetski izgled.

Njena brzina određena je mehaničkim karakteristikama materijala i debljinom ploča- limova, odnosno za čvršće i deblje materijale brzina zavarivanja je manja. Primjera radi, brzina zavarivanja za tanke limove od čistog aluminijuma EN AW 1010 kreće se čak i do 2000 mm/min, dok je kod visokočvrstih legura aluminijuma tipa EN AW 2xxx i EN AW 7xxx za istu debljinu skoro i do deset puta manja. Ipak, brzina zavarivanja veoma se često izračunava iz odnosa:

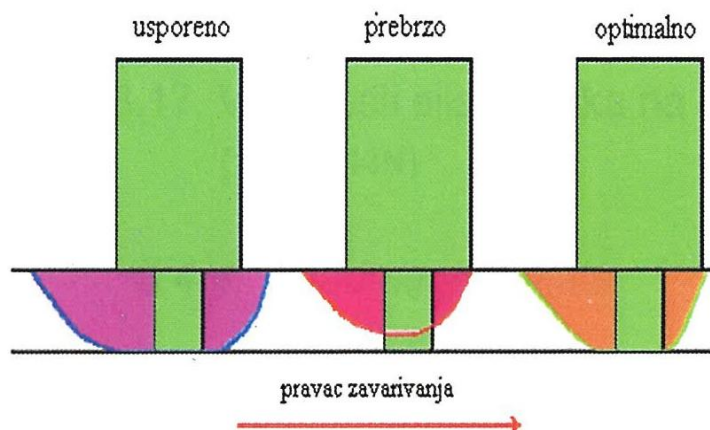
$$\frac{v}{\omega \cdot r} = 0,01 - 0,02 \dots\dots\dots(2.2)$$

gdje su v – translatorna brzina, r - poluprečnik trna alata i ω – ugaona brzina alata [116].

Uticaj ovog kinematskog parametra takođe se najočiglednije vidi kada se sila zavarivanja F_z i ugaona brzina data ω ne mijenjaju za vrijeme trajanja procesa zavarivanja. U tom slučaju, sa povećanjem translatorne brzine alata smanjuje se zona dinamičke rekristalizacije zbog pada specifične energije zavarivanja [117].

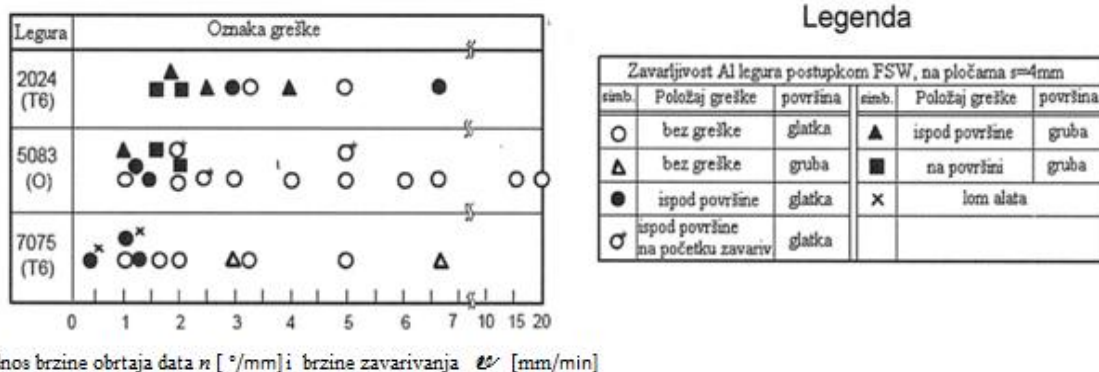
Na slici 2.42 prikazani su slučajevi odraza brzine zavarivanja na oblik formiranja jezgra MŠ.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



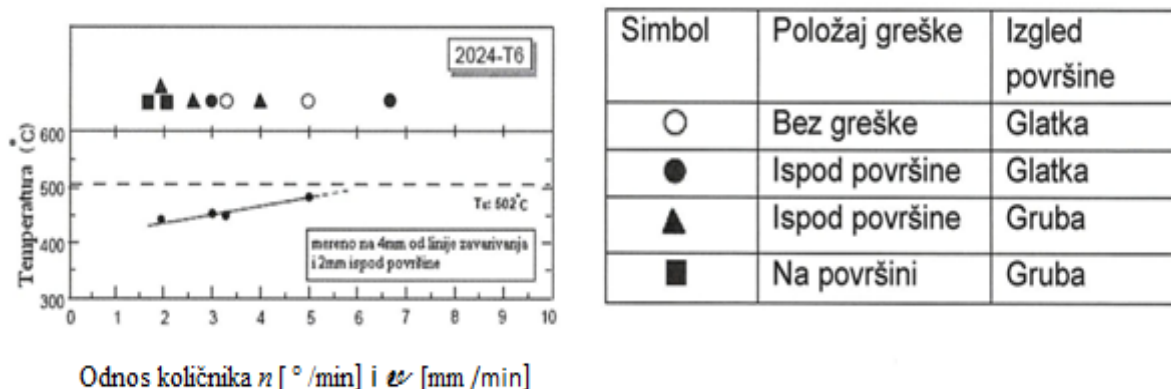
Slika 2.42 Uticaj brzine zavarivanja na prenos materijala oko trna alata [118]

U kasnijim istraživanjima procesa otišlo se korak dalje u domenu optimizacije parametara procesa za legure koje ojačavaju hladnom deformacijom (EN AW 5083) i taložno ojačavajućih legura aluminijuma (EN AW 2024 i EN W 7075), slika 2.43.



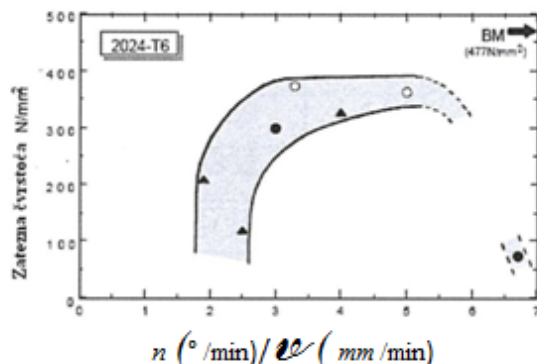
Slika 2.43 Uticaj količnika broja obrtaja alata i brzine zavarivanja na pojavu grešaka kod različitih vrsta legura aluminijuma [119]

Dalja ispitivanja legure Al-Cu-Mg objektivizovala su vještački starenje stanje T6 poslije zavarivanja na nivo optimalnog modela kombinacije broja obrtaja alata n , min^{-1} i brzine zavarivanja v , mm/min prema temperaturi $^{\circ}\text{C}$ i zateznoj čvrstoći N/mm^2 ili MPa , za koje se dobijaju zavareni spojevi bez grešaka, slike 2.44 i 2.45.



Slika 2.44 Uticaj količnika broja obrtaja i translatorne brzine na temperaturu i pojavu grešaka [119]

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Simbol	Položaj greške	Izgled površine
○	Bez greške	Glatka
●	Ispod površine	Glatka
▲	Ispod površine	Gruba

Slika 2.45 Uticaj količnika broja obrtaja i translatorne brzine na čvrstoću i na pojavu grešaka kod legure aluminijuma EN AW 2024 u stanju T6 [119]

2.6.1.3 Brzina prodiranja trna alata (v_{trna})

Uticaj brzine prodiranja trna alata je tehnološki faktor koji se veoma rijetko uzima u razmatranje, iako je od važnog značaja za početni stadijum procesa ZTM. S obzirom da je proces uranjanja trna alata u pripremljene komade za zavarivanje prva faza procesa, njegova brzina ima uticaj na početno oslobađanje toplote bez obzira što je aktivna površina trna mnogo manja od radne površine čela alata. U tu fazu procesa treba uključiti i vrijeme zadržavanja trna alata u kontaktu sa OM. Velika brzina prodiranja trna i kratko zadržavanje u kontaktu sa osnovnim materijalom, prije nego što čelo dotakne gornju površinu radnih elemenata, utiče na nedovoljno plastifikovanje oko trna alata, odnosno mali intenzitet početnog miješanja koji je ključan za stabilnost samog početka procesa. S druge strane, mala brzina prodiranja i veliko vrijeme zadržavanja prije nego čelo ostvari kontakt sa radnim komadima, stvara uslove za lokalni porast toplote samog trna čime se narušava geometrija vrha trna. Ona se najčešće kod taložno ojačavajućih legura aluminijuma kreće od 0,01mm/s do 0,02 mm/s zavisno od geometrije trna [120].

2.6.1.4. Brzina utiskivanja čela alata ($v_{čela}$)

Brzina utiskivanja čela alata u gornju površinu radnih elemenata takođe se rijetko uzima u obzir pri analizama parametara ZTM. Ona nastaje onog trenutka kada se završi faza prvog zadržavanja, odnosno kada se okonča vrijeme predviđeno za trajanje početnog zagrijavanja prostora oko ulazne rupe na obratku. Njena vrijednost određuje se empirijski srazmjerno brzini prodiranja trna alata i zavisi takođe od oblika trna i gravure čela alata. Mala vrijednost ovog parametra negativno utiče na raspodjelu temperature ispod čela alata i može da ima za posledicu veliku akumulaciju toplote na relativno malom prostoru. Povećana brzina utiskivanja se nepovoljno odražava na stepen predgrijavanja materijala zahvaćenog aktivnom površinom čela alata, što u uslovima kratkog trajanja vremena drugog zadržavanja, rezultira nedovoljnom omekšanošću zone zavarivanja na početnoj dionici. Njena vrijednost zavisi od mehaničkih, fizičko-hemijskih osobina materijala i dubine penetracije čela alata, obično 0,020 mm/s - 0,030 mm/s kod termički obradivih aluminijumskih legura. Ako je manja dubina penetracije i mekši osnovni materijal, njena vrijednost se u tom slučaju povećava [120].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

2.6.2 Geometrijski parametri postupka

S obzirom da se kod realizacije ZTM ne vrši priprema stranica žljeba za zavarivanje, geometrijski parametri procesa odnose se na izgled alata, odnosno njegov oblik, dizajn i položaj tokom procesa. Kada je riječ o tim parametrima, onda najveću pažnju treba posvetiti obliku trna, dizajnu čela alata, prečnicima trna i čela alata, uglu konusa i visini trna alata, uglu nagiba alata u odnosu na vertikalnu osu i dubinu utiskivanja čela alata.

2.6.2.1 Dizajn čela i trna alata

Dizajn trna i čela alata ključni je faktor u kreiranju ostalih parametara procesa. Oni se dizajniraju tako da omoguće što nižu silu zavarivanja, manju dubinu penetracije, optimalnu brzinu rotacije alata i brzinu zavarivanja. Osnovni oblik alata konstruisan je na način da je prečnik čela oko tri puta veći od prečnika trna na mjestu prelaza u nosač-valjak alata, visina trna je najčešće za nekoliko desetina milimetara manja (0,3 - 0,6 mm) od debljine limova koji se spajaju, dok je prečnik stabla trna na izlasku iz čela alata jednak debljini materijala zavarivanih ploča. Trn alata je kod standardne konstrukcije uglavnom cilindričnog ili konusnog oblika, dok se dalje modifikacije uglavnom vezuju za nosioca patenta [121].

2.6.2.2 Ugao konusa trna alata(α)

Ugao konusa trna alata je parametar od kojeg najviše zavisi silazni pritisak kod sekundarnog tečenja materijala. Mali ugao ne obezbjeđuje uslove za adekvatan protok prema donjoj i gornjoj površini lima, dok veliki ugao konusa produkuje zadržavanje plastificiranog materijala u relativno malom prostoru čime je onemogućeno kretanje mase sa vrha prema dnu alata. Kod alata sa cilindričnim trnom ovaj ugao je 0° , dok se kod konusnog oblika trna njegova vrijednost kreće i do 20° . Težnja je da trn bude dizajniran tako da gura materijal prema korjenu MŠ pospješujući vertikalnu komponentu tečenja materijala pri čemu su od uticaja pored ugla konusa, radijus vrha trna alata, radijusi prelaska trna na čelo alata i reljef površine trna. Svaka od ovih geometrijskih karakteristika učestvuje u obrazovanju aktivnih površina i ukoliko su one veće, utoliko je raspodjela toplote ravnomjernija, a miješanje materijala ujednačenije u obje faze njegovog toka.

2.6.2.3 Dužina trna alata(h)

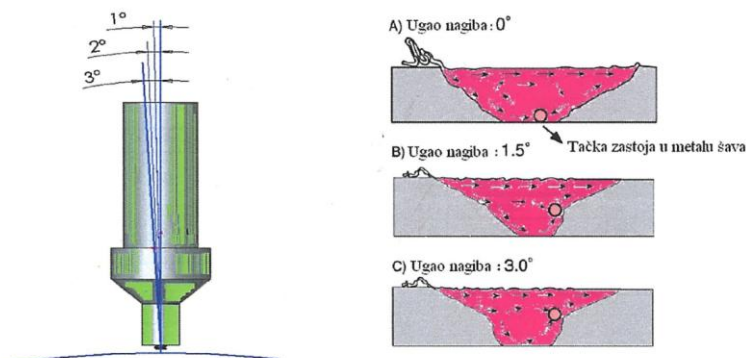
Dužina trna alata je presudan faktor za formiranje korjena MŠ. Zajedno sa dubinom penetracije čini kritičan parametar od kojeg zavisi stepen „provarenosti“ korjene strane MŠ, a time i kvalitet zavarenog spoja. Nedovoljna visina trna alata uzrokuje pojavu „neprovarenosti“ - nedostatka korjena kao posledicu odsustva dovoljno visoke temperature koja omekšava materijal ispod vrha trna alata i stvara uslove za mikrokovanje. Vizuelno uočljiv ostatak linije spoja poslije zavarivanja dokaz je da treba korigovati visinu trna do mjere koja neće spriječiti prolazak omekšanog materijala ispod njegovog vrha. U slučaju prevelike dužine trna dolazi do zastoja u transferu oko trna, zadiranja vrha trna u oplatu – podložnu ploču ili čak njegovog loma. Iz tog razloga preporučuje se da se uzme u obzir ugao nagiba alata kako bi između njegove „pete“ zajedno sa dužinom trna alata i debljine ploča bilo rastojanje od min. 0,3 mm do max. 0,8 mm.

2.6.2.4 Ugao nagiba alata (β)

Ugao kojim alat pritiska zavarene komade suprotno od smjera zavarivanja utičući na pravac i tok kretanja materijala na dnu i vrhu zone zavarivanja je ugao nagiba alata. Njegova vrijednost obično se kreće od 1° do 3° . To je zapravo tačka zastoja, odnosno presječna tačka tangenti primarnog i sekundarnog tečenja materijala. Odgovarajući nagib alata prema zadnjoj strani od smjera kretanja omogućava povećan intenzitet sile kovanja na zadnjoj ivici alata prema korjenu,

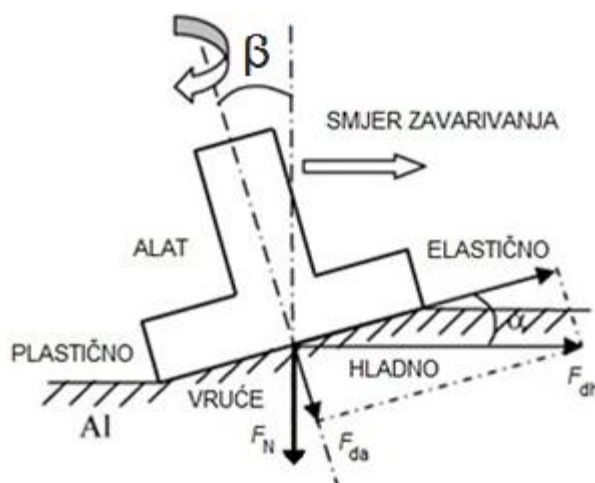
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

dok trn zadrži omekšani materijal kao i da stvori prostor efikasnom pomjeranju materijala od prednje prema zadnjoj strani alata. Na slici 2.46 prikazan je uticaj ugla nagiba alata u odnosu na vertikalnu ravan i reperkusiju na stagnaciju kretanja materijala.



Slika 2.46 Položaj ugla nagiba alata i uticaj na tok kretanja materijala [121]

To je strana MŠ na kojoj je materijal, najčešće legura aluminijuma obično u više navrata deformisan što doprinosi usitnjenju mikrostrukture. U opštem slučaju, izmjene strukturne građe MŠ utiču na izmjene njegovih mehaničkih svojstava prema OM. To je vidljivo i kod odnosa ugla nagiba alata prema ravni zavarivanja kod promjene tipa deformacije i uticaja toplotnog gradijenta na intenzitet superplastične (fine) deformacije u regionu između lica i korjena MŠ, slika 2.47.



Slika 2.47 Odnos zona deformacija pri uglu nagiba alata tokom ciklusa zavarivanja [122]

Rezultati istraživanja pokazali su da povećanje ugla nagiba i lokacija stagnacije podstiču gornje kretanje materijala, dovode do ravnomjernog protoka zagrijanog i plastičnog materijala, smanjuje horizontalnu silu jer bočna površina čeonog dijela alata ne zadire u materijal prilikom kretanja naprijed i znatno smanjuje neravnine po površini radnih komada [122]. Veličina ugla zapravo utiče na tačku pregrijanosti gdje se odvija nesimetrično omekšavanje. Drugim riječima to znači da se u zavisnosti od veličine ugla određuje tačka spajanja obje vrste kretanja materijala, to jest da se njegovim povećanjem ova tačka podiže prema gore - naviše.

2.6.2.5 Dubina utiskivanja čela alata (u)

Dubina utiskivanja ili uranjanja čela alata – penetracija alata je tehnološki parametar koji se definiše kao udaljenost najviše tačke na čelu alata od gornje površine zavarivanih radnih komada, posredno utičući na formiranje korjena u metalu zavara. Ukoliko se ovaj parametar

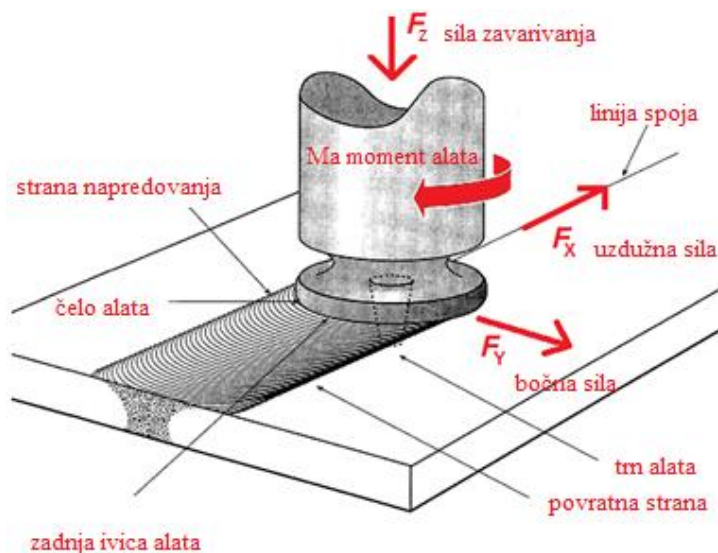
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

nalazi izvan optimalnih vrijednosti, nastaju površinske praznine ili se stvaraju izdužene šupljine najčešće u obliku jedne formirane šupljine unutar metala šava - „tunnel“ efekat koji se ne može eliminisati do kraja zavarivanja. Povećana dubina uranjanja dovodi do porasta dinamičkih komponenata procesa, naročito sile zavarivanja F_z , bočne sile F_x i ukupnog momenta M_{uk} u kome dominira moment torzije M_t . Ispitivanje podataka za ove vrijednosti pokazuju prepoznatljive trendove koji se povezuju sa procesnim parametrima zavarivanja, a dobijeni podaci na visok nivo reproduktivnosti [123]. Rezultati značajnije variraju u silama i momentu torzije trajanja faze uranjanja i faze zadržavanja, što je i očekivano pri prelazu iz početne faze mehaničkog miješanja na stabilno stanje procesa.

Prateći početak uranjanja čela alata u materijal moguće je definisati pad u vrijednostima sile zavarivanja F_z tokom perioda zadržavanja i to može biti kalibrisano da bi se omogućio automatski start translatorne brzine alata odnosno početak zavarivanja [123]. Uzimajući u obzir bočnu silu F_x moguće je da vrijeme zadržavanja bude toliko dugo da spriječi skok iznad vrijednosti stabilnog stanja. To može biti dodatni kriterijum da se zaštiti alat od uticaja sila velikog inteziteta i eventualnog loma. U tom smislu već postaje komercijalni sistem koji koriste kontrolu sila za održavanje idealne dubine penetracije čela alata, ali i uređaji za nadzor sile F_x za koju je utvrđeno da konstantno generisanje njene visoke vrijednosti tokom procesa znači prisustvo šupljina u strukturi materijala [124].

2.6.3 Dinamičke komponente procesa ZTM

Dinamičke komponente procesa ZTM određuju se najčešće eksperimentalnim putem. Posebnu pažnju privlače sile i oscilacije alata kao i momenti koji se javljaju kao rezultat interaktivnog odnosa alat - zavareni komad. Od sila koje djeluju na alat u različitim fazama procesa i ciklusu zavarivanja prepoznaju se sila zavarivanja odnosno aksijalna sila, uzdužna ili longitudinalna i bočna odnosno transverzalna sila. Na slici 2.48 shematski je prikazan položaj sila i pravac djelovanja momenta alata tokom zavarivanja [124].



Slika 2.48 Identifikacija sila i momenta alata kod ZTM [124]

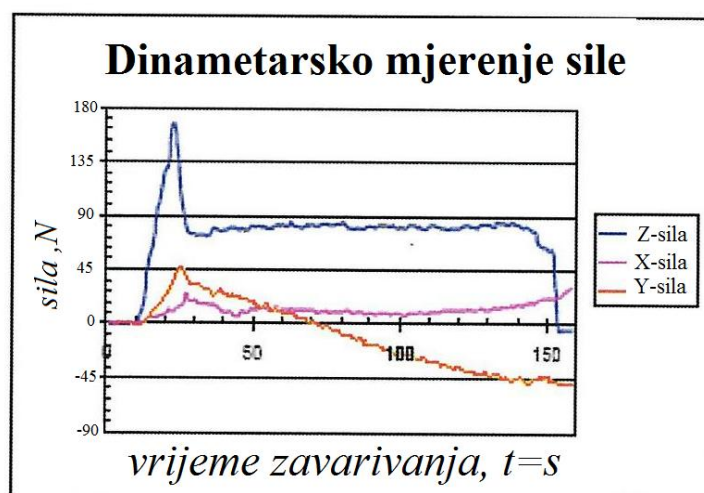
2.6.3.1 Sila zavarivanja (F_z)

Sila zavarivanja - vertikalna pritiska sila F_z (*Down force*) je sila djelovanja alata u Z - pravcu tokom odvijanja svih faza i ciklusa procesa ZTM. Za razliku od aksijalne sile kod postupka konvencionalnog rotacionog zavarivanja trenjem koja zavisi od površine komada u spoju,

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

intenzitet ove sile kod ZTM je znatno niži zbog načina generisanja toplote i nije u funkciji od površine frikcionih oblasti. Ona je zapravo sila kojom alat djeluje na gornju površinu ploča, odnosno otpor ulasku trna i čela alata u materijal [125]. To je reaktivna dinamička kategorija. Zbog toga ona prvenstveno zavisi od vrste materijala, njegovog svojstva, oblika i geometrije alata za zavarivanje. Visokim intenzitetom aksijalne sile alata dolazi do brzog porasta temperature, istiskivanja materijala ispod čeonu površine alata i habanja vrha trna alata, dok nedovoljna sila pritiska stvara uslove za pojavu grešaka na licu metala šava i njegovoj unutrašnjosti. Vrijednost ove sile skokovito se penje, najveća je na početku procesa, tokom prodiranja prvo trna a potom čela alata u materijal. U trenucima prvog zadržavanja alata, ona je konstantna ili blago opadajuća da bi u fazi nastavka prodiranja odnosno utiskivanja čela alata ponovo počela da raste do maksimalne vrijednosti tokom procesa. Nakon drugog zadržavanja, u kojoj se količina omekšanog materijala ispod čela alata znatno smanji, njena vrijednost naglo opada i ostaje konstantna ili bez bitnijih promjena manjeg intenziteta do kraja procesa.

U posljednjem stadijumu – fazi izvlačenja alata, njena vrijednost jednaka je nuli, slika 2.49. Mjerenjem zone „grumena“ u poprečnom presjeku pokazano je da sa povećanjem sile zavarivanja F_z dolazi do povećanja ovog strukturnog sadržaja zavarenog spoja, što je posledica povećanja specifične energije zavarivanja [126]. Poželjno je da njena vrijednost bude što manja, a najbolje je da se optimizuje u skladu sa ostalim parametrima postupka.



Slika 2.49 Zavisnost intenziteta sile i vremena tokom odvijanja faza i ciklusa zavarivanja [126]

2.6.3.2 Uzdužna – longitudinalna sila (F_x)

Uzdužna ili longitudinalna sila F_x (*Traversing force*) je reaktivna horizontalna komponenta. To je sila koja zapravo djeluje u pravcu zavarivanja sa pozitivnim smjerom orjentisanim ka smjeru kretanja alata - otpor koji materijal pruža kretanju alata. Iz tih razloga, F_x u fazi prodiranja alata, u početnom stadijumu utiskivanja alata u materijal, ima nultu vrijednost. Intenzitet ove sile zavisi od priraštaja temperature, tako da je njena maksimalna vrijednost na početku ciklusa zavarivanja kada dostiže vrijednost ne više od 10% od intenziteta sile zavarivanja F_z . U nastavku procesa u kojem dolazi do predgrijavanja usled porasta temperature u zoni kretanja alata, njena vrijednost se smanjuje i ne bilježi značajnije promjene do kraja procesa zavarivanja [126].

2.6.3.3. Poprečna- transverzalna sila (F_y)

Sila normalna na pravac zavarivanja u horizontalnoj ravni, odnosno na pravac kretanja alata je poprečna (bočna) ili transverzalna sila F_y (*Side force*). Vrijednost ove reaktivne sile je takođe

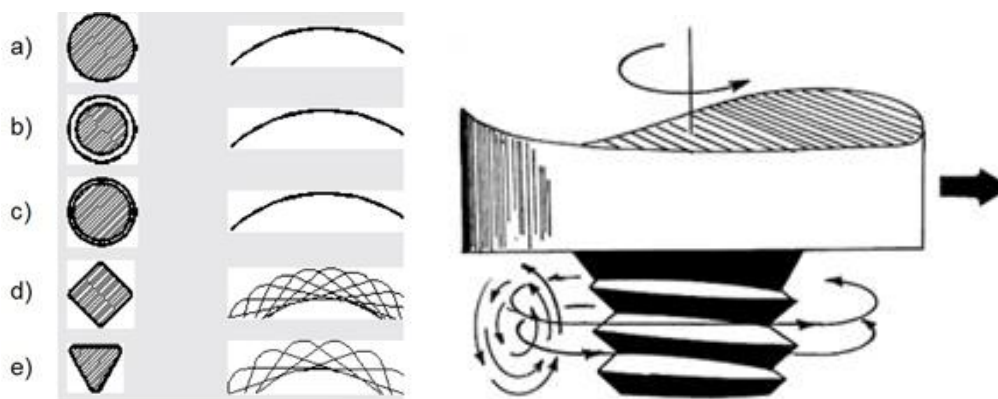
2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

znatno manja od sile zavarivanja F_z . Utvrđeno je da sila F_y ne ostaje konstantna pri nepromijenjenoj brzini obrtanja alata, dok se naznatno povećava sa povećanjem brzine zavarivanja [127]. Interesantno je da značajan porast sile F_y istovremeno znači i prisustvo nehomogenosti-defekata unutar zone zavarenog spoja, što implicira da je početna ideja za monitoringom stanja reaktivnih parametara procesa u potpunosti opravdana. Zbog ovakvih i sličnih pojava u posljednje vrijeme osvojeni su sistemi za i kontrolu dinamičkog stanja tokom procesa ZTM [127].

2.6.3.4 Troosne komponente ubrzanja alata (a_x, a_y, a_z)

Obrtanje alata kod ZTM u realnom kretanju nije istovjetno krugu koji opiše tačka po obodu alata kod kretanja tačke po kružnici. Ovo iz prostog razloga što uležištenje i raspored masa glavnog vretena u kome je alat nikada ne mogu biti idealni (efekat *run-out* alatke). Alat se obrće po dinamičkoj krivoj koju generiše uticaj nenjutnovskog fluida kakav je omekšani materijal oko trna alata. Hidromehaničko kretanje materijala u tjestastom stanju je djelimično ekscentrično, odnosno u stalnom kretanju od prednje prema zadnjoj ivici alata i u povratnom smjeru od zadnje ka prednjoj ivici alata. Zbog toga se i javljaju oscilacije alata koje se najčešće iskazuju trima komponentama brzina alata v_x, v_y i v_z i trima komponentama ubrzanja alata a_x, a_y i a_z u međusobno upravnim pravcima (pravcu Z –ose od primarne komponente tečenja materijala, Y-ose u bočnom pravcu i X-ose u pravcu zavarivanja od sekundarnih komponenti tečenja materijala).

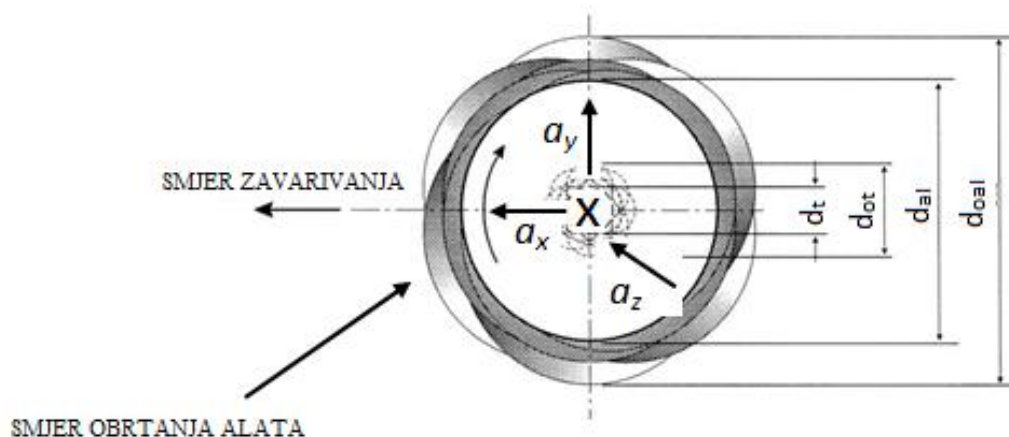
Na slici 2.50 shematski je prikazan uticaj različitog oblika poprečnog presjeka trna alata na oblik dinamičke krive u zavisnosti od odnosa komponenata tečenja materijala.



Slika 2.50 Dinamičke krive različitih poprečnih presjeka trna alata [128]

Na slici 2.51 shematski je dat poprečni presjek alata sa položajem pravca i smjera komponenata ubrzanja u tri ravni. Sa slike je očegledno da se smjerovi ubrzanja alata poklapaju sa smjerom zavarivanja i rotacijom alata oko sopstvene ose. Ovo je veoma bitno za eksperimentalno sagledavanje međusobnog odnosa komponenata ubrzanja alata tokom trajanja pojedinih faza procesa i ciklusa zavarivanja, pogotovo spram intenziteta dinamičke komponente sile zavarivanja. Svaki od pomenutih pojedinačnih indikatora reaktivnog dinamičkog odziva alata sam za sebe ne znači mnogo, ali njihovo stavljanje u zajednički kontekst svojevrsan je pleoaje za eksperimentalnu i numeričku analizu procesa zavarivanja sa aspekta optimizacije alata.

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA



Slika 2.51 Pravci i smjerovi komponenta ubrzanja alata [128]

2.6.3.5 Moment obtanja alata (Ma)

Za određivanje vrijednosti momenta obrtanja alata Ma tokom ZTM, najčešće se koristi rotacioni dinamometar sa multikanalnim procesorom. Njegova vrijednost zavisi od vrijednosti horizontalne sile koja ukazuje na otpornost bočnih kretanja alata i koja se mjeri u cjelokupnu opsegu od 360° . Intenzitet momenta obrtanja zavisi od tipa i vrste legura i rijetko kada prelazi 50 Nm [129]. Najveći je na početku procesa kada se povećava dubina uranjanja alata, nakon čega dolazi do stabilizacije stanja, kada zbog faza zadržavanja, nema otpora linearnom kretanju i generisanoj horizontalnoj sili [129]. Na moment rotacije, za slučaj nepromijenjene brzine obrtanja alata, veći efekat ima prečnik čela alata nego poluprečnik trna. Sa povećanjem prečnika čela alata raste momenat torzije. Dobijeni podaci pokazuju dobar nivo reproduktivnosti rezultata za većinu aluminijumskih legura serije 2xxx, 5xxx i 7xxx, kao i da se legure serije 6xxx mogu znatno produktivnije zavariti od ostalih legura iste debljine limova, što se objašnjava sličnošću dijela postupka ZTM sa izvlačenjem-ekstruzijom [130]. Prisutne varijacije u vrijednostima bočne sile i momenta trenja tokom faza prodiranja i zadržavanja potpuno je očekivano jer se radi o ciklusima miješanja tek deformisanog materijala i stabilizaciji omekšanih čestica materijala radnih komada.

2.6.3.6 Moment trenja (Mtr)

Razvoj procesa trenja rezultuje pojavom momenta trenja Mtr u ravni zavarivanja na kontaktnim površinama tribomehaničkog sistema alat - predmet obrade. Sam proces uopšteno se može podijeliti na sledeće intervale: I-interval inicijalnog kontakta, II-interval početne stabilizacije trenja, III-interval potpunog kontakta, IV-interval stabilnog trenja, V- interval kvazirotacionog trenja i VI-interval prestanka trenja [131].

Interval inicijalnog trenja karakterističan je za fazu prodiranja trna alata u vertikalnom (Z – pravcu) u smjeru naniže. On traje od trenutka dodira vrha trna alata sa gornjom površinom komada pa do početka prvog zadržavanja kada momenat trenja ima minimalnu vrijednost. U ovom stadijumu procesa trenja dolazi do intenzivnijeg habanja male površine trna kroz kombinovano rotaciono-aksijalno kretanje alata tokom kojeg se javlja mehaničko rezanje materijala [132]. Vrijednost početnog momenta se smanjuje u stadijumu prvog zadržavanja aksijalnog pomjeranja alata. Zbog prisutne rotacije alata raste temperatura, ali zbog nedovoljnog inteziteta sile pritiska i nedovoljne aktivne površine alata izostaje formiranje spoja. Do potpunog deformisanja mikrohrapavosti i do mjestimičnog dodira apsolutno čistih djelova metala dolazi u fazi prodiranja čela alata kada raste radna površina dodira, količina generisane toplote i temperatura [133]. To uzrokuje postizanje maksimalne vrijednosti momenta trenja Mtr . Usled

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

djelovanja toplote napon tečenja metala opada, a otpor deformisanju se smanjuje. Kratak interval drugog zadržavanja doprinosi omekšavanju okolnog metala oko trna alata i ispod njegove čeone površine, zbog čega se i intenzitet momenta neznatno smanjuje. Porastom temperature povećava se plastičnost materijala i lokalizuje deformisanje na malom prostoru. Sa završetkom perioda drugog zadržavanja počinje ciklus zavarivanja u kome se vrijednost M_{tr} , nakon početnog pada, stabilizuje i održava se uglavnom konstantom do početka intervala trećeg zadržavanja. Za vrijeme trajanja trećeg zadržavanja alata i prestankom translatornog kretanja alata, dodatno se intenzivira proces stabilizacije zbog čega momenat trenja M_{tr} naglo opada i dostiže nultu vrijednost onog trenutka kada alat počne da napušta zonu miješanja na izlaznoj rupi u krajnjoj dionici ciklusa zavarivanja.

Savremeni sistemi za kontrolu, monitoring i upravljanje navedenim procesnim parametrima zavarivanja od kojih su najvažniji ovdje pomenuti, zajedno sa metodama za praćenje akustične emisije, idealni su za eksperimentalnu optimizaciju aktivnih i reaktivnih parametara kojima se utiče na kvalitet zavarenog spoja u cjelosti.

2.7 Dosadašnja istraživanja u predmetnoj oblasti

U dostupnim publikacijama nema podataka o rezultatima ozbiljnih i relevantnih pokušaja zavarivanja ovim postupkom legure aluminijuma za kovanje EN AW 7049A u stanju najveće čvrstoće. Zbog toga je pregled literaturnih izvora o odnosu procesnih parametara ZTM, naponsko-deformacionog stanja i zamornog ponašanja zavarenog mjesta, uglavnom sveden na relativno mali broj referenci iz područja ZTM familije taložno očvršćavajućih aluminijumskih legura iz sistema Al-Zn-Mg-Cu.

Prvi radovi uslijedili su neposredno nakon što je sa ZTM ukinuta oznaka patenta, odnosno odmah pošto je napustio laboratoriju i preselio se u proizvodne hale, doživljavajući nezampanu ekspanziju kakva nije pratila ni jedan od stotina do tog trenutka poznatih postupaka spajanja metalnih materijala.

Početna istraživanja mehaničkih osobina zavarenog spoja formiranog trenjem pomoću alata legura aluminijuma visoke čvrstoće uglavnom su se odnosila na legure koje se koriste u avio industriji [134]. Tako su autori ispitivali efekat ZTM na zatezne karakteristike legura EN AW 2024 T3 i EN AW 7075 T6 na sobnoj temperaturi [135-138]. Epruvete za ispitivanje su isječene u pravcu zavarivanja i normalno na taj pravac. Epruvete iz longitudinalnog pravca sadrže samo potpuno rekristalizovana zrna jezgra MŠ dok epruvete iz transverzalnog pravca posjeduju elemente mikrostrukturnih sadržaja svih zona spoja: OM, ZUT, ZTMU i jezgra MŠ [139,140]. Rezultati su pokazali smanjenje napona tečenja i zatezne čvrstoće u zoni MŠ dok je vrijednost izduženja ostala nepromijenjena. Autori su ovu pojavu objasnili smanjenjem dislokacija i eliminacijom veoma finog taloga. Da bi povratio izgubljenu zateznu čvrstoću u zoni MŠ, Mahoney izvršio tretman starenja uzoraka nakon zavarivanja zagrijavajući ih do temperature 120 °C i na toj temperaturi držeći 24h.

Na ovaj način došlo je do povratka znatnog dijela vrijednosti zatezne čvrstoće MŠ, ali i do pada ovog parametra na uzorku kao zavarenoj cjelini, kao i smanjenog procenta izduženja. Ovo povećanje zatezne čvrstoće nakon vještačkog starenja pripisuje se povećanju zapreminskog učešća finih taloga i razvoju zona bez taloga PFZ (*Precipitate Free Zones*) na granicama zrna [141,142].

Situacija sa statičkim karakteristikama zavarenih komada u transvezalnom pravcu iste legure je značajno drugačija. Dobijeni rezultati pokazali su znatno smanjenje parametara čvrstoće i izduženja MŠ u odnosu na OM. Pored toga, ove vrijednosti mnogo su manje od vrijednosti dobijenih pri longitudinalnom zatezanju epruvete [143-146]. Naknadno starenje zavarenih komada nije uticalo na vraćanje zatezne čvrstoće i izduženja. Epruvete uzorkovane iz transvezalnog pravca u odnosu na dionicu zavarivanja, usled smicanja polomile su se u ZUT,

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

dok je dobijeno izduženje u stvari srednja vrijednost izduženja duž cijele dužine epruvete kroz različite strukturne oblasti [146]. Ovo se tumači različitošću otpora deformaciji zbog razlike u veličini zrna i veličini taloga, kao i drugačijem rasporedu u pojedinim zonama zavarenog spoja. Zona uticaja toplote ima najmanju čvrstoću zbog znatno ogrubljenih čestica taloga i razvoja PFZ. Zbog toga se lom uvijek dešava u ZUT, što je rezultat male čvrstoće i elastičnosti u transvezalnom pravcu MŠ [147, 148].

Sato je takođe ispitivao zatezne osobine u transvezalnom pravcu zavarenog spoja nastalog ZTM [149]. Da bi pokazao uticaj termičkog tretmana poslije zavarivanja na karakteristike šava, izvršio je dvije probe na zavarenom uzorku. Prvi uzorak podvrgao je starenju sa temperaturom od 175°C u vremenu od 12 h, a drugi uzorak je takođe vještački stario uz prethodno gašenje na temperaturi od 530°C u vremenu 1h. Potom je testu statičkog naprezanja podvrgao osnovni materijal, termički neobrađen MŠ, MŠ izložen starenju i MŠ nakon tretmana gašenja i starenja. Ispitivanja i drugih istraživača su pokazala da su zatezna čvrstoća i izduženje najmanji kod termički neobrađenog MŠ, dok je vještački staren MŠ imao malo veću čvrstoću od osnovnog materijala i istovremeno poboljšanu elastičnost. Očigledno je da gašenje i starenje MŠ povećava njegovu čvrstoću i ona postaje veća od čvrstoće OM uz istovremeno vraćanje elastičnosti [150-152].

Kasnija proučavanja usmjerila su se prema određivanju efikasnosti spajanja ZTM. *Biallas* se zanimao kako ZTM utiče na mehaničku karakterizaciju spoja prirodno starene legure EN AW 2xxx u tankim i debljim limovima [153]. On je utvrdio da se pri konstantnom odnosu v -brzine zavarivanja i n -broja obrtaja alata povećavaju naponi tečenja materijala, dok se zatezna čvrstoća MŠ povećava sa povećanjem brzine obrtaja alata n , čime raste i elastičnost. Takve analize bile su osnov za uvođenje pojma efikasnosti spoja kao odnosa između zateznih čvrstoća OM i MŠ. U radovima [154-156] određena je efikasnost različitih legura aluminijuma u limovima različite debljine (Al-Mn1, Al-Mg-Cu, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu) i ona se kreće od 65% do 86% za legure aluminijuma koje se termički obrađuju, do čak 85% - 98% za termički neobrađene aluminijumske legure. Zajednički sadržalac ovih istraživanja jeste da su visoke vrijednosti zatezne čvrstoće i izduženja u zoni jezgra MŠ posledica fine sitnozno strukture. U blizini granične zone odnosno prelazne zone između jezgra MŠ i ZTMU, zatezna čvrstoća ostaje približno ista, dok elastičnost počinje da se smanjuje što se objašnjava činjenicom da je ZTMU sa dominantno deformisanom strukturom. Zanimljivo je da napon na granici tečenja i zatezna čvrstoća počinju da opadaju na udaljenosti od oko 7 mm do 8 mm od centra MŠ, na prelazu između ZTMU i ZUT, a najmanja vrijednost zatezne čvrstoće iznosi oko 60% zatezne čvrstoće osnovnog materijala i registrovana je između 10 mm i 14 mm od centralne linije šava na zadnjoj ravnjajućoj ivici [157-159].

U fundamentalnoj studiji odnosa struktura i svojstva aluminijumskih legura EN AW 7349 i EN AW 7050, obje u stanju vještačkog starenja, autori [160-162] ukazuju da rotaciona brzina alata ima primaran uticaj na mikrostrukturu i svojstva zavarenog spoja obje legure, u odnosu na brzinu zavarivanja i silu u pravcu Z - ose, odnosno silu zavarivanja na radne komade. Oni tvrde da za datu brzinu zavarivanja i silu na Z - osi, postoji optimalna rotaciona brzina alata koja daje dobru kombinaciju zatezne čvrstoće jezgra zavarenog spoja i njegovog izduženja. Isti autori ukazuju da je momenat trenja pri zavarivanju obrnuto proporcionalan veličini zrna, naponu tečenja i zateznoj čvrstoći centralne zone MŠ. Drugi autori [163-166], poboljšanje mehaničkih svojstava ZTM formiranog spoja u leguri EN AW 7075 T73, objašnjavaju malim intenzitetom zaostalih napona koji ne prelaze vrijednosti od 110 MPa, što je za oko 30% manje od zatezne čvrstoće OM. Istraživači [167,168], dokazuju da mali toplotni input kod ZTM najviše utiče na zadržavanje visokih vrijednosti zateznih parametara u svim sadržajima MŠ zavarenog spoja.

U studijama o leguri EN AW 7075 [169,170], rezultati upućuju da jezgro MŠ kao strukturna oblast prolazi kroz proces dinamičke rekristalizacije u cilju stvaranja strukture sa finim zrnima, dok se u ZUT zadržavaju početne dimenzije zrna. Među ovim autorima postoje razlike u pogledu gustine distribucije za leguru EN AW 7075 T451 [169], EN AW 7075 T6 [170], dok je u

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

radovima [171,172] uočljivo da većina zrna u centru zavarenog spoja ima nizak nivo broja dislokacija, a da sasvim malo zrna ima veću gustinu. Ove opservacije potvrđuju da razvoj mikrostrukture i priroda rekristalizacije kod ZTM nijesu dovoljno jasno i utemeljeno pojašnjeni.

Slično je sa pristupom o uticaju termalnog ciklusa na rastvorljivost i očvršćavanje taloga u često upotrebljavanim "avio" legurama kao što su EN AW 7075 i EN AW 7050. Izvjesno je da su očvršćavajući talozi u ovim legurama najveći u ZUT i da je to rezultat termalnih ciklusa, zbog čega je talog u grumenu potpuno ili djelimično rekristalizovan tokom ZTM [173]. *Rodes* i saradnici [174] došli su do zaključaka da pri temperaturama između 400°C i 480°C za leguru EN AW 7075 može biti dovoljno za obradu većih taloga koji se rastvaraju i ponovo obnavljaju tokom procesa hlađenja. Suprotno ovome, *Murr* i drugi autori [175,176] ukazuju da na tim temperaturama nema uslova za rastvaranje taloga tokom ZTM. Prethodni radovi upućuju na kompleksnost varijacija o tretmanu taloga, posebno u ZTMU. Tako se u radovima za leguru EN AW 7050 [177-179] i EN AW 7075 [180-183] dokazuje da na ivicama zrna postoje zone bez taloga što može uticati na pojavu interzrnarnog loma zavarenog spoja. Očigledno je da ni detalji kompleksnog fenomena taloženja nijesu još svestrano obrazloženi.

Veličina zrna drugi je važan aspekt mikrostrukture koji utiče na pojavu prslina, naročito u korozionom okruženju. Ispitivane su varijacije u veličini zrna u različitim slojevima zavarenog spoja legura EN AW 7004 nastale pri promjeni broja obrtaja alata koji se povećavao od 400 min⁻¹ do 1200 min⁻¹ [184].

Interesantno je da su se dimenzije zrna povećavale sve dok broj obrtaja nije dostigao vrijednost od 800 min⁻¹. Iznad ovog broja obrtaja nije registrovano povećanje zrna. Ovo bi trebalo da znači da je veličina zrna u korelaciji sa termalnim ciklusom tokom zavarivanja, zato što dinamički rekristalizovana zrna statički rastu tokom hlađenja [185,186]. U pomenutim literaturnim izvorima nema dokaza o odnosu dinamičke rekristalizacije i temperaturnog profila tokom zavarivanja. Utvrđeno je samo da sa parametrom brzine obrtanja alata raste temperatura u termalnom ciklusu, odnosno potvrđeno je da dimenzije rekristalizovanih zrna u zavarenom spoju eksponencijalno rastu sa povećanjem temperature.

Uticaj taloga veći je od uticaja zrna za profil čvrstoće i mehanička svojstva u legurama EN AW 7075 T651 pokazala su dalja istraživanja. *Sato* i drugi autori [187-189] otkrili su da profil čvrstoće kod taložno ojačavajućih legura zavisi od poznatog uslova smješe OM i raspodjele taloga u spoju. Oni su takođe ustanovili da legure iz serije EN AW 6xxx u stanju T5 omekšavaju samo oko centra jezgra spoja, dok druge legura iz serije vještački starenih pokazuju homogeniji profil čvrstoće. Zabilježeno je takođe da promjena broja obrtaja alata znatnije utiče na širinu omekšalog regiona u zavarenom spoju mekših legura, dok nema velikih promjena u profilu čvrstoće kod ovih legura [190-193]. Starenje nakon zavarivanja, povećava čvrstoću u većem dijelu zavarenog spoja, ali je povećanje čvrstoće malo u zoni miješanja nastaloj sa manjom rotacionom brzinom alata, utvrdili su istraživači [194-196]. Transmisiona elektronska mikroskopija (TEM) otkriva sličnu distribuciju očvršćavajućih taloga u unutrašnjosti granula i prisustvo zone bez taloga u blizini ivica granula u svim zavarenim spojevima kod taložno očvršćavajućih legura [197-201]. Uočeno je da su zone bez taloga glavni razlog za omekšavanje ezgra zavarenog spoja. Treba ipak napomenuti da je rotaciona brzina koju je *Sato* koristio kod eksperimenata prilično velika, kao i to da još nije jasna zavisnost variranja profila čvrstoće u odnosu na rotacionu brzinu alata [202,203].

Uopšteno, ZTM je proces koji ne rezultira značajnijem omekšavanju po cijelom poprečnom presjeku zavarenog spoja u drugom tipu taložno ojačavajućih legura, na primjer EN AW 6xxx koje se podvrgavaju vještakom starenju. Druge studije pokazuju da u faktore koje određuju karakteristike čvrstoće zavarenih spojeva ovih legura mogu se ubrojati gustina dislokacione ćelije i veličina zrna [204-206]. Kada se radi o odnosu mikrostrukturnih atributa zavarenog spoja i njegove otpornosti na zamor, dosadašnji rezultati idu u prilog da su nekoliko mikrostrukturnih

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

faktora poput distribucije taloga, kristalografske orijentacije osnove i veličina zrna ključni za zamorno ponašanje zavarenog spoja [207-211].

U najvećem broju radova sa temama iz ove oblasti jasno je da zatezna svojstva uglavnom zavise od rasporeda taloga u ZTM formiranim spojevima taložno ojačanih legura aluminijuma, dok kod legura aluminijuma koje ne ojačavaju taloženjem zavareni spoj ima homogeniji profil čvrstoće, a lokacija loma zavisi i od kristalografske orijentacije zrna u osnovi [212-214].

Studija o otpornosti na lom duž pravca zavarivanja uvod je za radove *Kroningera* i *Rejnoldsa* [215,216]. Oni pokazuju da je materijal u i oko ZTM nastalog zavarenog spoja čvršći u odnosu na osnovni materijal kao i na metal šava formiran lučnim plazma zavarivanjem. *Sato* i ostali istraživači [217,218] pokazali su da su distance početnog razvoja prsline u ZTM ostvarenom spoju legure Al-Mg-Si uglavnom malo ispod vrijednosti koje su tipične za OM. Ovo ukazuje na manju zateznu čvrstoću u zavarenom spoju nego u OM, ali su te vrijednosti ipak uporedive. Otpornost na razvoj prsline CGR (*Crack Growth Rezistance*) u grumenu zavarenog spoja obično pokazuje dobre rezultate koji su na nivou ili čak i bolji od OM za slučaj manje kompleksnih legura aluminijuma, pri čemu efekti zaostalih napona ne mogu biti zanemareni [219-221]. *Khandkar* i *Kumar* su otkrili da ZTM konsolidovani spojevi u EN AW 7xxx legurama pokazuju osjetljivost na ponašanje prsline pri cikličnoj učestalosti opterećenja od 15Hz u ambijentalnom okruženju, bez obzira na položaj zavarenog spoja i udaljenost pojedinih zona od linije zavarivanja [222,223]. Kod jednog broja istraživača uočen je brži i sporiji rast prsline u odnosu na OM, ali to zavisi od orijentacije prsline i udaljenosti od zavarenog spoja [224-226]. Oni naglašavaju da je ponašanje prsline pod primarnim uticajima zaostalog napona, čak mnogo više nego od mikrostrukturnog razvoja i promjene čvrstoće. *Jata* je u radu [227] takođe je uočio efekat rezidualnog napona na brzinu rasta prsline usled zamora materijala FCGR (*Fatigue Cract Growth Rate*) u leguri EN AW 7050 T7451. On je otkrio da pri cikličnoj učestalosti od 30 Hz i u odnosu napona 0,33, FCGR jezgra je inferiorna, dok se značajno smanjuje pri odnosu napona od 0,70. Analiza zaostalih napona, prsline usled zamora i otpornosti na površinske prsline navodi na smanjenje FCGR otpornosti u jezgru legure EN AW 7050 T451, a to je povezano sa intezrnarnim frakturnim mehanizmom [228-230].

Proširenje inženjerske primjene ZTM uslovalo je povećano interesovanje za mehanizam zamora, uključujući i proučavanje potrebnog broja ciklusa promjene napona do otkaza (S-N) i razvoj prsline iniciranih zamorom FCP (*Fatigue Crack Propagation*) [231,232].

U prethodne dvije i po decenije u tom pravcu izvršena su i ispitivanja na utvrđivanju S-N ponašanja legura aluminijuma u prisustvu ZTM formiranog spoja uglavnom kod legure EN AW 7475 T76 [233-235]. Ove studije otvorile su put daljim istraživanjima zamornog ponašanja zavarenog spoja. Tako se došlo do zaključaka da je čvrstoća na zamor kod ZTM ostvarenog šava za 10^7 ciklusa niža od osnovnog materijala, odnosno ovi šavovi su znatno osjetljiviji na pojavu inicijalnih prsline koji dovode do zamora materijala [236,237]. Osim toga, *Genovois* i ostali istraživači pokazali su da je čvrstoća na zamor iz longitudinalnog pravca znatno veća nego iz transvezalnog pravca [238-240], dok je ovaj parametar kod uzoraka zavarenih ZTM takođe bio veći nego kod uzoraka nastalih postupcima topljenjem [241].

Dalja istraživanja otišla su korak dalje. Određivan je uticaj kvaliteta površine sa korjene strane i sa strane lica šava na zamornu čvrstoću MŠ. *Hori* i saradnici došli su do zaključaka da se čvrstoća na zamor MŠ smanjuje sa povećanjem odnosa v/n zbog nedovoljne i loše zavarenog korjena u MŠ [242]. Kada je nedovoljno zavareni korjen izbrušen, čvrstoća na zamor MŠ ostala je nepromijenjena sa mijenjanjem odnosa v/n . *Bussu* i *Irving* su pronašli da se brušenjem po 0,5 mm debelog sloja sa lica i korjena šava, odnosno da se uklanjanjem tragova alata i nedovoljne provarenosti, povećava njegova čvrstoća na zamor koja je na nivou čvrstoće OM [243,244]. *Kallman*, *Magnuson* i ostali su takođe došli do sličnih rezultata. Brušenjem sloja od 0,1 do 0,15 mm sa gornje strane MŠ znatno je poboljšana otpornost na zamor zbog toga što su površinska hrapavost i prsline na licu šava glavni uzrok zamora a ne defekti unutar samog MŠ [245,246].

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

Hori je, na dalje, došao do zaključka otkrivajući da se kod specifičnog odnosa v/n otpornost na zamor ne mijenja promjenom ugaone brzine alata [247], dok je *Biallas* primijetio da se kod konstantnog odnosa v/n , otpornost na zamor legura EN AW 7xxx debljine 1,6 mm i 4 mm znatno mijenja sa povećanjem brzine obrtaja i transverzalne brzine [248]. Jedan broj autora izučavao je kako povećanje kvaliteta obrade lica šava utiče na broj ciklusa do otkaza usljed zamora. Tako je *Jayaraman* zabilježio da glačanje lica šava LPB (*Low Plasticity Burnishing*) poslije zavarivanja znatno povećava broj ciklusa promjene napona do pojave zamora [249], dok je *Pao* izveo eksperiment koje je pokazao da je otpornost na zamor zavarenog spoja i OM legura povišene čvrstoće u 35% rastvoru NaCl skoro i ne razlikuje, dok je na vazduhu mnogo manja u MŠ nego u OM [250]. Očigledno je na osnovu izloženog da je mehanizam uticaja parametara procesa ZTM na otpornost prema lomu veoma složen i različit, a do sada ne postoji utvrđen nivo zavisnosti uticaja faktora postupka na stepen osjetljivosti metala šava na zamor.

2.8 Polazne hipoteze rada

Tradicionalni pristupi projektovanja aluminijumskih konstrukcija pretpostavljali su zavarene spojeve kao mjesta najviše ugrožena od potencijalnog loma samo u slučaju prekoračenja radnog opterećenja ili ekscenčnih stanja. Takva granična područja stabilnosti sistema isključivala su mogućnost projektovanja sa sigurnošću od loma heterogenih struktura u materijalu nastalih zavarivanjem. Savremeni inženjerski prilazi ovoj oblasti usmjereni su na pronalaženje modela obradnog sistema zavarivanjem komponenata konstrukcije kojim se preko predikcije parametara samog procesa utiče na karakteristike zavarenog spoja na način koji joj obezbjeđuje pouzdanost i integritet u svim fazama eksploatacije tokom radnog vijeka, procjenom prirode progresije prsline, odnosno njenog stabilnog i nestabilnog rasta pri naponima koji su manji od dozvoljenih.

U tu svrhu postavljaju se sledeće hipoteze:

HIPOTEZA 1:

Nema pouzdane metode ispitivanjem bez razaranja koja otkriva grešku u zavarenom spoju. Savojno testiranje preko trna-valjka oko lica MŠ jedina je sigurna metoda za detektovanje grešaka u korjenu MŠ kod ZTM ostvarenih spojeva

HIPOTEZA 2:

Izgled profila tvrdoće i njena distribucija u dva horizontalna nivoa i jednom vertikalnom pravcu u centru poprečnog presjeka MŠ, više zavise od ugla nagiba konusa i visine trna alata za zavarivanje (geometrijskih parametara) nego od kinematskih parametara procesa

HIPOTEZA 3:

Konvencionalnim postupcima topljenjem nezavarljivu leguru aluminijuma EN AW 7049 A u stanju T652, moguće je uspješno zavariti postupkom ZTM pri čemu će efikasnost zavarenog spoja izražena kroz odnos zateznih čvrstoća MŠ i OM, biti na nivou od 70% do 80% kao kod postupaka topljenjem lako zavarljive legure aluminijuma

HIPOTEZA 4:

Ukupna energija udara, žilavost loma i zamorno ponašanje prsline inicirane u različitim zonama zavarenog spoja zavise od strane MŠ i razvoja mikrostrukturnih specifičnosti prelaznih zona između konstituenata zavarenog spoja

HIPOTEZA 5:

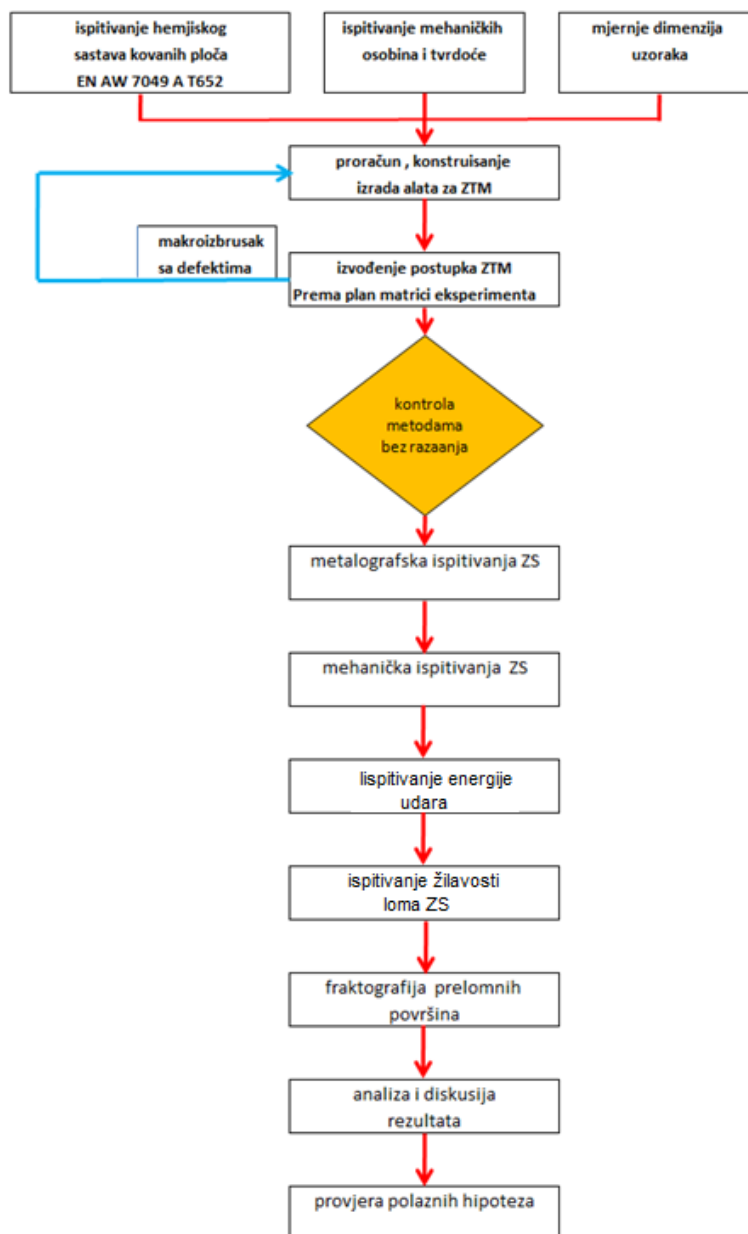
Fraktografska ispitivanja–skening elektronska mikroskopija i detekcija X-zracima površina preloma na mjestima loma nastalog udarnim opterećenjem u centru zone „grumena“ i u dva različita presjeka na strani napredovanja i na povratnoj strani ZTMU, pokazuje različite

2.0 TEORIJSKA RAZMATRANJA

topografije i morfologije mehanizma loma, zavisno od odnosa broj obrtaja alata i brzine zavarivanja (kinematskih parametara).

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Da bi se obezbijedio kontinuitet istraživanja definisanih u teorijskom dijelu disertacije, neophodno je sačiniti planirani slijed aktivnosti uz pomoć odgovarajućeg algoritma prikazanog na slici 3.1. Prvi stadijum podrazumijeva karakterizaciju OM, potom definisanje tipa alata na prethodno odabranom uređaju na kome će se izvoditi zavarivanje uzoraka i na kraju opštu karakterizaciju osobina i svojstava zavarenog spoja na osnovu čega je jedino moguće potvrditi ili opovrgnuti postavljene polazne hipoteze istraživanja.



Slika 3.1 Planirani slijed postupaka eksperimentalnog istaživanja

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.1 Priprema za zavarivanje

3.1.1 Način dobijanja osnovnog materijala

Osnovni materijal namjenski je proizveden za potrebe nekadašnje JNA u tadašnjoj OOUR-a Kovačnica SOUR-a KAT Titograd. Postupci proizvodnje, pojedine faze prerade, termičke obrade, priprema uzoraka za eksperimentalna zavarivanja legure aluminijuma (kolokvijalnog naziva „konstruktali“ a konspirativnog termina PD 33), najviše približna odgovarajućoj standardnoj leguri aluminijuma visoke čvrstoće EN AW 7049A, su sledeći:

a) rađeno je više šarži od legure PD 33 na način da je kao osnovna komponenta korišćen sirovi aluminijum visoke čistoće 99,8%, a nakon prijema tečnog metala na temperaturi od oko 850°C dodaju se legirajući elementi, vrši degazacija i rafinacija u cilju uklanjanja vodonika iz metala i odstranjivanja šljake po površini tečnog metala, i

b) poslije završenog tretmana tečni metal se preliva u peći za livenje, obavlja analiza hemijskog sastava i količine vodonika koji ne smije preći 0,12 cm³/100 gr metala. Ukoliko se pokaže veći sadržaj potrebna je dodatna degazacija. Sa aspekta proizvodno-tehnoloških faza postupka, one se u procesnoj industriji provode etapno:

I faza: Klasično polukontinualno horizontalno livenje cilindričnih trupaca dimenzija 200 x 6000 mm pri čemu je temperatura livenja u intervalu od 700°C do 705°C, brzina livenja u opsegu od 65 mm/min do 70 mm/min, količina vode za hlađenje od 55 m³/h do 60 m³/h i brzina kojom se dovodi AlTiB žica do 180 mm/min,

II faza: Ova faza odvija se u dva iteracijska koraka. U prvom koraku odnosno stepenu vrši se homogenizacija na temperaturi od 465±5 °C, zagrijavanje do date temperature traje 6 h i zadržavanje na istoj 3 h, dok u sledećem stepenu temperatura homogenizacije iznosi 460±5 °C (ne smije preći granicu od 476°C) i vrijeme „držanja“ na toj temperaturi 16 h dok je hlađenje trupaca u komori na prirodan način,

III faza: Ovom fazom predviđa se rezanje trupaca na cirkularu po prečniku 192 mm i na dužini 360 mm,

IV faza: Višestepeno slobodno kovanje koje u prvom stepenu predviđa kovanje na visinu od 51 ±1 mm. Kovanje se obavlja na hidrauličnoj presi nominalne sile 300 MN, pri temperaturi alata od 150°C do 200°C, temperaturi uloška od 420°C do 440°C i brzini kovanja 5 mm/s. Drugi stepen slobodnog kovanja obuhvata svođenje otkovka na presi na visinu od 25± 1 mm pri brzini 3 mm/s, odnosno u trećem stepenu na visinu 15±1 mm pri brzini 2 mm/s uz identičan termički status alata i uloška,

V faza: Termička obrada po režimu T652 (rastvorno žareno, oslobođeno zaostalih napona zatezanjem na kontrolisanu veličinu deformacije i vještački starenje da se postigne dobra otpornost na koroziju ljuštenjem), kojoj u konkretnom slučaju pripada rastvarajuće žarenje-gašenje na 470°C, vrijeme zagrijavanja je 1 h, a potom brzo hlađenje u vodi ne duže od 15 s od trenutka otvaranja peći, potom hladna dopunska deformacija sabijanjem na pomenutoj presi sa ciljem otklanjanja zaostalih napona od procesa gašenja pri čemu se visina smanji od 1% do 3% (kod ovih otkovaka 2%), i

VI faza: Dvostepeno starenje 100°C-5 h i 160°C-5 h,

Izgled pojedinih mikrostruktura sa vidljivom greškom nakon postupka livenja, homogenizacije i vještačkog starenja otkovaka ove legure u proizvodnim uslovima, preuzetih iz arhive Sektora za kvalitet KAT Titograd, prikazan je na slici 3.2.

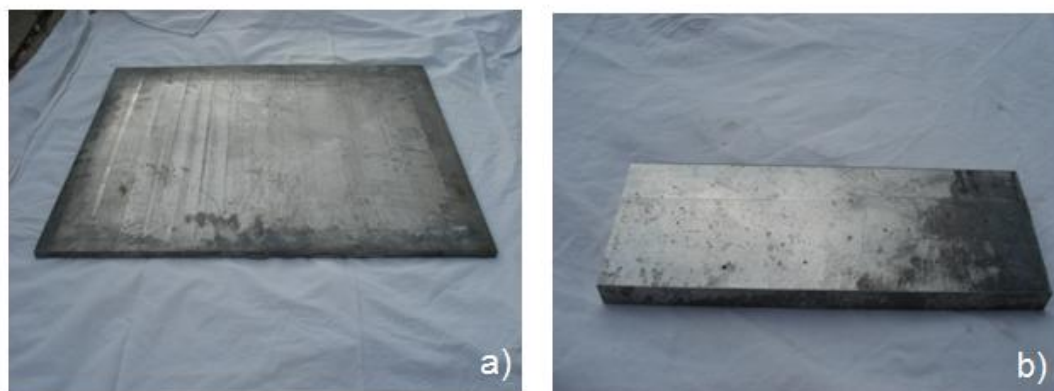
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.2 Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka a) liveno stanje (uvećanje x200) b) stanje nakon homogenizacije (uvećanje x 200) c) termički obrađeno stanje otkovka(uvećanje x200) [251]

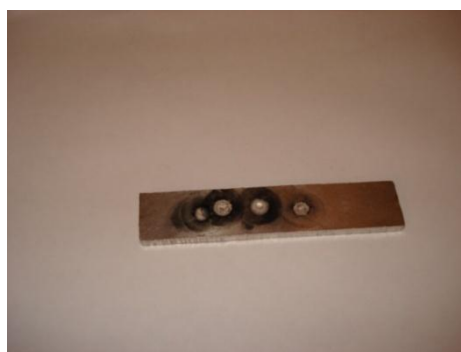
Na datim izgledima mikrostrukture prisutne su poroznosti interdendritnog tipa (markirane kružićem) u osnovi čvrstog rastvora aluminijuma čiji je uzrok najvjerojatnije u IM fazama izdvojenim po granicama zrna. Njihova karakterizacija moguća je kasnijom primjenom skenirajuće elektronske mikroskopije nakon zavarivanja svih uzoraka s obzirom da se one ovim postupkom zavarivanja ne mogu otkloniti.

Izgled konačno termički obrađenog otkovka i jednog njegovog segmenta za izradu epruvete za zavarivanje je na slici 3.3.



Slika 3.3 Izgled otkovanog priprema a) dimenzije 660 x 580 x 14 mm b) epruveta 185 x 70 x 14 mm nakon sječenja vodenim mlazom

U cilju određivanja hemijskog sastava uzoraka za glavna eksperimentalna ZTM, na optičkom emisionom (OE) kvantometru tip ARL 3580 sa etalonskim uzorcima "Pechiney", urađeno je više proba. Na slici 3.4 prikazana je jedna od njih.



Slika 3.4 Izgled jedne od epruveta nakon ispitivanja na OE kvantometru tip ARL 3580

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Legura koja je korišćena u eksperimentu ima hemijski sastav prikazan u tabeli 3.1, uporedno sa hemijskim sastavom standardne legure.

Razlika nije samo u znatno smanjenoj količini Fe i Si, već su dodati Zr, Ti, V i B što čini leguru nekonvencionalnom, a usled povećanog sadržaja hemijskih elemenata još teže zavarljivom od legure standardnog hemijskog sastava, tabela 3.1.

Tabela 3.1 Uporedni prikaz hemijskog sastava legure za eksperimentalna zavarivanja i standardne legure približnog hemijskog sastava

Oznaka legure	Sadržaj elementa, mas%									
	Zn	Mg	Cu	Cr	Zr	Ti	V	B	Fe	Si
EN AW 7049 A T 652	7,45	2,45	1,53	0,17	0,15	0,015	0,003	0,003	0,12	0,11
Standardna legura	7,2-8,4	2,1-3,1	1,2-1,9	0.05-0, 25	/	/	/	/	0,50	0,40

Za naredne korake u istraživanom slučaju od značaja su dvije tabele. Jedna tabela je o mehaničkim karakteristikama legure EN AW 7049A u stanju T652, a druga tabela je o specifičnim svojstvima pomenute legure.

Mehanička svojstva i tvrdoća uzorka dati su u tabeli 3.2, a specifične osobine u tabeli 3.3.

Tabela 3.2 Mehanička svojstva i tvrdoća legure za ZTM

Oznaka legure	Zatezna čvrstoća R_m , [Mpa]	Napon tečenja $R_{p0,2}$, [Mpa]	Izduženje A_5 , [%]	Tvrdoća, [HB]
EN AW 7049A T652	618	536	5	160

Tabela 3.3 Specifična svojstva legure korišćene u eksperimentalnom zavarivanju

Yungov modul elastičnosti, GPa	Poasonov koeficijent	Toplotna provodljivost, W/m K	Specifična gustina, kg/m ³	Specifični toplotni kapacitet, J/kg °C
73,455	0,33	130	2810	960

Da bi se spriječio uticaj toplote na strukturu uzoraka, svih pet komada kovanih ploča navedenih dimenzija i debljine oko 14 mm, sječene su na predmjeru vodenim mlazom, a tako dobijeni uzorci su finalnom obradom postupkom skidanja strugotine (glodanjem) dovedeni na debljinu 6 mm po konturi 180 x 65 mm. Nakon obilježavanja utiskivanjem slova i brojeva svakog pojedinačnog uzorka (broj eksperimenta, tip alata i strana MŠ), moglo se pristupiti hemijskom odmaščivanju trihloretilenom, dato na slici 3.5 a) i b).

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.5 Uzorci za glavna ZTM a) pet uzoraka namijenjenih zavarivanju različitim tipovima alata nakon sječenja vodenim mlazom b) tri uzorka nakon glodanja i odmašćivanja

3.1.2 Opis radnog mjesta za izvođenje zavarivanja

Za provođenje postupka zavarivanja potrebna je namjenska mašina opremljena CNC upravljačkom jedinicom sa mogućnošću kružne interpolacije čime je omogućena izrada složenijih proizvoda sa kompleksnom geometrijom. Međutim, za zavarivanje uzoraka za potrebe ove disertacije, korišćena je robusna mašina na prvi pogled dovoljno velike krutosti - vertikalna glodalica tip AG 400 sa upravljačkom jedinicom tip NCT 99, proizvodnje „Prvomajska“ Zagreb u GOŠA FAM-u Smederevska Palanka, slika 3.6.



Slika 3.6 Izgled alatne glodalice tip AG 400 sa CNC upravljačkom jedinicom NCT 99 za ZTM u eksperimentu

Ova mašina sa hidrauličnim stezanjem alata ISO 40 ima sposobnost kretanja radnog stola po osama: $x=630\text{mm}$, $y=430\text{ mm}$ i $z=450\text{ mm}$, mogućnost kontinualne promjene broja obrtaja glavnog vretena u rasponu od 20 min^{-1} do 2780 min^{-1} i posmaka radnog stola od 1mm/mm do 2000 mm/min . Snaga pogonskog agregata je 15 kW . U cilju praćenja reaktivnih parametara (sile zavarivanja F_z , oscilacija alata u tri smjera a_x, a_y i a_z , radno mjesto opremljeno je odgovarajućom mjernom instrumentacijom, slika 3.7.

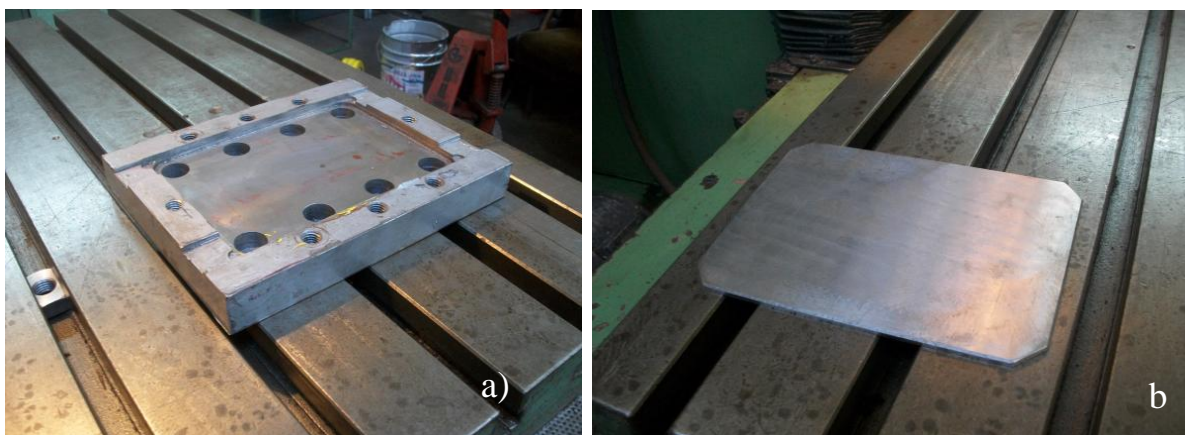
Detaljniji način funkcionisanja opreme korišćene za praćenje dinamičkog stanja alata i termalne istorije procesa ZTM, prikazan je u poglavlju rezultata eksperimentalnog mjerenja reaktivnih parametara procesa.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.9 Izgled opremljenog eksperimentalnog mjesta tokom zavarivanja jednog od probnih uzoraka

Za pričvršćivanje eksperimentalnih uzoraka za radni sto mašine sa mogućnošću adaptacije prema različitim debljinama ploča, izrađena je oplata-stezna ploča dimenzija 300 x 230 x 30 mm, slika 3.10 a) i podmetač dimenzija 180 x 130 x 5 mm, slika 3.10 b). Obje ploče su u kvalitetu čelika za poboljšanje 25CrMo4 sa zateznom čvrstoćom od 850 MPa i tvrdoćom od 38-42 HRC. U cilju dobijanja dobrog izgleda korjense strane MŠ izvršeno je brušenje stezne ploče i podmetača.



*Slika 3.10 Oplata radnih komada a) stezna ploča za vezu sa radnim stolom glodalice
b) podmetač za podešavanje debljine uzoraka*

3.1.3 Alati za probna i osnovna zavarivanja legure EN AW 2024 T3 i EN AW 7049 T 652

Nakon teorijskih saznanja da je suština kvalitetnog spoja ne samo u optimalno izabranim kinematskim parametrima već i u geometriji alata i reljefu trna, za potrebe izvođenja probnih i osnovnih zavarivanja saglasno plan matrici eksperimenta, urađeno je više tipova alata sa različitom geometrijom i izgledom. Alati su izrađivani u klasi kvaliteta niskolegiranih Ni-Mo-

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Cr-V i visokolegiranih Cr-Mo-V čelika za rad u toplom stanju. Nakon zavarivanja desetina probnih uzoraka, posebna pažnja pri izboru alata posvećena je otpornosti na habanje u uslovima postojanja visokih temperatura alata.

Po osnovu tog kriterijuma, izbor tipa čelika od kojeg će se upotrebljavati svi alati, sveden je na ocjenu otpornosti na popuštanje, odnosno na očuvanju geometrijske stabilnosti i što manjoj sklonosti omekšavanju trna i čela alata.

Fotografije tri seta najčešće korišćenih alata prikazane su na slici 3.11. To su alati različitih gravura čela sa lijevom i desnom zavojnicom na tijelu konusnog trna ili sa četiri aksijalna žljeba u tijelu konusnog trna alata, korišćeni za probna i glavna eksperimentalna zavarivanja.



Slika 3.11 Setovi alata za ZTM različite geometrije i izgleda čela i trna alata

Alati za završna zavarivanja legura aluminijuma serije EN AW 7049A T652 su od valjanog alatnog čelika, u konkretnom slučaju visokolegiranih Cr-Mo-V čelika. Osnovne karakteristike čelika tipa X38CrMoV 5-1(AISI H11), odomaćenog naziva UTOP Mo 1 iz pomenute familije čelika, su osrednja duktilnost i povišena otpornost na popuštanje koja ima izraženu pojavu sekundarnog otvrdnjavanja.

Usled toga alati izrađeni od ovog čelika, dva puta kaljeni, isto toliko puta otpušteni i jednom stabilaciono žareni, zadržavaju tvrdoću od 52-54 HRC, posjeduju visoku žilavost i postojanost na adheziono trenje (metal-metal). Na slici 3.12 a) dat je izgled pripremk za izradu alata, a na slici 3.12 b) uzorci za analizu hemijskog sastava optičkom emisionom (OE) spektroskopskopijom.



Slika 3.12 Izled a) pripremak za izradu alata b) uzorci za spektroskopsku analizu hemijskog sastava

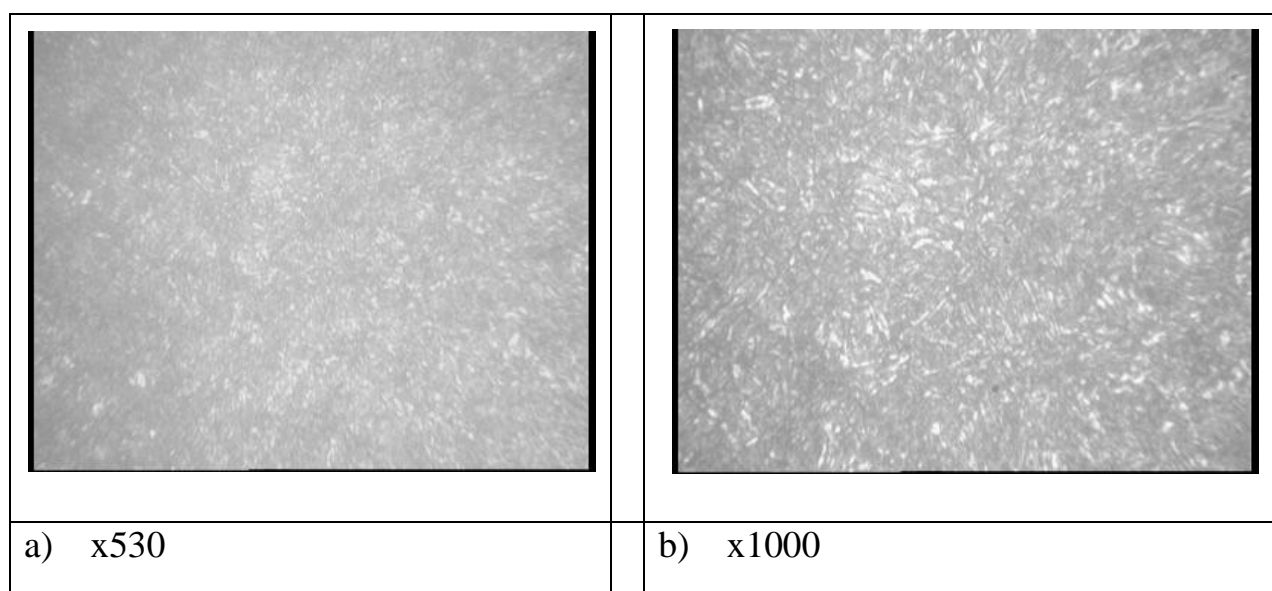
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Alati su predgrijani u pećima na temperaturu 600°C u vremenu od 30 min, zatim zagrijavani do 850°C u trajanju od 10 min a potom hlađeni u ulju. Otpuštanje je trajalo 60 min na temperaturi od 500°C i 60 min na temperaturi 560°C. Alati su na kraju hlađeni na prirodnom vazduhu bez promaje. U tabeli 3.4 prikazan je hemijski sastav uzorka nakon analize, a na slici 3.14 izgled mikrostrukre pri povećanju 530x i 1000x.

Tabela 3.4 Hemijski sastav materijala uzorka alata (mas.%)

Materijal uzorka	Sadržaj elementa,mas %							
	C	Si	Cr	Mo	V	Mn	P	S
X38 CrMoV 5-1	0,39	0,92	4,93	1,26	0,32	0,39	0,017	0,004

Nakon standardne metalografske pripreme uzorak je radi otkrivanja mikrostrukture nagrižen u nitalu (2% HNO₃ u etanolu). Pregledom uzorka na svjetlosnom mikroskopu tip *NEOPHOT 21* izvršena je metalografska analiza. Mikrostruktura se sastoji od otpuštenog martenzita, slika 3.14.



Slika 3.14 Izgled mikrostrukture uzorka alata za ZTM od čelika X 38 CrMoV5-1 [252]

Prilagođavajući se standardnom ISO 40 konusu stezne glave alatne glodalice, izrađeni su alati sa prečnikom prihvatnog dijela (nosača) alata $d=18$ mm, prečnikom čela $D = 25$ mm i dužinom čela alata $H=25$ mm.

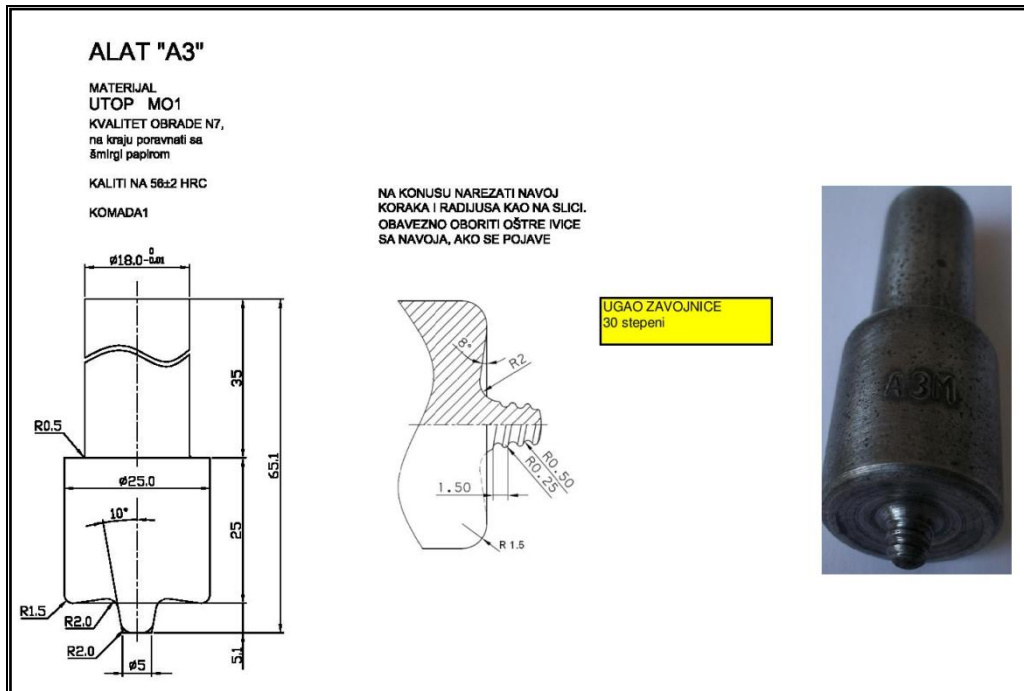
Ostale geometrijske karakteristike alata (oblik i profil čela, prečnik i visina trna, radijus na prelazu sa trna na čelo alata), određene su u zavisnosti od vrste aluminijumske legure (EN AW 5086, EN AW 2024 T3, EN AW 2024 T351 ili EN AW 7049 A) i debljine limova koje je potrebno spojiti 3 mm, 5 mm i 6 mm.

Probnim zavarivanjem odabrane legure vizuelno su najbolje ocijenjeni korjen i lice MŠ dobijeni formiranjem zavarenog spoja korišćenjem alata tipa A3, B3, C3, D3 i E3.

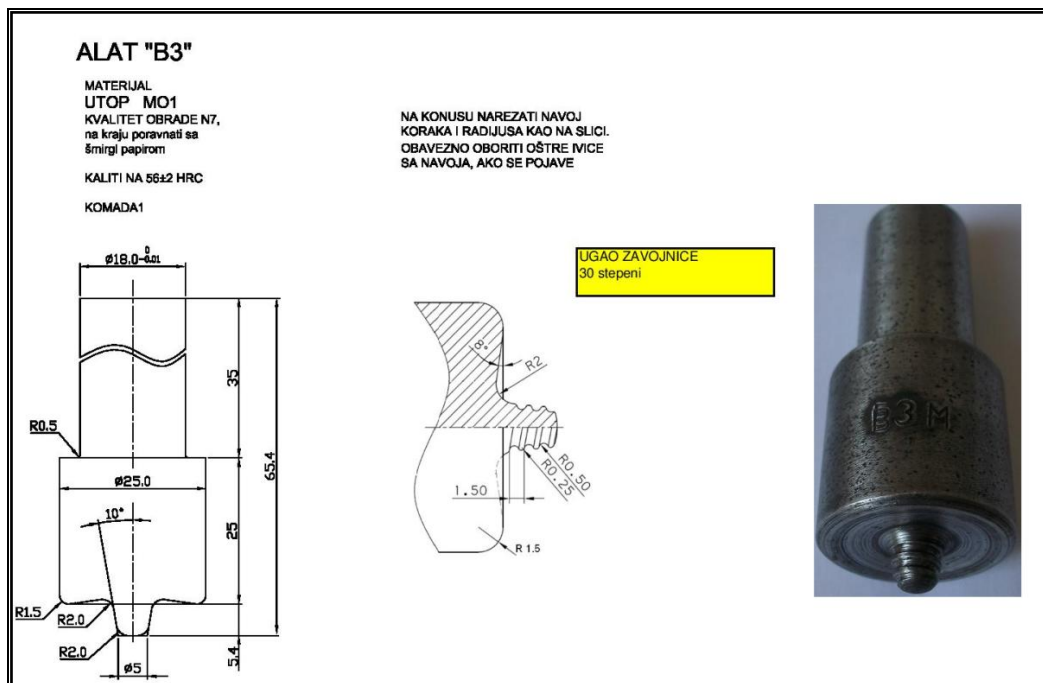
Radionički crtež alata i njihov izgled dat je na slici 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 i 3.19.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Svi alati su sa lijevom zavojnicom pod uglom od 30° i rezervoarom radijusa 8° na čelu alata. Alati su izrađeni struganjem od priprema prečnika 30 mm u samostalnoj zanatskoj radnji u Smederevskoj Palanci, a termička obrada u SZR „Nitro-jon“ u Novoj Pazovi.

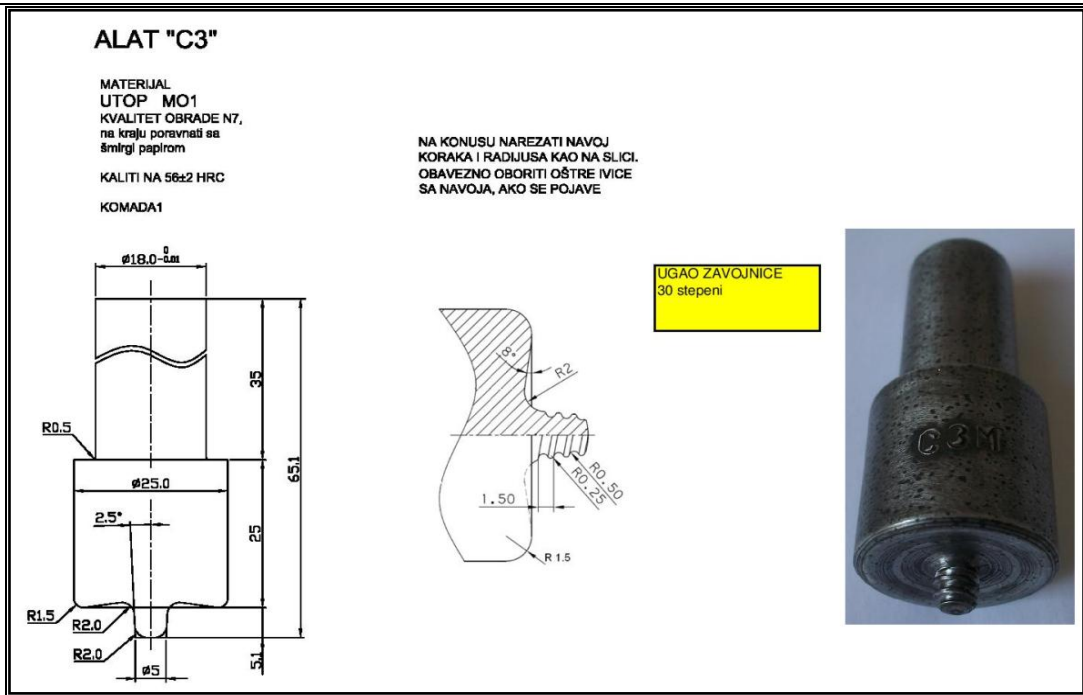


Slika 3.15 Radionički crtež alata za zavarivanje ET 01, ET 02, ET 03 i ET 04 ($\alpha=10^\circ$, $h=5,1$ mm)

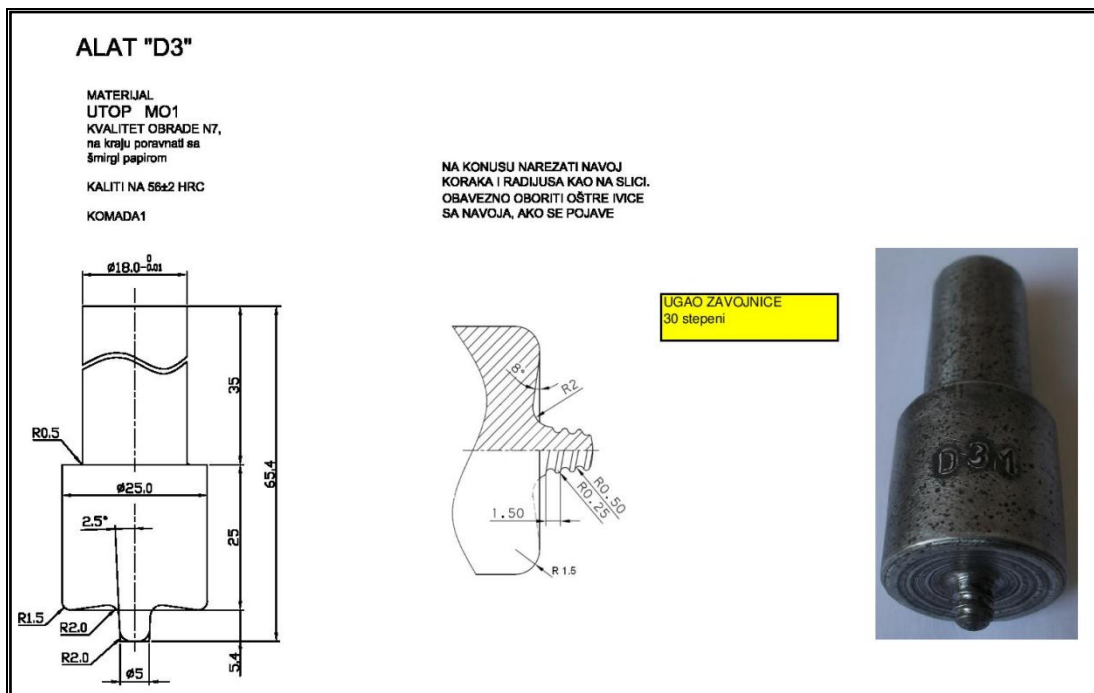


Slika 3.16 Radionički crtež alata za zavarivanje ET 05, ET 06, ET 07 i ET 08 ($\alpha=10^\circ$, $h=5,4$ mm)

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

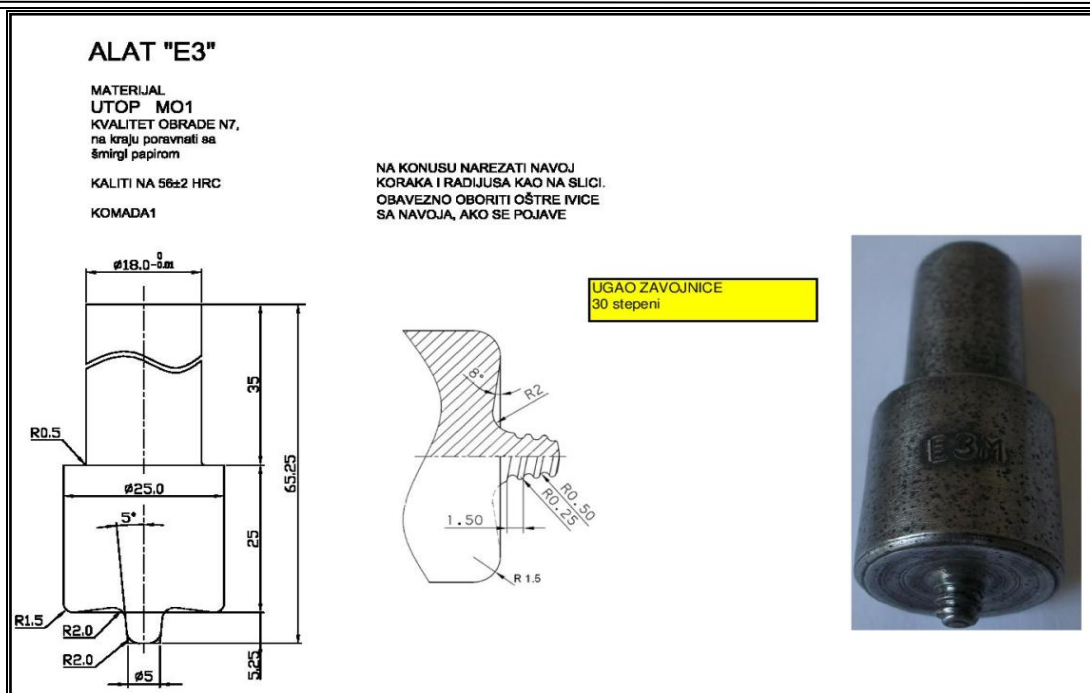


Slika 3.17 Radionički crtež alata za zavarivanje ET 09, ET 10, ET 11 i ET 12 ($\alpha = 2,5^\circ$ $h=5,1$ mm)



Slika 3.18 Radionički crtež alata za zavarivanje ET 13, ET 14, ET 15 i ET 16 ($\alpha = 2,5^\circ$, $h=5,4$ mm)

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.19 Radionički crtež alata za zavarivanje ET 17, ET 18, ET 19 i ET 20 ($\alpha=5^\circ$, $h=5,25$ mm)

3.1.3.1 Plan matrica eksperimenta

Prethodno provedena sveobuhvatna i obimna preliminarna i probna zavarivanja, istaživača usmjeravaju da odabere plan eksperimenta na način što će za ulazne faktore na osnovu kojih će kontinualno pratiti ponašanje reaktivnih parametara pricesa ZTM i izlaznih veličina dobijenih na kraju procesa odrediti najuticajnije. Autor se odlučio da u ovom slučaju za ulazne veličine (nezavisno promjenjive faktore ulaza) odabere dva kinematska i dva geometrijska faktora. Kinematski faktori (broj obrtaja alata i brzina zavarivanja) u suštini su režim zavarivanja, a geometrijski (ugao nagiba konusa trna i visina trna alata) opšte su karakteristike trna kao najznačajnijeg dijela alata. Ugao nagiba alata prema suprotnoj strani od smjera zavarivanja nije se mijenjao tokom zavarivanja i iznosio je 1° . Za plan eksperimenta odabran je potpuni četvorofaktorni ortogonalni plan sa variranjem faktora na dva nivoa i sa ponavljanjem u centralnoj-nultoju tački plana $n=4$ puta. Brzina spuštanja trna u svim tačkama eksperimenta iznosila je $v_{trna} = 0,25$ mm/s, a brzina spuštanja čela alata iznosila je $v_{čela} = 0,01$ mm/s. Broj eksperimentalnih tačaka N za broj ulaznih faktora k i brojem ponavljanja u centralnoj tački plana n je:

$$N = 2 + n$$

Kinematski - ulazni faktori su:

$X1 = v$, mm/min-brzina tokom zavarivanja

$X2 = n$, min^{-1} -broj obrtaja alata tokom zavarivanja

Geometrijski-ulazni faktori su:

$X3 = \alpha$, $^\circ$ – ugao nagiba konusa trna

$X4 = h$, mm – dužina trna alata

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Pomenuti ulazni faktori tokom zavarivanja mijenjaju se zavisno od tipa alata saglasno plan matrici eksperimenta. Srednji ili osnovni nivo određen je kao kvadratna podkorjena veličina proizvoda gornjeg i donjeg nivoa vrijednosti parametara. U skladu sa prethodnim, usvojeni su nivoi varijacije ulaznih faktora i dati u tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Nivoi varijacija odabranih ulaznih faktora plana eksperimenta

Ulazni faktori	Gonji nivo	Donji nivo	Osnovni nivo
X1	80	60	70
X2	850	750	800
X3	10	2,5	5
X4	5,4	5,1	5,25

Ovakav četvorofaktorni ortogonalni plan eksperimenta podrazumijeva formiranje plan matrice koja nalaže korišćenje tipova alata serije A, B, C, D i E sa po četiri eksperimentalne tačke pri čemu za osnovni nivo nema varijacije kinematskih ulaznih faktora. Usled relativno male dužine eksperimentalne ploče od 180 mm i potrebe za detaljnijim ispitivanjima u cilju cjelokupne karakterizacije zavarenog spoja, ukazala se potreba da se za svaku eksperimentalnu tačku ponovi još jedna proba za istim parametrima procesa. Ovo ne važi za tačku eksperimenta na uzorcima zavarenim sa alatom E, odnosno za centralnu-ponovljivu eksperimentalnu tačku kod kojih je osrednjena vrijednost svih parametara bila konstantna. Ako se primijeni kodiranje faktora na dva granična nivoa, maksimalni i minimalni nivo vrijednosti ulaznih parametara procesa ZTM, uslovi izvođenja zavarivanja eksperimentalnih ploča tablično se predstavljaju preko matrice planiranja u kojoj su u redovima redni brojevi eksperimenta, a u kolonama veličine odgovarajućih ulaznih faktora determinisanih tipom alata i zahtjevom za optimizacijom kinematskih parametara diktiranim tehnološkim mogućnostima mašine.

U tabeli 3.6 prikazana je plan matrica kodiranih vrijednosti za nezavisno promjenjive v , n , α i h (max. „+“, min. „-“ i osnovni nivo „0“)

Tabela 3.6 Plan matrica kodiranih vrijednosti

PLAN MATRICA POTPUNOG ČETVOROFAKTORNOG EKSPERIMENTA										
Redni broj	Tip alata A,B,C,D,E	Brzina zavarivanja		Broj obrtaja alata		Ugao nagiba trna konusa		Visina trna		Vektori izlaza [kN],[⁰ C],[J/cm ²]
		[mm/min]		[min ⁻¹]		[⁰]		[mm]		
		X1 = v		X2 = n		X3 = α		X4 = h		
ET 01 A ET 01 B	A	+	80	+	850	+	10	-	5,1	17,5;397,3;4,52
ET 02 A ET 02 B	A	-	60	-	750	+	10	-	5,1	23,0;454,4;4,11
ET 03 A ET 03 B	A	+	80	-	750	+	10	-	5,1	17,3;427,9;5,81
ET 04 A ET 04 B	A	-	60	+	850	+	10	-	5,1	23,7;376,0;4,72
ET 05 A ET 05 B	B	+	80	+	850	+	10	+	5,4	25,0;384,6;4,71
ET 06 A ET 06 B	B	-	60	-	750	+	10	+	5,4	16,8;444,5;5,34
ET 07 A ET 07 B	B	+	80	-	750	+	10	+	5,4	16,2;433,9;4,94

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

ET 08 A ET 08 B	B	-	60	+	850	+	10	+	5,4	15,6;422,0;4,68
ET 09 A ET 09 B	C	+	80	+	850	-	2,5	-	5,1	17,8;429,8;4,75
ET 10 A ET 10 B	C	-	60	-	750	-	2,5	-	5,1	15,8;458,3;5,05
ET 11 A ET 11 B	C	+	80	-	750	-	2,5	-	5,1	15,2;433,9;4,59
ET 12 A ET 12 B	C	-	60	+	850	-	2,5	-	5,1	27,6;377,3;4,84
ET 13 A ET 13 B	D	+	80	+	850	-	2,5	+	5,4	22,7;420,7;5,25
ET 14 A ET 14 B	D	-	60	-	750	-	2,5	+	5,4	23,9;457,2;4,68
ET 15 A ET 15 B	D	+	80	-	750	-	2,5	+	5,4	22,8;447,9;4,94
ET 16 A ET 16 B	D	-	60	+	850	-	2,5	+	5,4	24,8;426,0;4,55
ET 17	E	0	70	0	800	0	5	0	5,25	22,4;418,2;--
ET 18	E	0	70	0	800	0	5	0	5,25	26,1;415,6;--
ET 19	E	0	70	0	800	0	5	0	5,25	27,0;441,0;--
ET 20	E	0	70	0	800	0	5	0	5,25	25,9;445,1;--

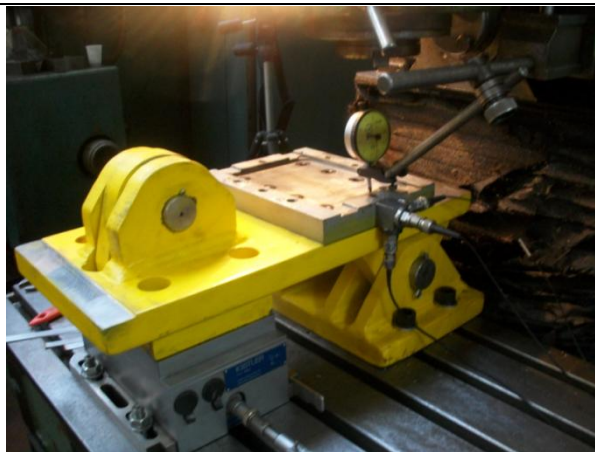
3.2 Tok eksperimentalnog zavarivanja uzoraka

Neposredno prije početka zavarivanja, prvom paru uzoraka upotrebom komparatera tačno je određen položaj da se onemogućiti da trn alata dodirne podmetač u oplati i polomi se ili da se ne podudare aksijalne ose alata i linije spoja dva po dužini sučeono sastavljena eksperimentalna uzorka pojedinačnih dimenzija 180 x 65 x 6 mm, slika 3.20.

Eksperimentalno zavarivamnje može da počne tek kada se operater uvjerio da je pripremnim radnjama obezbijedio dovoljnu čvrstoću veze između radnog stola mašine, redukcionog zglobo-polužnog mehanizma, stezne ploče i podmetača (oplate) i radnih uzoraka. Istraživač je tokom zavarivanja prvog para uzoraka komparaterom provjerio da li radni sto glodalice održava „nulto“ stanje u vertikalnoj ravni i tom prilikom utvrdio gubitak od 0,7 mm na početku i 0,3 mm na kraju zavarivanja, što može biti posledica zazora u kugličnim vreteništima pogonskog kretanja radnog stola mašine.

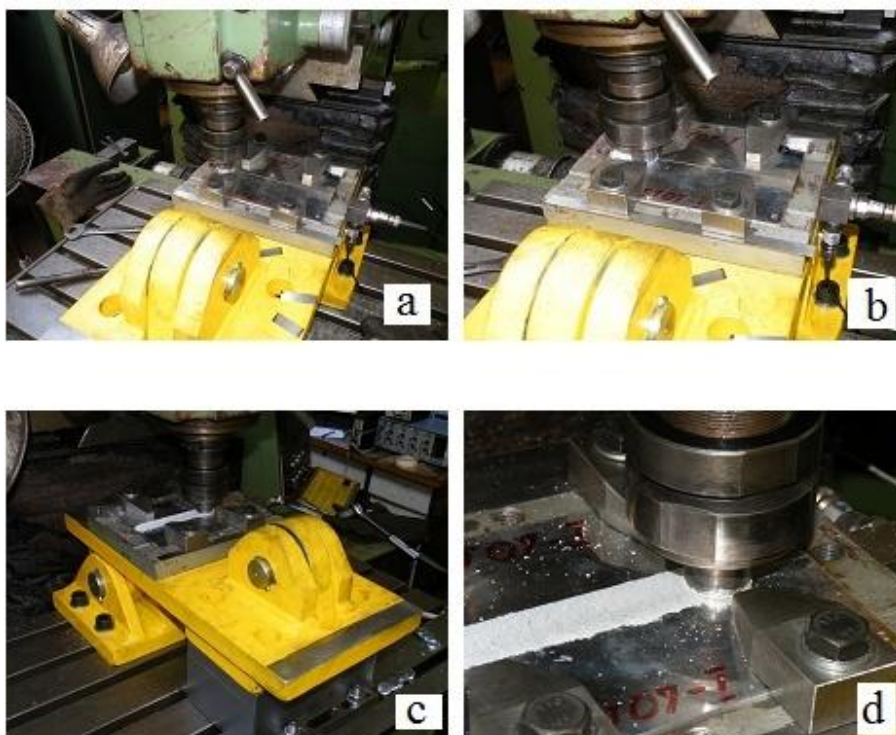
Na osnovu prethodno stečenog iskustva, zadaje se broj obrtaja glavnom vretenu u čijoj se steznoj glavi nalazi odabrani alat i saopštava kretanje prema dolje ka uzorcima. Poslije protoka vremena dovoljnog da trn usled rotacionog kretanja alata oslobodi početnu toplotnu energiju na radne komade, počinje intenzivniji dodir između znatno veće površine dodira čela alata i gornjih kontaktnih površina uzoraka čime se dodatno generiše toplota kao posledica trenja.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.20 Provjera saosnosti, upravnosti i paraliteta alata i uzoraka prije zavarivanja

Dubina penetracije čela alata u zavarivane komade iznosi $u=0,2$ mm kako bi se vrh trna bilo kojeg odabranog alata primakao na udaljenost od $s-t=0,3-0,7$ mm od donje površine uzoraka, pri čemu se trn kreće u pravcu sopstvene ose brzinom od $0,25$ mm/s do trenutka dodira čela alata o kontaktne površine komada, a nakon toga brzina alata se smanji na $0,01$ mm/s, slika 3.21a).



Slika 3.21 Faze procesa zavarivanja legure Al-Zn-Mg-Cu za ET 07
a) faza prodiranja trna i čela alata, b) početak formiranja zavarenog spoja na prvoj dionici, c) završetak formiranja zavarenog spoja u poslednjoj dionici, d) faza izvlačenja alata iz zavarenog komada

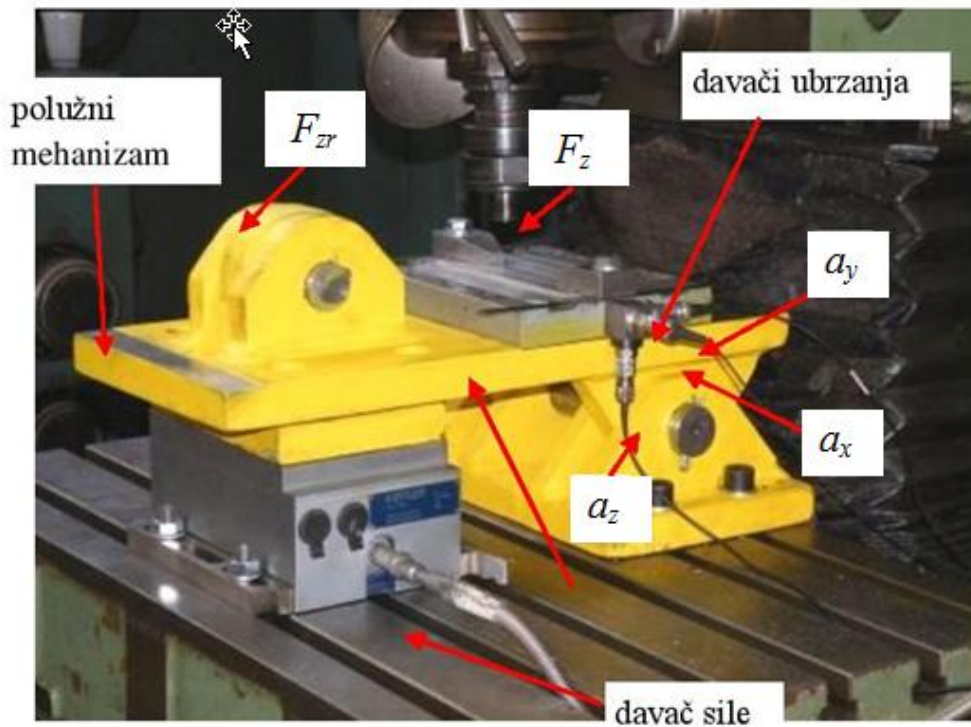
U trenutku kada je omekšao materijal ispod i oko alata, počinje proces konsolidacije, pošto je alatu pomjeranjem radnog stola glodalice, omogućeno pravolinijsko kretanje, dok iza njega ostaje vidljivo lice MŠ, slika 3.21b). Daljim kombinovanim rotaciono-pravolinijskim kretanjem, prethodno omekšani materijal se hladi i iza njega posmatrano u pravcu kretanja, jasno se vide polukružne ivice nastale od tragova oboda čela alata, slika 3.21c). Nakon poslednje dionice zavarivanja, kraći je vremenski zastoj pravolinijskog kretanja alata neposredno prije nego se alat vertikalno podigne čime je okončan proces ZTM, slika 3.21d).

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Na istovjetan način zavareni su svi eksperimentalni uzorci alatima serije A, B, C, D i E.

3.3 Opis mjerne konfiguracije za eksperimentalno određivanje reaktivnih parametara procesa

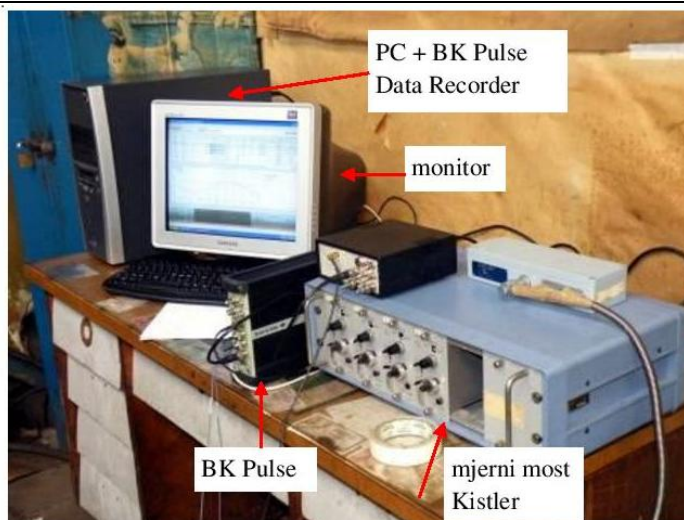
U ovom potpoglavlju prezentovan je sistem mjerenja-monitoringa praćenja stanja reaktivnih parametara zavarivanja: sile zavarivanja F_z , dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} , ubrzanja alata a_x, a_y i a_z i termičke slike procesa zapisima IC kamerom. Mjerenje eksperimentalnih vrijednosti procesnih parametara kojima se ostvaruje uvid u dinamički odgovor alata za ZTM (sila zavarivanja, dinamička komponenta sile zavarivanja, oscilacije alata u tri smjera) i termalne historije procesa (IC snimanje svih faza i ciklusa u zavisnosti od dužine trajanja), izvršeno je neposredno tokom trajanja zavarivanja. Sila zavarivanja F_z , odnosno pritiska sila mjerena je uz pomoć redukcionog zglobo- polužnog mehanizma kojim je redukovana u odnosu 4:1, slika 3.22.



Slika 3.22 Položaj mjerne opreme za registrovanje sile i oscilacija alata za zavarivanje

Sila zavarivanja F_z mjerena je korišćenjem trokomponentnog davača sile tipa *Kistler 9265A* sa dodatkom za glodanje 9443, dok je za pojačanje signala sa davača upotrijebljen mjerni most *Kistler*, slika 3.23.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.23 Instrumentacija za AD konverziju dinamičkih parametara procesa ZTM

Nivoi vibracija na oplati (podložno-steznoj ploči) mjereni su u tri međusobno normalna pravca a_x , a_y i a_z pomoću tri piezoelektrična davača ubrzanja tip *BK 4391*. Snimanje signala sile oba dinamička parametra urađeno je pomoću *BK Pulse* platforme i *BK Pulse recorder* softvera preko 24-to bitne AD konverzije. Učestanost diskretizacije iznosila je 2048 Hz uz primjenu odgovarajućeg filtera propusnika niskih učestanosti (*low-pass filtra*) od 800 Hz.

Registrowanje temperature svih faza i ciklusa zavarivanja obavljeno je termovizijskom kamerom FLIR system tip *thermal CAM P640*, slika 3.24. Mjerenje temperature moguće je samo u jednoj tački po obodu čela alata koji je u kontaktu sa površinom limova.



Slika 3.24 Trenutak snimanja IC kamerom jednog eksperimentalnog uzorka

Na osnovu IC slika dobijeni su dijagrami zavisnosti temperature i vremena. Kamera IC bila je programirana da od pocetka do kraja procesa svakih 10 s očitava jedno temperaturno stanje na dodirnoj tački između čela alata i gornje površine zavarivanih ploča. Korišćenjem *Therma CAM Quik Report 1.1* softvera na IC detektoru novije generacije sačinjene su slike rezolucije 640 x480 piksela. To je omogućilo izradu termograma za svaku od snimanih tačaka od početka uranjanja alata u zavarivane ploče do izvlačenja alata nakon zavarivanja uzorka.

3.4 Ispitivanje metodama bez razaranja

Rezultati ovih ispitivanja, izvedenih nakon mjerenja nivoa vrijednosti dinamičkih reaktivnih parametara, podijeljeni su u tri grupe. Na ispitivanja površinskih grešaka lica i korjena MŠ metodom vizuelnog pregled (VT) i penetrirajućim crvenim tečnostima (*red dye*) (PT), dok su u cilju identifikacije zapreminskih grešaka svi uzorci ispitani rendegenografski (RT). Zbog male

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

debljine ploča veoma osjetljiva i pogodna metoda ultrazvučne defektoskopije (UT) nije primjenljiva.

3.4.1 Vizuelni pregled uzoraka (VT)

Nakon zavarivanja sve eksperimentalne ploče ispitane su metodama bez razaranja. Učinjen je pregled golim okom, dodirom i lupom sa uvećanjem $\times 10$ po standardu EN ISO 17637:2011, a ocijenjene na osnovu stadarda EN ISO 5817:2014-nivo C i EN ISO 2529-2. Korišćena je lupa čiji je izgled prikazan na slici 3.24.



Slika 3.24 Izgled lupe korišćene za vizuelnu kontrolu uzoraka

3.4.2 Ispitivanja uzoraka penetrantima (PT)

Kako vizuelni pregled uzoraka nije pouzdana metoda za identifikaciju potencijalno mogućih grešaka tipa nedovoljnog „provara“-nedostajućeg korjena zavara, saglasno standardu ispitivanja EN ISO 35452-1:2013 i na osnovu nivoa prihvatljivosti grešaka EN ISO 23277:2004, uzorci su sa korjene strane zavara testirani penetrirajućim sredstvima. Korišćeni su odmašćivač, penetrant, razvijač i čistač proizvođača *Mr Chemie GmbH* Germany, slika 3.25. Vrijeme testiranja iznosilo je 20 min na ambijentalnoj temperaturi, prema EN ISO 25239-5, kao i na licu MŠ bez obzira na vizuelni pregled i pregled dodirom kože prsta.

U ispitivanjima ovom metodom primijenjeni su tečni penetranti prikazani na slici 3.25.



Slika 3.25 Set penetranata za ispitivanje zavarenih spojeva

3.4.3 Ispitivanja uzoraka rendgenskim zračenjem (RT)

Prozračivanje svih uzoraka urađeno je u Zavodu za zavarivanje Beograd uređajem prikazanim na slici 3.26. Cilj ove tehnike ispitivanja je da se potvrdi ili otkloni potencijalno moguće postojanje zapremskih grešaka ili metalnih diskontinuiteta među kojima kod ovog postupka zavarivanja dominara neprihvatljiva šupljina tipa tzv. “tunel“ efekat. Za ispitivanje korišćen je stabilni izvor rendgenskog zračenja *tip RAP 220-5* sa filmom AGFA i sa parametrima: napon struje $V = 80$ kV, jačina struje $I = 4$ mA, vrijeme ekspozicije $t = 55$ s i udaljenost zavarenih uzoraka od izvora $l = 700$ mm. Budući da se zapremske greške isključivo pojavljuju unutar zavarenog spoja,

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

provjera homogenosti rendgenskim zracima neizbježna je metoda kontrole i inspekcije, prema EN ISO 25239-5.



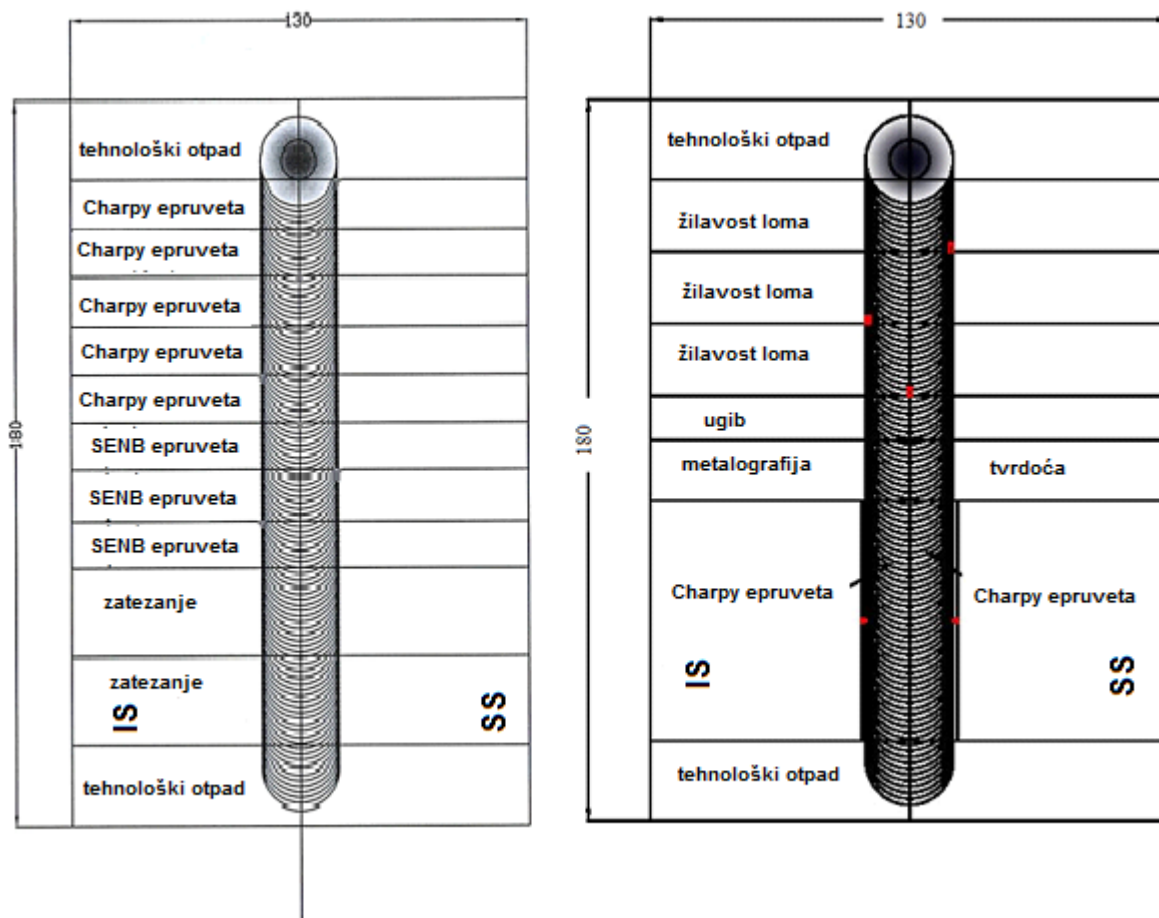
Slika 3.26 Izgled uređaja na rendgenografskom ispitanju prve ploče ET 01

3.5 Mjesta uzorkovanja epruveta za ispitivanja sa razaranjem

Algoritmom postupaka utvrđenih prije početka eksperimenta, ustanovljena je neophodnost da se eksperimentalne ploče poslije zavarivanja ispituju na sobnoj temperaturi metodama bez razaranja. Za rad su uzete samo one eksperimentalno zavarene ploče za koje se procijenilo da uočeni nedostaci neće ugroziti kredibilitet i validnost dobijenih rezultata. Autor je pretpostavio da će se popustljivost radnog stola utvrđena komparaterom tokom vertikalnog opterećenja djelovanjem sile zavarivanja F_z odraziti na kvalitet korjena formiranog MŠ. Nestabilnost parametara procesa zavarivanja na početku i neizbježna rupa od trna alata u MŠ na kraju procesa zavarivanja produkuju tehnološki otpad $2 \times 15 \times 130$ mm što će korisni prostor za ispitivanja metodama sa razaranjem svesti na dužinu od 150 mm za jednu ploču. Na slici 3.27 dat je predviđeni preliminarni redosled uzorkovanja epruveta za ispitivanja sa razaranjem ploča zavarenih postupkom ZTM za jednu od 16 eksperimertalnih tačaka.

Na predviđeni način uzorkovane su sve eksperimertalno zavarene ploče, izuzev ploča ostavljenih za ispitivanje zaostalih napona koja nijesu predmet ovog rada.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.27 Prvobitni redosled uzorkovanja epruveta za ispitivanja metodama sa razaranjem

3.6 Karakterizacija zavarenih spojeva

3.6.1 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja zavarenih spojeva sastoje se od analize makrostrukture i mikrostrukture karakterističnih zona MŠ (jezgro MŠ - grumen” zona, preostala oblast ZTMU, ZUT i OM) u svih 16 eksperimentalno zavarenih uzoraka. Četiri preostale ploče zavarene sa alatom tip E (“nulto” stanje ET 17, ET 18, ET 19 i ET 20) ostavljene su drugim istraživačima za ispitivanja zaostalih napona. Svih 16 zavarenih eksperimentalnih ploča metalografski su ispitane, a za prezentaciju u radu odabrane su ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13. Grupe od po četiri ploče zavarene su sa različitim tipovima alata (A, B, C i D) i sa istim odnosom broja obrtaja alata i brzine zavarivanja $n_{alata}/v_{zav} = 10,625$. Ispitivanja su značajna za sagledavanje uticaja promjenljivih parametara zavarivanja na linije tečenja i smjer kretanja materijala u ZTMU izloženoj istovremenom kombinovanom djelovanju deformacije i toplote. Cjelokupna metalografska ispitivanja urađena su u Univerzitetskom centru za mikroskopiju u Mariboru.

3.6.1.1 Makro i mikrostruktura zavarenih spojeva

Ova ispitivanja izvedena su skladu sa standardom EN 1321 (ISO 17639). Da bi se eliminisao uticaj toplote na strukturu uzoraka, epruvete su uzorkovane u normalnom smjeru u odnosu na zavareni spoj i obrađene skidanjem strugotine. Nakon toga epruvete su višefazno brušene brusnim papirom: prvo grubim hrapavosti p320 i na kraju finim brusnim papirom hrapavosti

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

p4000. Priprema za metalografiju, između ostalih, izvršena je na uređaju čiji je izgled prikazan na slici 3.28.



Slika 3.28 Izgled uređaja za metalografsku pripremu uzoraka

Analiza makrostrukture u cilju sagledavanja geometrijskog oblika i pozicija zone “grumena”, ZTMU, ZUT i OM, kao i raspoznavanja forme i smjera pravca prostiranja rukavca, izvedena je na optičkom mikroskopu *Nikon tip Epiphot 300* sa sistemom za akviziciju slika i njihovu obradu, slika 3.29.

Primijenjen je reagens: 45ml HCL, 15ml NHO₃, 15ml HF i 25ml H₂O koji se tokom prethodnih proba eksperimenta pokazao najboljim za otkrivanje i razvoj makrostrukture.



Slika 3.29 Izgled mikroskopa Nikon tip Epiphot 300 sa pratećom opremom za metalografska ispitivanja zavarenih spojeva

Za identifikaciju karakterističnih zona MŠ, odnosno mikrostrukture i praćenje toka materijala tokom haotičnog kretanja oko i ispod čela alata, korišćen je reagens koji sadrži 5% HCL+2%HF+93% etanola. Na slici 3.30 prikazana je makrostrukturna mapa sa identifikacijom karakterističnih mjesta za raspoznavanje jezgra MŠ-ZG (zone “grumena”) unutar ZTMU, ZUT i OM.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

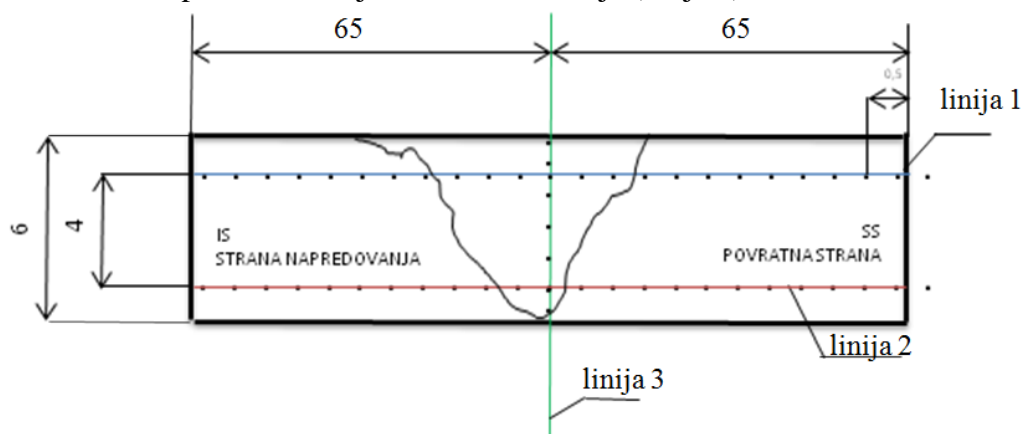


Slika 3.30 Prikaz makrostrukture mape MŠ u jednoj od eksperimentalnih tačaka sa identifikacijom mjesta za ispitivanje mikrostrukture (a –zona “grumena”, b-ZTMU, c-ZUT i d-OM)

Krajnji cilj razvoja mikrostrukture je analiza promjene očekivane rekristalizacije zrna u funkciji od količine unijete toplote direktno zavisne od parametara zavarivanja, naročito u jezgru sa rukavcem unutar ZTMU, a mnogo manje u prelaznoj oblasti prema ZUT.

3.6.1.2 Distribucija i profil tvrdoće strukturnih sadžaja MŠ

Identifikacija mjernih mjesta za određivanje tvrdoće definisano je standardom EN 1043-1 (ISO 9015-2) na epruvetama koje su korišćene za razvoj makrostrukture. Na ovaj način određene su linije mjerenja na udaljenosti od po 1 mm ispod gornje i iznad donje površine uzoraka na strani napredovanja i na povratnoj strani OM i MŠ (linija 1 i linija 2). Obuhvaćenim svim strukturnim sadržajima zavarenih spojeva otvaraju se mogućnosti uvida u raspodjelu i profil tvrdoće u OM i MŠ - jezgra odnosno zoni “grumena” MŠ u vertikalnom pravcu, jer je mjerenje izvršeno po liniji koja je normalana na prethodne dvije horizontalne linije (linija 3), slika 3.31.



Slika 3.31 Shematski prikaz mjernih mjesta za određivanje tvrdoće poprečnog presjeka MŠ i OM

Za mjerenje tvrdoće primijenjena je metoda *Vickers HVI* (sila utiskivanja 9,807 N, vrijeme utiskivanja 15 s) na stabilnom digitalizovanom uređaju tip *Shimadzu HVM 2000* i uređaju tip *ZWICK 3202*, slika 3.32.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.32 Izgled uređaja za mjerenje tvrdoće tip Shimadzu HVM 2000 i tip ZWICK 3202

Udaljenost između susjednih otisaka u obje ravni iznosila je 0,5 mm. Dužina zone mjerenja je 20 mm lijevo i desno od centra MŠ čime su obuhvaćeni svi strukturni konstituenti zavarenog spoja (više od četiri debljine uzorka). Ukupan broj otisaka u horizontalnoj ravni iznosio je 118, odnosno 11 u vertikalnoj ravni. Izvršeno je osrednjavanje dobijenih vrijednosti u sve tri ravni, a na dijagramima su prikazani grafikoni dobijeni po liniji 1 i liniji 2 (obje horizontalno) i liniji 3 (vertikalno), kao i zbirni grafikoni profila tvrdoće poprečnog presjeka za po četiri tačke eksperimenta realizovanih zavarivanjem sa alatima A, B, C i D.

3.6.2 Mehanička ispitivanja zavarenih spojeva

Ispitivanje mehaničkih osobina OM i zavarenih spojeva izvedeno je jednoosnim zatezanjem epruveta uzorkovanih poprečno na pravac zavarivanja, slika 3.27. Potreba za detaljnijim ispitivanjima ukazala se nakon testa penetrirajućim tečnostima (PT) i metalografskih ispitivanja poprečnog presjeka MŠ kada su registrovane mjestimične dionice sa nedovoljnom penetracijom na liniji sastavljanja ploča. Preliminarno utvrđeno nesaglasje između podataka o mehaničkim osobinama proizvođača osnovnog materijala EN AW 7049A T652 sa kojima je autor raspolagao prije početka eksperimentalnog zavarivanja i podataka Laboratorije za varilstvo Fakulteta za strojništvo u Mariboru u kojoj su izvršena mehanička i ispitivanja mehanike loma, dodatno je uvećalo obim ovog istraživanja.

Na slici 3.33 prikazani su podaci na osnovu kojih je sačinjena **HIPOTEZA 3** o zateznoj efikasnosti zavarenih spojeva.

KOMBINAT ALUMINIJUMA – TIPOGRAD BEZ KONTROLA KVALITETA – METALURŠKI LABORATORIJUM –		REZULTATI MEHANIČKOG ISPITIVANJA			BROJ 54/4	
PROIZVOD	LEGURA	STANJE	STANDARD	LIVACKA SARŽA		
DURČEVINE	PD-33	T.O.	JUS	1232, 1233		
OZNAKA UZORKA	R _m N/mm ²	R _e N/mm ²	A %	HB	Z	
2581-1-3-2	617	574	12,0	169	20,9	
2581-1-3-2	612	555	8,4	179	10,6	
2581-1-3-2	612	—	8,8	179	11,9	
2581-2-3-2	633	571	11,6	185	21,3	
2581-2-3-2	618	—	10,7	179	20,6	
2581-2-3-2	613	—	10,0	174	21,6	
2581-1-3-3	620	570	11,6	174	22,5	
2581-1-3-3	627	580	10,8	169	16,4	

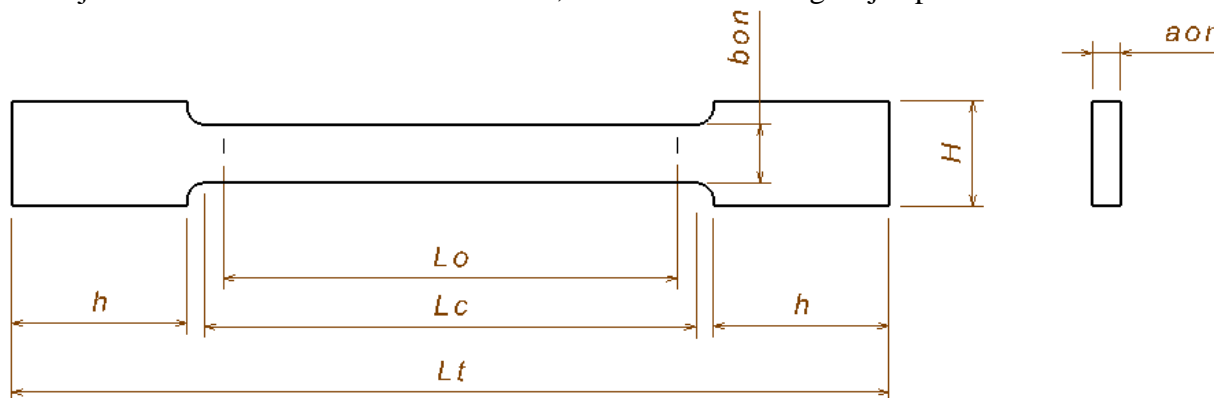
Slika 3.33 Rezultati mehaničkih ispitivanja proizvođača legure EN AW 7049A T 652 [253]

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Ovdje je dat detaljniji postupak određivanja na sobnoj temperaturi zateznih karakteristika uzoraka OM i zavarenih spojeva (ET 01 – ET 16) kao cjeline ostvarenih sa različitim tipovima alata A, B, C i D pri odnosu $n_{alata} / v_{zav} = (10,625 - 14,1)$, respektivno.

3.6.2.1 Geometrijski oblik epruvete iz OM za ispitivanje jednoosnim zatezanjem

Da bi se mogla utvrditi efikasnost spoja $\varepsilon = R_{mM} s / R_{mOM}$ kao mjera uspješnosti kvaliteta zavarenih spojeva, određene su zatezne čvrstoće na epruvetama sa paralelnim bokovima. Posljednjih godina jedan broj istraživača u kontekst kvaliteta zavarenih spojeva uvrštava i odnos napona tečenja i tvrdoće MŠ i OM [254]. Na slici 3.34 prikazan je izgled i dimenzije epruvete za ipitivanje statičkih karakteristika OM uzorka, a na slici 3.35 fotografije epruveta.



Slika 3.34 Dimenzije epruvete za ispitivanja jednoosnim zatezanjem

Dimenzije epruvete iz OM su prikazane u tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Dimenzije epruvete iz OM

Mjesto	a_{0n} [mm]	b_{0n} [mm]	H [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L_c [mm]	L_t [mm]
OM	5,90	10,00	18,00	36,00	45,00	48,00	120,00



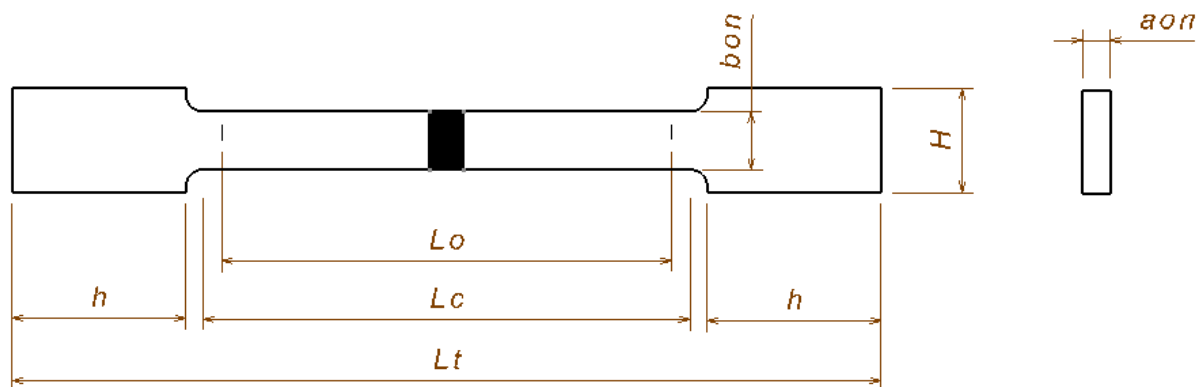
Slika 3.35 Fotografije epruveta za statička ispitivanja osnovnog materijala

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.6.2.2 Geometrijski oblik epruvete za ispitivanje mehaničkih osobina MŠ

Iz zavarenih ploča u 16 tačaka eksperimenta poslije ispitivanja IBR u skladu sa pregledanim nalazima i planu uzorkovanja, odabrani uzorci su mašinski obrađeni CNC glodanjem na konačne mjere date na slici 3.36.

U ispitivanju statičkih karakteristika jednoosnim zatezanjem epruveta OM i zavarenog spoja primijenjen je standard EN ISO 6892-1. Crtež epruvete prikazan je na slici 3.36.



Slika 3.36 Geometrijski izgled sa dimenzijama epruvete za jednoosno zatezanje zavarenih uzoraka od ET 01 do ET 16

U tabeli 3.8 su vrijednosti mjera epruveta za statička ispitivanja eksperimentalnih ploča.

Tabela 3.8 Dimenzije epruvete za statička ispitivanja zavarenih spojeva

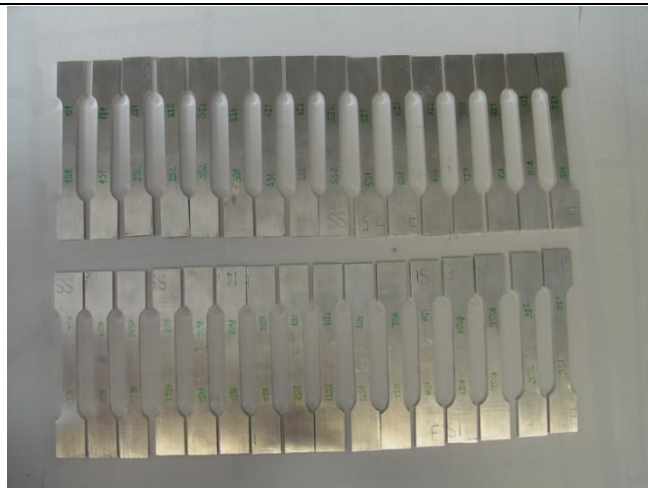
Mjesto	a_{0n} [mm]	b_{0n} [mm]	H [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L_c [mm]	L_t [mm]
ET01	4,80	10,00	18,00	30,00	40,00	45,00	105,00
ET05	4,80	10,00	18,00	30,00	40,00	45,00	105,00
ET09	4,80	10,00	18,00	30,00	40,00	45,00	105,00
ET13	4,80	10,00	18,00	30,00	40,00	45,00	105,00

U tabelama su prikazane vrijednosti mjerne dužine epruvete L_0 koja se dobija iz relacije :

$$L_0 = 5 \times 1,13 \times \sqrt{A_0} \dots\dots\dots 3.1$$

Površina poprečnog presjeka epruvete A_0 dobija se iz proizvoda $A_0 = b_{0n} \times a_{0n}$

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.37 Fotografije epruveta za ispitivanje zateznih karakteristika zavarenih spojeva u ET 01 do ET 16

3.6.2.3 Opis toka ispitivanja jednoosnim zatezanjem OM i MŠ

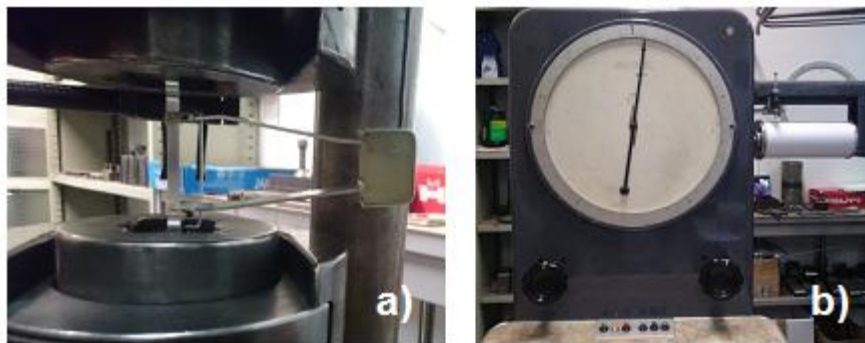
Epruvete se stavljaju između steznih glava-čeljusti kidalice tip *SMITWELD 1405* nominalne sile 10 kN prikazanoj na slici 3.38, od kojih je jedna fiksna a druga se ravnomjerno pomjera jednoosno zatežući epruvetu.



Slika 3.38 Izgled mehaničke kidalice tipa *SMITWELD 1405*

Pomoću analogne jedinice registruje se postepeni trenutni prirast sile preko davača promjene pritiska na indikatoru i trenutna vrijednost izduženja-pomjeranje epruvete na ekstenziometru, slika 3.39 a) i b). Postupak teče do konačnog loma epruvete nakon čega se najčešće vizuelno pregleda stanje polomljenih epruveta, odredi mjesto loma sa aspekta začeca i pravca prostiranja u strukturnom sadržaju zavarenog spoja.

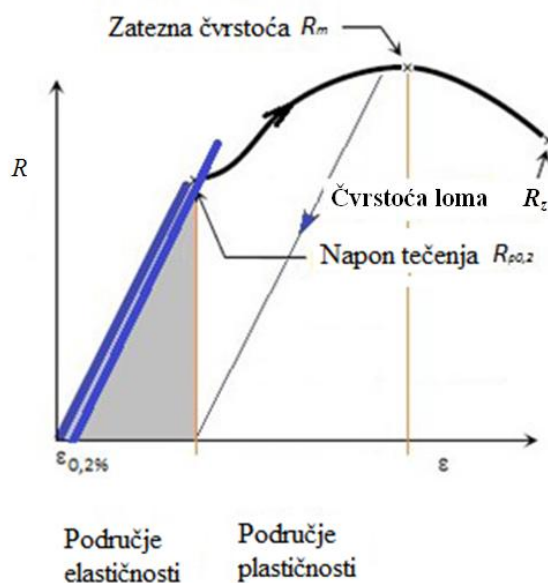
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.39 Fotografije mjerne opreme za registrovanje porasta sile i izduženja epruveta tokom testa na zatezanje [255]

Svi rezultati rasta intenziteta zatezne sile i vrijednosti izduženja epruvete automatski se smještaju u *Excel* datoteku da bi se mogli nacrtati odgovarajući dijagrami zatezanja osnovnog materijala i zavarenog spoja. Te vrijednosti odnosa R - ε dobijene su iz inženjerskog, a ne stvarnog dijagrama. Osnovna razlika je što se kod inženjerskih (konvencionalnih) dijagrama vrijednost istezanja epruvete određuje u odnosu na trenutno pomjeranje i početnu površinu poprečnog presjeka epruvete, a kod stvarnog dijagrama taj odnos se računa u odnosu na trenutno pomjeranje i trenutnu površinu poprečnog presjeka epruvete.

Za razumijevanje postupka sačinjavanja inženjerskih (konvencionalnih) dijagrama (slika 3.40), bitno se osvrnuti na osnovne pojmove iz tehničke mehanike-teoriju plastičnosti i viskoelastičnosti.



Slika 3.40 Osnovna svojstva materijala prikazana u inženjerskom (konvencionalnom) R - ε dijagramu [255]

Dijagram na slici 3.40, iako se elastična deformacija djelimično javlja i u plastičnom području, pokazuje kako sa povećanjem sile raste izduženje epruveta. Početni segment grafikona – *Hookeov* pravac pripada linearnom dijelu krive, odnosno elastičnom području kada epruveta teži da se vrati u prvobitno stanje, odnosno da nestane deformacija nakon prestanka dejstva sile. Upravo taj dio krive je bitan za određivanje modula elatičnosti E , MPa-potrebno za ispitivanja parametara mehanike loma koja su najznačajnija za istraživanu oblast. Granica elastičnosti označava najviše naprezanje do kojeg se materijal ponaša elastično, dok je napon tečenja napon pri kom se epruveta izdužuje bez povećanja njegovog intenziteta $Rp_{0.2}$ (podebljanom plavom

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

bojom obilježeno na dijagramu), odnosno na linearnom dijelu krive postoji dio plastične deformacije - pri $\varepsilon=0,2$ % očitava se napon tečenja $R_{p0,2}$ kao tehnička granica tečenja.

Na osnovu navedenog formirane su jednačine za konvencionalni napon tečenja:

$$R_{p0,2} = \sigma_{YS} = \frac{F_{0,2}}{A_0}, \text{ MPa} \dots\dots\dots 3.2$$

gdje je $F_{0,2}$ -sila pri naponu tečenja, N; A_0 -početna površina poprečnog presjeka epruvete, mm^2 .

Na dijagramu se uočava i napon kod maksimalne sile koji predstavlja zateznu čvrstoću R_m . To nije maksimalni napon nego naprezanje pri maksimalnoj sili, jer površina poprečnog presjeka epruvete kod dostizanja maksimalne sile počinje da se smanjuje, što dovodi da stvarni napon raste iako se sila smanjuje. Zatezna čvrstoća se računa po obrascu:

$$R_m = \sigma_{TS} = \frac{F_m}{A_0}, \text{ MPa} \dots\dots\dots 3.3$$

gdje je F_m - maksimalna sila, N; A_0 -početna površina poprečnog presjeka epruvete, mm^2 .
Mogu se odrediti i dva značajna parametra: izduženje A_5 i kontrakcija Z .

$$A_5 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100, \%, \dots\dots\dots 3.4$$

gdje je ΔL - trajno izduženje epruvete, mm; L_0 - početna dužina epruvete, mm.

Veličina kontrakcije određuje iz relacije:

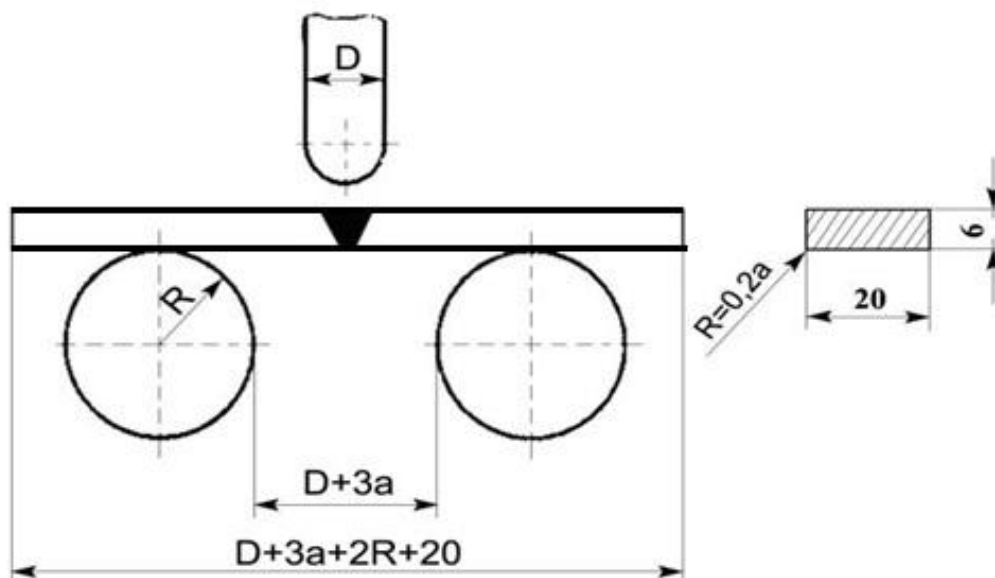
$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100, \% \dots\dots\dots 3.5$$

gdje je A_0 - početna površina poprečnog presjeka, mm^2 , A_u - konačna površina poprečnog presjeka epruvete, mm^2 .

3.6.2.4 Određivanje karakteristika MŠ savijanjem u tri tačke

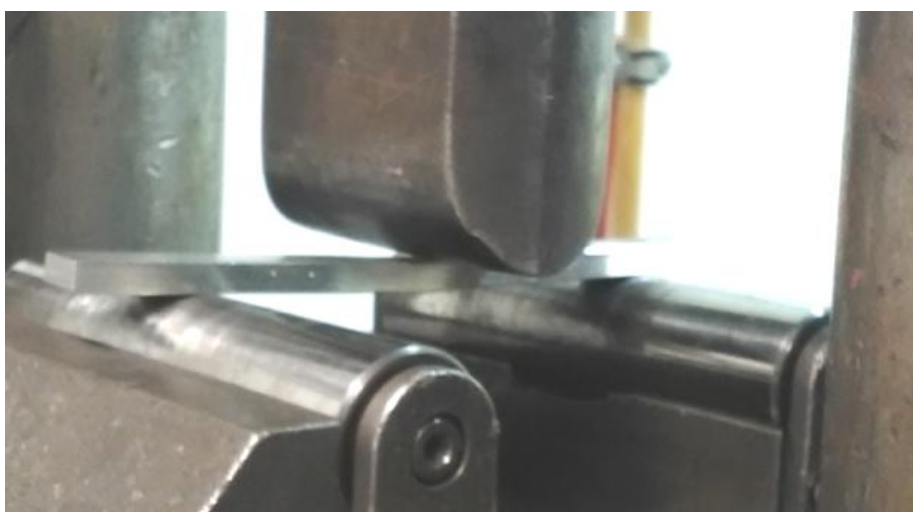
Iako je poznato da legure aluminijuma EN AW 7049A, posebno u stanju T 652, posjeduju loša deformabilna svojstva i malu duktilnost, u cilju određivanja uticaja mjestimičnog nedostatka penetracije na kvalitet zavarenih spojeva, urađene su probe savijanjem epruveta oko lica MŠ. Ispitivanje karakteristika zavarenog spoja na savijanje ispitivano je testom savijanja zavarenog spoja u tri tačke u skladu sa standardom EN ISO 7438. Određivanje savojnih deformacionih sposobnosti zavarenog spoja utvrđeno je na osnovu ugla savijanja epruvete do pojave prsline, a epruvete dimenzija datih na slici 3.41, izrađene su u poprečnom pravcu na zavareni spoj. Epruvete su prethodno mašinskom obradom glodanjem pripremljene za ispitivanje savojnim testom. Parametri savijanja na uređaju za savijanje u tri tačke oko lica MŠ sa konveksnim korjenom su: $D = 20$ mm, $a = 6$ mm, $D + 3a = 38$ mm i $R = 15$ mm.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.41 Shematski prikaz crteža epruvete na uređaju za savijanje

Uređaj za savijanje predviđen je za ispitivanje epruveta do ugla 180° pri čemu se bilježi ugao pojave prsline na korjenu MŠ. Savijanje obavlja trn ravnomjernim dejstvom sile kretanjem prema postolju mašine preko obrtnih cilindričnih oslonaca, slika 3.42.



Slika 3.42 Izgled epruvete tokom testa savijanja u tri tačke

3.6.2.5 Određivanje energije udara i udarne žilavosti

Imajući uvidu područje primjene legure aluminijuma visoke čvrstoće EN AW 7049A u stanju T 652 (komponente borbenih vozila i ubojnih sredstava) potreba je kontinualnog registriovanja odnosa energije E i vremena s , odnosno sile F i vremena s tokom testa savojnim udarnim opterećenjem na Charpy uređaju.

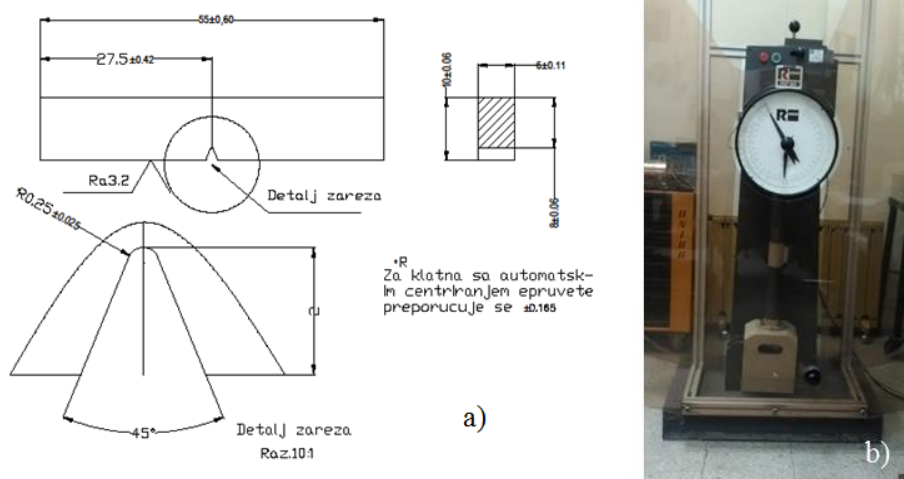
3.6.2.5.1 Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom

Praćenje promjene sile i vremena stvara uslove za donošenje ocjene o tome da li je lom rezultat dejstva sile malog intenziteta tokom dužeg trajanja ili je lom posledica kratkog dejstva sile visokog intenziteta. Ispitivanje parametara energije udara i udarne žilavosti izvršeno je na sobnoj

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

temperaturi na nestandardnim epruvetama dimenzija 55 x10 x 6 mm, slika 3.43 a), prema standardima EN ISO 10045-1 i EN ISO 875 (ISO 9016).

Epruvete su uzorkovane poprečno na pravac zavarivanja u skladu sa prethodnim planom uzorkovanja. Ispitivanje je izvedeno na instrumentalizovanom *Charpy* klatnu tip *AMSLER RKP 300* nominalne energije 300J i brzinom kretanja čekića od 5,5 m/s do 7 m/s, slika 3.43 b). Ovo klatno posjeduje mjerač sile u čekiću, detektor vremena, mjerač deformacije sa pojačivačem i osciloskopom povezanim sa računarom koji daje podatke o ukupno utrošenoj energiji koja je potrebna za prelom epruvete E_u , odnosno energiji koja se troši da se inicira prslina E_i i da propagira prslina E_p . Potencijalno mogući uticaj toplote na svojstva metala zavara eliminisan je mašinskom obradom. Položaj zarezata određen je na osnovu makroskopskog uvida u strukturu MŠ kako bi se što tačnije definisao položaj vrha zarezata. Sagledavanje uticaja varijacije pomenutih parametara zavarivanja sa zarezima u MŠ (grumen "zoni" i dva različita mjesta u ZTMU – na istosmjernoj strani, odnosno strani napredovanja alata ("4", "8") i dva mjesta na suprotnosmjernoj, to jeste povratnoj strani ("4", "8"). Cilj ispitivanja je ocjena krtosti legure ENAW 7049A pri dinamičkom opterećenju, odnosno o njenoj sposobnosti da apsorbuje energiju prije nego se polomi. Epruveta se nalazi centrično postavljena između oslonaca međusobno udaljenih 40 mm, teg udara suprotno od strane zarezata tačno po njegovoj osi. Lom epruvete nastaje jednim udarcem. Prvo je ispitana udarna žilavost i udarna energija OM kako bi se kasnije mogla izvršiti uporedna analiza sa podacima dobijenim za MŠ. Sve epruvete polomljene su u navedenim mjestima postavljanja zarezata. Za prezentaciju u radu odabrane su eksperimentalne tačke ET 01, ET 06, ET 11 i ET 16 zavarene sa alatima tip A, B, C i D sa promjenljivim odnosima $n_{alata}N_{zav} = (10,625; 12,5; 9,375; 14,1)$ pri ambijentalnoj temperaturi, respektivno.



Slika 3.43 a) geometrija nestandardne epruvete V2 za određivanje energije udara, b) izgled instrumentalizovanog uređaja tip AMSLER RKP 300 za Charpy ispitivanja

Ispitivanje je obavljeno u zaštitnoj komori na temperaturi od 23 ± 5 °C. Izgled epruvete za ispitivanja OM na *Charpy* klatnu dat je na slici 3.44.



Slika 3.44 Izgled epruvete za Sharpy ispitivanja iz osnovnog materijala EN AW 7049A T 652

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Na slici 3.45 prikazana je fotografija polomljene epruvete nakon Charpy ispitivanja OM. Na slici 3.46 su fotografije polomljenih zavarenih epruveta sa zarezom 4 mm udaljenom od centra MŠ na povratnoj strani, a na slici 3.47 fotografije nakon preloma u zrezu udaljenom 8 mm takođe na povratnoj strani MŠ.



Slika 3.45 Polomljena Charpy epruveta iz osnovnog materijala EN AW 7949A u stanju T652



Slika 3.46 Izgled polomljenih epruveta u svim tačkama eksperimenta nakon Charpy testa sa zarezom udaljenim 4 mm od centra na povratnoj strani MŠ



Slika 3.47 Izgled polomljenih epruveta u svim tačkama eksperimenta nakon Charpy testa sa zarezom udaljenim 8 mm od centra na povratnoj strani MŠ

3.7 Ispitivanje žilavosti loma

Oko vrha prsline kod većine konstrukcionih materijala razvija se područje plastičnih deformacija zbog čega primjena kriterijuma linearno–elastične mehanike loma ima ograničenja u realnim uslovima. Upravo je analiza plastičnog ponašanja materijala na osnovu kriterijuma elasto-plastične mehanike loma uvela postupke za određivanje dva značajna parametra: otvaranje vrha prsline-*CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*) i *J-integrala*. Rice je prvi postavio relaciju za određivanje *J integrala* u najviše slučajeva primijenjenih SENB epruveta za određivanje parametara mehanike loma [255].

Pri tome je stao na stanovištu da ugao okretanja epruvete pri djelovanju sile na sredini njene dužine ne utiče na promjenu dužine prsline. Mogućnost korišćenja oba parametra i njihova analiza nakon razvoja deformacija u plastičnom području otvorila je polje eksperimentalnog internacionalno standardizovanog određivanja ovih parametara. Iz četiri eksperimentalno zavarene ploče, *Zavratnik* je u skladu sa standardom ASTM-E-15a iz 2016.godine, izvršio detaljna analitičko-eksperimentalna statička ispitivanja i ispitivanja žilavosti loma. U eksperimentu korišćen je tip alata B sa promjenljivim odnosom kinematskih parametara $n_{alata} / v_{zav} = (10,625; 12,5; 9,375 \text{ i } 14,1)$ publikovanih u magistarskoj tezi [256].

U disertaciji u potpunosti je preuzet opis i slijed postupka ispitivanja iz magisterijuma i primijenjen za određivanje žilavosnih svojstava zavarenih spojeva ET 01 (zavarenoj sa alatom tip A), ET 05 (zavarenoj sa alatom B), ET 09 (zavarenoj sa alatom tip C) i ET 13 (zavarenoj sa alatom tip D).

Odnos između broja obrtaja alata i brzine zavarivanja bio je konstantan $n_{alata} / v_{zav} = (10,625)$ na sobnoj temperaturi. Ovakav pristup opravdan je sagledavanjem uticaja geometrijskih parametara postupka, odnosno uticaja tipa alata na rast zamorne prsline u zavarenom spoju. Sva ispitivanja urađena su u Laboratoriji za varilstvo Fakulteta za strojništvo u Mariboru.

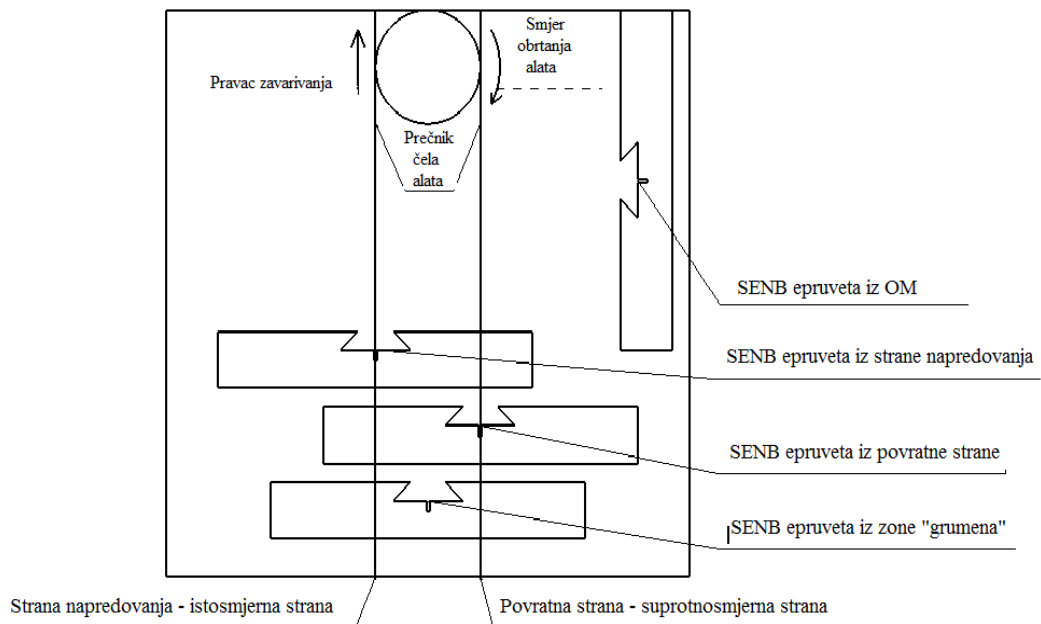
3.7.1 Mjesta uzorkovanja i geometrija SENB epruveta

Od pet vrsta epruveta standardizovanih od strane ASTM u najčešćoj upotrebi za zavarene spojeve su SENB epruvete. Iz eksperimentalnih tačaka ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13 i OM mašinskom obradom pripremljene su po tri SENB (*single-edge notched bend*) epruvete.

One su isječene poprečno u na pravac zavarivanja sa zarezima pozicioniranim: u centru MŠ (zoni “grumena”) suprotno smjeru zavarivanja, na prelazu iz ZTMU prema ZUT-u na strani napredovanja sa zarezom suprotno smjeru zavarivanja i na prelazu iz ZTMU prema ZUT-u na povratnoj strani MŠ suprotno smjeru zavarivanja.

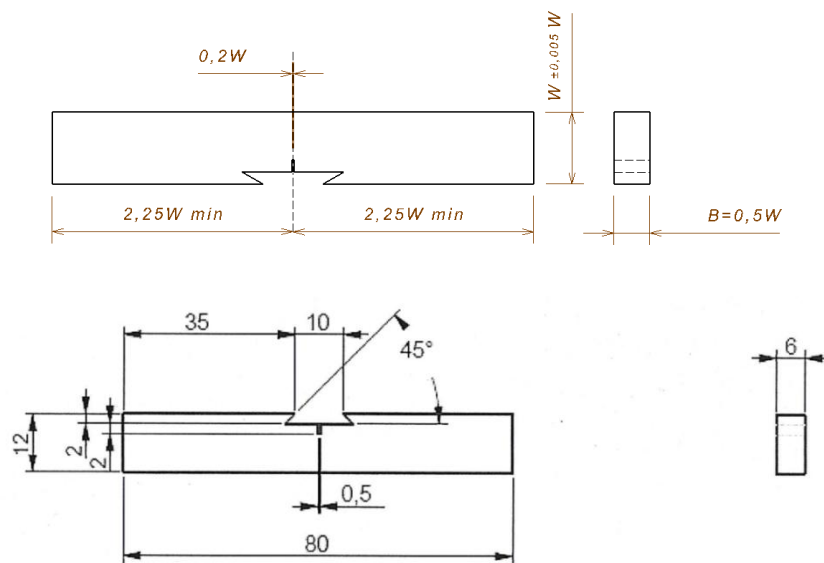
Na slici 3.48 prikazan je način uzorkovanja SENB epruveta iz jedne eksperimentalno zavarene kovane ploče sa smjerovima orijentacije zareza.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.48 Mjesta uzorkovanja SENB epruveta svih 16 ploča spojenih ZTM

Geometrijski crtež SENB epruvete sa mjerama prema standardu ASTM E 1820 dat je na slici 3.49.



Slika 3.49 Osnovne dimenzije SENB epruvete sa definisanim kotama za nominalnu debljinu epruvete

Očigledno je da sve mjere zavise od visine epruvete W , odnosno dužine po kojoj se tokom ispitivanja širi prslina. To je razlog zbog čega je potrebno sve epruvete uraditi u razmjeri, a izmjerene vrijednosti zabilježiti u tabeli 3.9.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tabela 3.9 Osnovne dimenzije SENB epruveta u OM i ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13

Eksp.tačka	W[mm]	B[mm]	S[mm]	a _z [mm]	L[mm]
OM	11,94	5,64	48	3,38	80
ET01-ZG	12,00	4,56	48	4,26	80
ET01-SS	11,93	6,21	48	4,37	80
ET01-IS	11,97	6,24	48	4,38	80
ET05-ZG	11,90	5,79	48	4,39	80
ET05-SS	11,96	5,82	48	4,49	80
ET05-IS	11,96	5,81	48	4,29	80
ET09-ZG	12,00	5,88	48	4,31	80
ET09-SS	11,99	5,87	48	4,28	80
ET09-IS	11,97	5,86	48	4,27	80
ET13-ZG	11,98	5,96	48	4,36	80
ET13-SS	11,99	5,86	48	4,34	80
ET13-IS	12,00	5,95	48	4,33	80

Legenda: ZG - zona "grumena" u centru MŠ; SS - suprotnosmjerna strana adekvatna povratnoj strani MŠ; IS - istosmjerna strana adekvatna strani napredovanja

U tabeli 3.9 navedenim simbolima obilježene su sledeće dimenzije: W -visina epruvete, mm; B -debljina epruvete, mm; S -rastojanje između oslonaca, mm; a_z - dužina početnog zareza, mm i L -dužina epruvete, mm.

3.7.2 Početak procedure pripreme za ispitivanja žilavosti loma

Kada se upotrebljava samo jedna SENB epruveta, kao što je slučaj u ovom radu, koristi se metoda rasterećenja, odnosno epruveta se periodično i sukcesivno (parcijalno) rasterećuje pri čemu se evidentira linija oprerećenje - pomjeranje. Budući da je rasterećenje elastično dobija se vrijednost popuštanja, što omogućava utvrđivanje dužine prsline. U krajnjem cilju, određuje se kriva otpornosti loma koja važi samo za ispitivano mjesto u OM ili MŠ. Suština svih eksperimentalnih metoda, u osnovi, određivanja stabilnog rasta prsline do pojave loma jeste da se epruvete prije ispitivanja zamorno "načnu", odnosno da se tzv. ponavljajućim opterećenjem zada početna prsline na samom vrhu mašinski izrađenog zareza, što sve zajedno čini početnu dužinu prsline a_0 . Zavisno od vrste epruvete koja se koristi određuje se karakteristika zamora kada je potrebno dodati bočne zljebove po strani epruvete kao garancija ravnomjernog širenja epruvete tokom zamorne probe. Drugačiji su i postupci utvrđivanja konačne dužine prsline pri kraju ciklusa njenog stabilnog rasta prije loma, naročito kod većeg broja epruveta. Tako, na primjer, čelične epruvete mogu da plamenom oksidiraju pri kraju stabilnog širenja prsline usled čega se pravi diferencijacija po površini prije i poslije konačnog loma ili da se na samom kraju stabilnog rasta prsline epruveta ohladi u tečnom azotu i zatim polomi.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Određivanje parametara žilavosti loma OM i MŠ zavarenih spojeva postupkom ZTM odvija se u tri koraka. Počinje rezanjem oštre prsline žicom prečnika 0,02 mm na uređaju prikazanom na slici 3.50 a), a potom zamaranjem na uređaju tipa *Cractronic Rumul* sa integrisanom konekcijom sa računarom kojim se registruju vrijednosti parametara zamora, slika 3.50 b).



Slika 3.50 a) Naprava za rezanje žicom, b) Uređaj tip *Cractronic Rumul*

Kako bi se prslina posmatrala pod pravim uglom, potrebno je da se područje njenog širenja fino obrusi ručnim brušenjem sa brusnim papirom granulacije p400, slika 3.51 a) i b). Prethodno određena veličina zrna $x=0,06$ mm dobijena je po standardu ASTM 1820 iz odnosa $x=25,4:400$.



Slika 3.51 a) Brusilica za fino brušenje pored SENB epruvete b) izgled okoline prsline na epruveti sa vidljivim bočnim zljebovima

Da bi se odstranio uticaj produkata brušenja na posmatranje i praćenje prsline, zona se očisti prije montaže saglasno pomenutom standardu. Oblikovanje prsline za SENB epruvetu visine 12 mm i debljine 6 mm, standardom je definisano:

$$a_{\min} < a_0 < a_{\max} \dots\dots\dots 3.6$$

gdje je :

$$a_{\min} = 0,45x W \dots\dots\dots 3.7$$

$$a_{\max} = 0,55x W \dots\dots\dots 3.8$$

Očigledno je da prslina mora biti veća od 45% a manja od 55% visine epruvete, što u konkretnom slučaju znači sledeće:

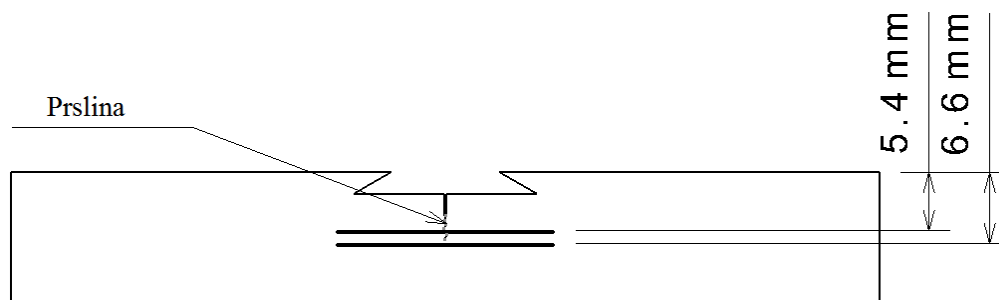
$$a_{\min} = 0,45x W = 0,45 \times 12 = 5,4 \text{ mm} \dots\dots\dots 3.9$$

$$a_{\max} = 0,55x W = 0,55 \times 12 = 6,6 \text{ mm} \dots\dots\dots 3.10$$

$$5,4 \text{ mm} < a_0 < 6,6 \text{ mm} \dots\dots\dots 3.11$$

Prslina ne smije biti kraća od 5,4 mm niti duža od 6,6 mm mjereno od gornje površine epruvete. Lokacija prsline kod zamornog testa data je na slici 3.52 i izvan naznačene zone između žljebova (utora) ne važe postavljene jednačine.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.52 SENB epruveta sa lokacijom dužine prsline između utora na bočnoj strani

Ostvarivanje ovih zahtjeva nije moguće bez obilježavanja definisanih vrijednosti minimalne i maksimalne dužine prsline sa obje strane na samoj epruveti. U te namjene koristi se mjerni alat čiji je izgled sa epruvetom prikazan na slici 3.53.



Slika 3.53 Izgled mjerila sa epruvetom

3.7.3 Opis testa zamornog opterećenja

U računarsku bazu podataka unose se podaci potrebni za pravilno ispitivanje karakteristika ponašanja zavarenog spoja izloženog zamoru. To su vrijednosti faktora intenziteta napona K_I , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ i izmjerene vrijednosti dužine prsline utvrđene između etapnih koraka tokom testa zamora. Prije postavljanja epruvete u prihvatno-stezne glave uređaja za zamaranje, na mikroskopu tip *Leica WILD M 10* utvrđene su dužine zareza sa obje strane epruvete koje su urađene na napravi za narezivanje žicom. Nakon određivanja vrijednosti, prosječne dužine unesene su u računarsku bazu podataka.

Slika 3.54 prikazuje izgled mikroskopa u trenutku mjerenja zareza na epruveti.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.54 Mikroskop tip Leica WILD M10 u trenutku mjerenja zarezna na jednoj od epruveta

Pored podataka o dužini zarezna koriste se podaci o dimenzijama SENB epruveta. Oni su tabelarno prikazani u zavisnosti od odabrane eksperimentalne tačke i mjesta lociranja zarezna, odnosno da li je u pitanju centar MŠ (ZG-zona „grumena”), strana napredovanja (IS -istosmjerna strana) ili povratna strana (SS-suprotnosmjerna strana) MŠ.

U tabeli 3.10 su vrijednosti neophodne za zamorno testiranje zavarenih spojeva.

Tabela 3.10 Veličine osnovnih i izvedenih geometrijskih vrijednosti epruveta

Eksp.tačka	a_z		W	B	$a_{z/w}$	$f(a_{z/w})$	b_{oz}
	[mm]		[mm]	[mm]			[mm]
OM		3,38	11,94	5,64	0,283	1,456	8,56
	ZG	4,26	12,00	4,56	0,355	1,867	7,72
ET01	SS	4,37	11,43	6,21	0,367	1,849	7,69
	IS	4,38	11,97	6,24	0,365	1,838	7,48
	ZG	4,39	11,90	5,79	0,368	1,821	7,51
ET05	SS	4,49	11,96	5,82	0,375	1,851	7,47
	IS	4,29	11,96	5,81	0,358	1,774	7,67
	ZG	4,35	12,00	5,88	0,359	1,858	7,86
ET09	SS	4,28	11,99	5,87	0,356	1,878	7,58
	IS	4,27	11,99	5,86	0,357	1,796	7,67
	ZG	4,36	11,98	5,96	0,363	1,794	7,73
ET13	SS	4,34	11,99	5,86	0,361	1,802	7,82
	IS	4,32	12,00	5,95	0,358	1,812	7,66

Legenda: ZG - zona „grumena” u centru MŠ, SS - suprotnosmjerna strana adekvatna povratnoj strani, IS - istosmjerna strana adekvatna strani napredovanja

3.7.3.1 Jednačine potrebne za proračun žilavosti loma

Na osnovu ovih podataka određuje se maksimalna i minimalna sila F , N - kojom se djeluje pri zamornom opterećenju, poslije čega se može izračunati vrijednost maksimalnog i minimalnog faktora intenziteta napona Ku , $MPa \cdot m^{1/2}$ koji ulazi u program računarske jedinice uređaja za zamor.

Kod proračuna potrebno je utvrditi :

- odnos opterećenja pri maksimalnoj sili koji je prema standardu jednak 1, odnosno:

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}} = 0,1 \dots\dots\dots 3.12$$

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

- maksimalnu silu $F_{max} = 0,55 \times P_m$ određenu iz vrijednosti sile P_m koju se dobija iz jednačine:

$$P_m = \frac{0,5 \cdot b_{oz} \cdot \sigma_Y}{S} \dots\dots\dots 3.13$$

gdje je b_{oz} , mm - razlika dužne i početne prsline $b_{oz} = W - a_z$, odnosno veličina nepolomljenoga ligamenta; σ_Y , MPa - prosječan zatežući napon tečenja; S , mm - rastojanje između oslonaca.

- maksimalni i minimalni faktor intenziteta napona $K_{max/min}$, N/m^{3/2} koji se računa na osnovu jednačine (3.14) gdje se ponovo uzima u obzir odnos opterećenja $R = 0.1$.

$$K_{max} = \frac{F_{maxu} \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a_z}{W}\right) \dots\dots\dots 3.14$$

gdje je F_{max} , N - maksimalna sila dobijena računskim putem; S , mm - rastojanje između oslonaca; $B = B_N$, mm - širina epruvete; W mm - visina epruvete i $f(a_z/W)$ - funkcija oblika epruvete.

- funkciju oblika $f(a_z/W)$ koja se računa se prema:

$$f\left(\frac{a_z}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_z}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_z}{W}\right) \left(1 - \frac{a_z}{W}\right) \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a_z}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a_z}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a_z}{W}\right) \left(1 - \frac{a_z}{W}\right)^{3/2}} \dots\dots\dots 3.15$$

gdje je a_z , mm - dužina početne prsline, a W , mm - visina epruvete.

- razliku između maksimalnog i minimalnog faktora intenziteta napona koji se računa se prema obrascu:

$$\Delta K = K_{maxu} - K_{minu} \dots\dots\dots 3.16$$

gdje je K_{maxu} , MPa*m^{1/2} - maksimalni faktor intenziteta napona, a K_{minu} , MPa*m^{1/2} - minimalni faktor intenziteta napona.

- odnos između maksimalnog faktora intenziteta napona i modula elastičnosti koji iznosi:

$$K/E = \frac{K_{maxu}}{E} \dots\dots\dots 3.17$$

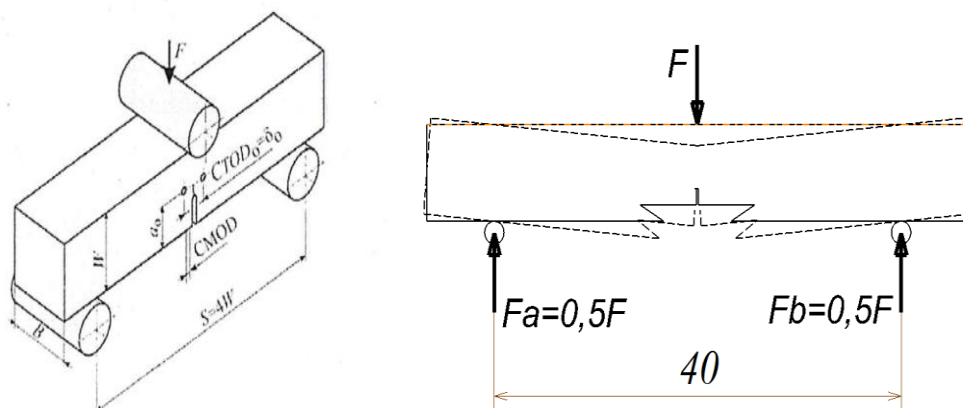
gdje je K_{maxu} , MPa*m^{1/2} - maksimalni faktor intenziteta napona, a E , MPa - modul elastičnosti.

Veoma važno je da se ispitivanja kreću unutar odnosa $K/E = 0,00015$ definisanog procedurama od strane GKSS i određena u standardu ASTM E 1820, jer izvan tog odnosa može doći do nekontrolisanog loma koji nastaje kao posledica formiranja veće plastične zone. Oba momenta savijanja epruvete određuju se takođe po standardu bez obzira na vrstu uređaja za zamaranje. Uređaj za zamaranje tip Cractronic Rumul koristi SENB epruvetu savijanjem u tri tačke pri čemu važi jednačina:

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

$$M_{max} = 20 * \frac{F_{maxu}}{2} \dots\dots\dots 3.18$$

gdje je F_{max} , N - sila kojom se djeluje kod savijanja, a 20 mm je sredina rastojanja između oslonaca, prikazano na slici 3.55 na kojoj su F_a i F_b sile reakcije u osloncima epruvete.



Slika 3.55 Shema dejstva sile na SENB epruvetu savijanjem u tri tačke

Epruveta je postavljena tačno po sredini oslonaca. Za udaljenost među osloncima ili steznim glavama od 40 mm, polovina vrijednosti od 20 mm je fiksna i na jednakim odstojanjima udaljena od pravca dejstva sile. Nakon unošenja podataka, epruvete se izlažu zamoru i poslije svakog pojedinačnog stezanja, podaci se unose u računar zajedno sa oblikom epruvete. Uvršteni podaci odnose se na: visinu W , mm; širinu B , mm; dužinu zarez a_z mm; modul elastičnosti E , MPa i razliku maksimalnog i minimalnog faktora intenziteta napona ΔK , $\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$. Sve vrijednosti za konkretne slučajeve ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13 date su u tabeli 3.11 i unešene u program računarske jedinice.

Tabela 3.11 Vrijednosti parametara za zamorno testiranje epruveta

Eksp.tačka		W [mm]	B [mm]	a_z [mm]	E [MPa]	ΔK [$\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$]
OM		11,94	5,64	3,38	73455	7,5
	ZG	12,00	4,56	4,29	62407	5
ET 01	SS	11,93	6,29	4,36	62407	6
	IS	11,97	6,24	4,31	62407	8,5
	ZG	11,90	5,79	4,39	71738	5
ET 05	SS	11,96	5,82	4,49	71738	6
	IS	11,96	5,81	4,29	71738	8,5
	ZG	11,00	5,88	4,25	71363	5
ET 09	SS	11,99	5,87	4,37	71363	6
	IS	11,97	5,86	4,31	71363	8,5
	ZG	11,98	5,96	4,42	72580	5
ET 13	SS	11,99	5,86	4,39	72580	6
	IS	12,00	5,95	4,36	72580	8,5

Legenda: ZG - zona „grumena”, SS - suprotnosmjerna strana adekvatna povratnoj strani, IS - istosmjerna strana adekvatna strani napredovanja

Kako bi se dužina prsline podjednako širila sa obje strane, SENB epruvete se montažom precizno namještaju po sredini širine epruvete među osloncima, prikazano na slici 3.56 a), a da bi se širila po unaprijed određenom mjestu zarez epruveta se tačno pozicionira i po sredini dužine epruvete, slika 3.56 b).

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.56 Centriranje i montaža SENB epruvete po a) širini b) dužini u prihvatno-steznoj glavi za zamaranje uređaja tip Cractronic Rumul

Nakon pravilnog namještanja epruvete i unešenih parametara zamora ispitivanja mogu da počnu. Tada se bilježe moment i amplitude momenta, kao i frekvencija zamora. Uređaj je podešen da izabere kojom frekvencijom zamarati, tabela 3.11 koja je zavisna od stezanja epruvete i geometrije zarez. Opadanje frekvencije u vremenu označava da se dalje koristi niža frekvencija pri jednakim amplitudama jer se prslina usled zamora povećava. Tada se vizuelnim putem ocjenjuje dužina prsline. Otežani uvid u epruvetu zahtijeva upotrebu optičkih pomagala sa većim povećanjem i ogledalom. Poslije subjektivnog uvida u napredovanje prsline, iznova se parametri unose u računarski program i epruveta postupno izlaže zamoru. U slučaju da se prslina neravnomjerno širi na obje strane epruvete, test se prekida i epruveta okreće sa suprotne strane. Tada prslina raste sa druge strane u mjeri dopuštenog rasta. Dozvoljeno odstupanje od 10% veoma je malo na malim epruvetama. Ono se tada računa pomoću mikroskopa na način što se izmjeri dužina prsline na jednoj i na drugoj strani, a njihova razlika podijeli sa najvećom izmjerenom dužinom prsline na epruveti. Ukoliko je odstupanje veće od 10%, epruveta nije validna za dalja ispitivanja, kao i kada dužina prekorači definisanih 6,6 mm. Ovo je prvi korak u ispitivanju zamora.

3.7.3.2 Ispitivanje SENB epruvete u tri tačke na uređaju za savijanje

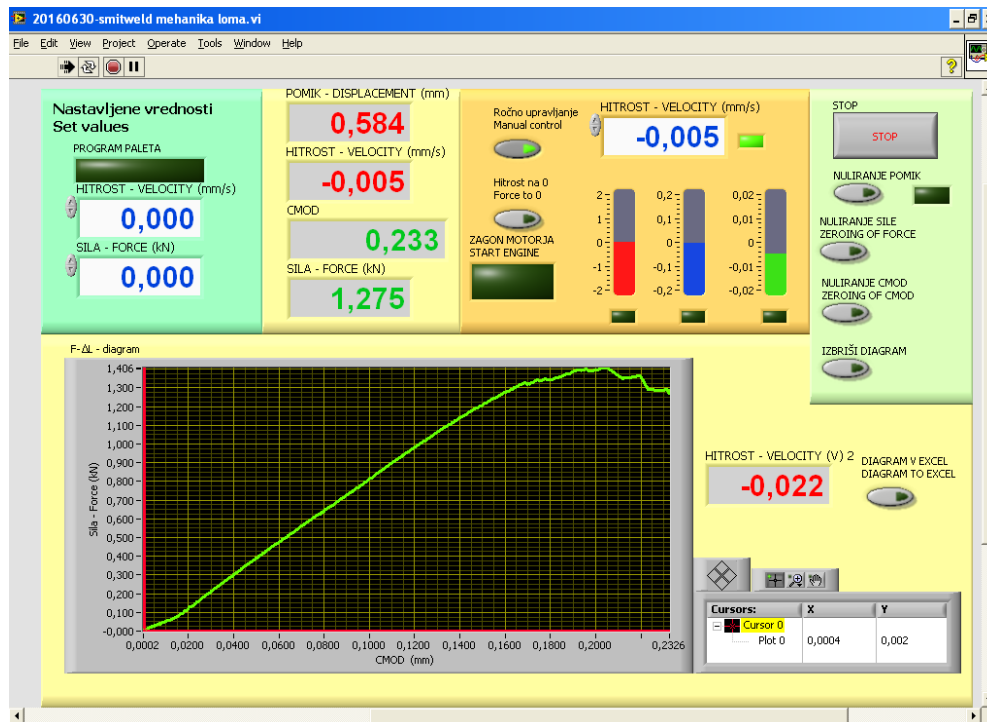
Poslije okončanog testa zamorom SENB epruvete sa prisutnom oštrom zamornom prslinom sa malim plastičnim područjem na njenom kraju, slijedi drugi korak testom savijanja u tri tačke (*thre-point bending*) na uređaju datom na slici 3.57. Test se izvodi takođe u skladu sa standardom *ASTM E 1820*.



Slika 3.57 Kidalica tipa SMITWELD 1405 korišćena za ispitivanja zamorom SENB epruvete opremljena računarskom jedinicom za akviziciju i kontrolu podataka

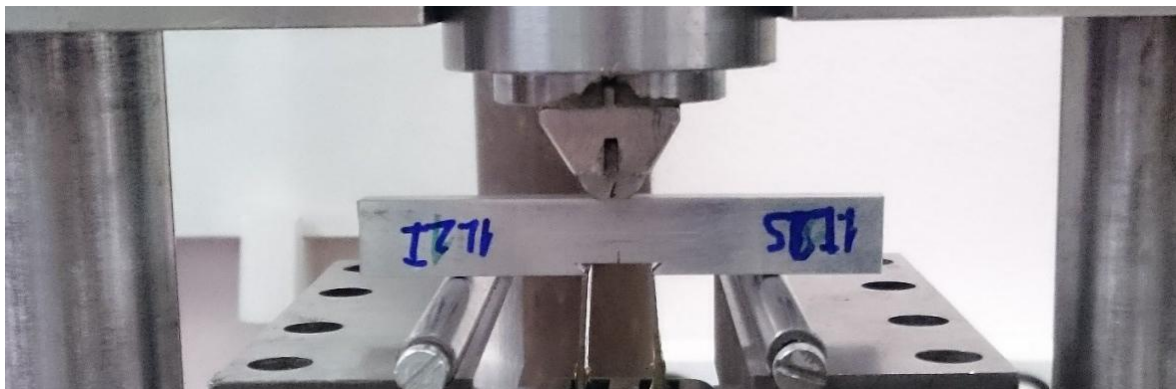
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U računaru se registruju tačke na osnovu kojih se, uz već napisan program u *Lab View*, dobijaju rezultati. Na slici 3.58 prikazan je monitor računara sa programom.



Slika 3.58 Izgled monitora računara sa programom u *Lab View*

SENB epruveta pozicionira se na postolje radnog stola kidalice između dva cilindrična valjka na međusobnoj udaljenosti $S=4*W=4*12 = 48$ mm u skladu sa pomenutim standardom, slika 3.59.



Slika 3.59 SENB epruveta iz ET 01 sa oštrim zarezom u centru MŠ -zoni “grumena” između cilindričnih oslonaca

Veličina otvaranja usta prsline mjeri se na kalibrisanom ekstenziometru. On se kalibriše postavljanjem u uređaj za kalibraciju tako da se za pomjeranje od 1 mm na računaru očitava vrijednost od 1 mm. Na slici 3.60 a) dat je izgled uređaja za kalibraciju ekstenziometra sa ekstenziometrom, dok je na slici 3.60 b) prikazan ekstenziometar nakon kalibracije na radnom stolu mašine tokom ispitivanja prve ispitivane SENB epruvete iz uzorka ET 01 sa zarezom u centru MŠ-zoni “grumena”.

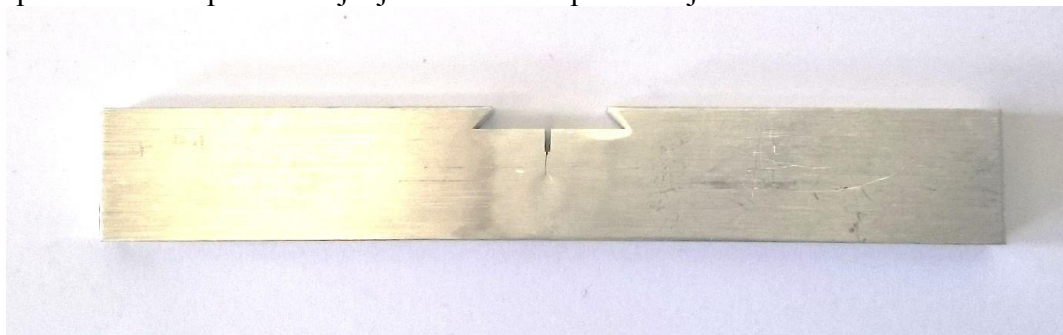
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.60 a) Uređaj za kalibrisanje ekstenziometra, b) Ekstenziometar na mjernom mjestu na vrhovima "lastinog repa" epruvete

Test se provodi bilježeći intenzitet sile kojom se djeluje na epruvetu sa smjerom dejstva u pravcu oštre zamorne prsline i pomjeranje usta prsline između opterećenja. Test traje dok vrijednost sile nakon početnog rasta ne počne opadati. Tada se opterećenje prekida a izmjerene vrijednosti sile i otvaranja prsline registruju se u *Excelovu* datoteku podataka. Ovo je drugi korak na putu određivanja zamornih svojstava.

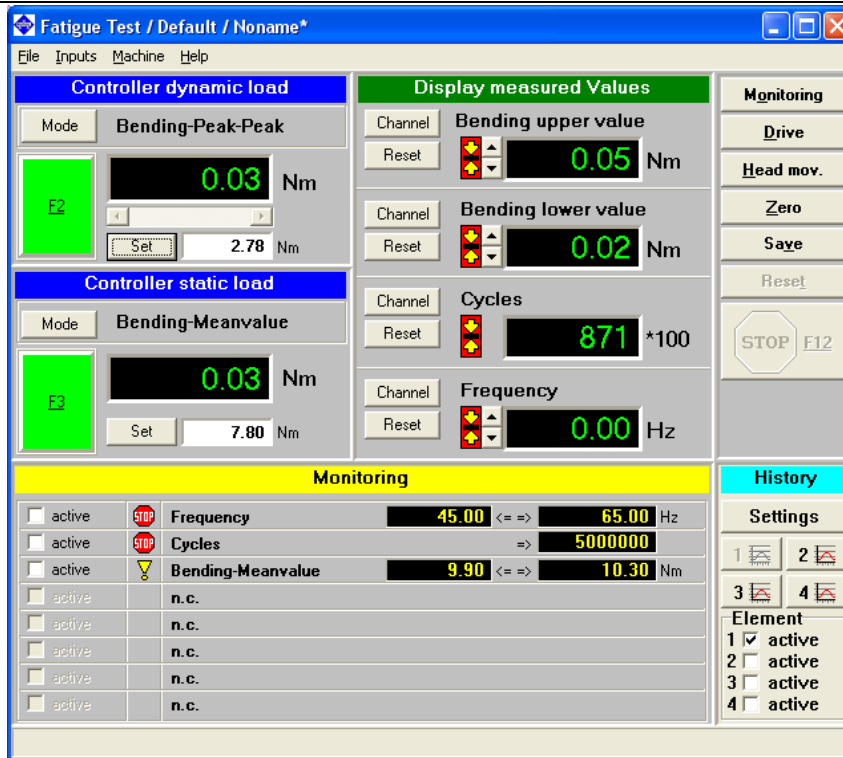
Izgled epruvete nakon probe savijanjem u tri tačke prikazan je na slici 3.61.



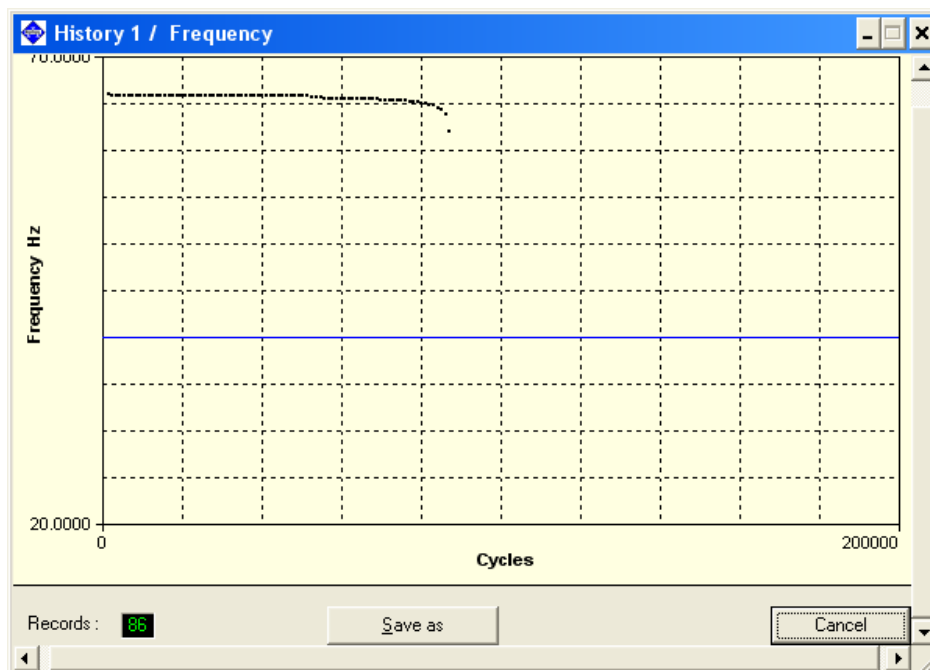
Slika 3.61 Izgled SENB epruvete nakon testa savijanjem u tri tačke

U sledećem, trećem koraku, epruveta se ponovo postavlja na uređaj tipa *Cractronic Rumul* da bi zabilježili koliko se prslina povećala za silu koja je u početku iznosila 40% maksimalne sile pri lomu epruvete. Pošto se prslina ne širi, sila se povećava na polovinu vrijednosti maksimalne sile nastale pri lomu. Intenzitet sile se dobija iz *Excelove* datoteke u kojoj je programirana njena maksimalna vrijednost, slika 3.62 i slika 3.63.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.62 Program na kojem se upravlja zamaranjem na uređaju tipa Cractromic Rumul



Slika 3.63 Promjena frekvencije kod zamora zavarenog spoja

Na kraju testiranja epruveta na zamor one se polome. Na površini preloma izmjere se početna i konačna dužina prsline nastale zamornom probom.

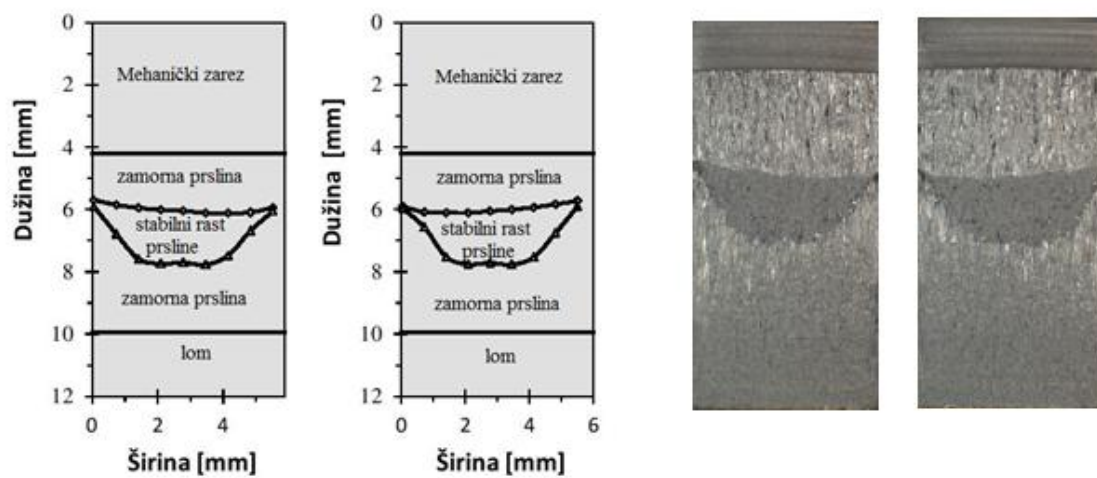
Prosječna vrijednost dužine početne prsline a_0 kroz presjek epruvete omogućava određivanje prosječne vrijednosti rasta prsline Δa na način što se mikroskopski izmjere dužina prsline na devet mjesta po presjeku, slika 3.64.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



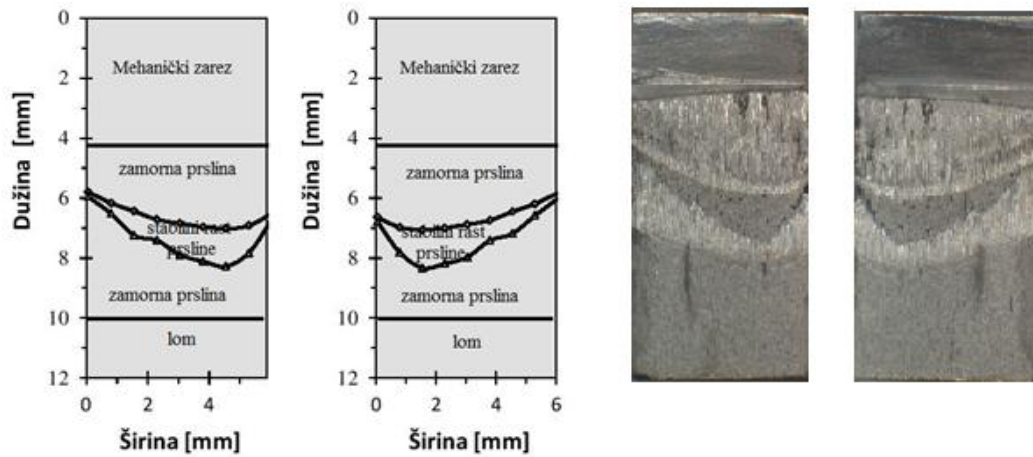
Slika 3.64 Ispitivanje dužine prsline u zoni "grunena" MŠ polomljene SENB epruvete pod mikroskopom u jednoj od eksperimentalnih tačaka

Na slikama 3.65 do 3.69 koje slijede prikazani su dijagrami i fotografije stabilnog i nestabilnog rasta zamorne prsline sa izgledom površine na mjestu loma.

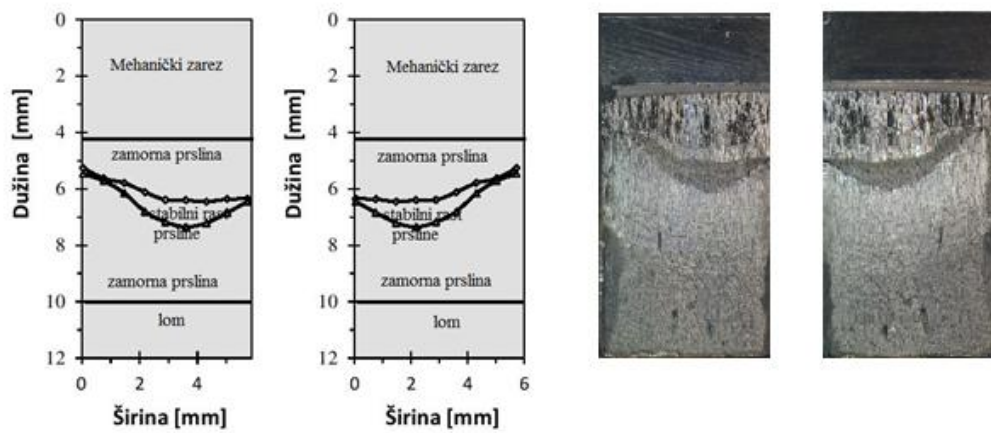


Slika 3.65 Rast zamorne prsline u SENB epruveti iz osnovnog materijala EN AW 7049A T652 sa izgledom epruvete poslije loma

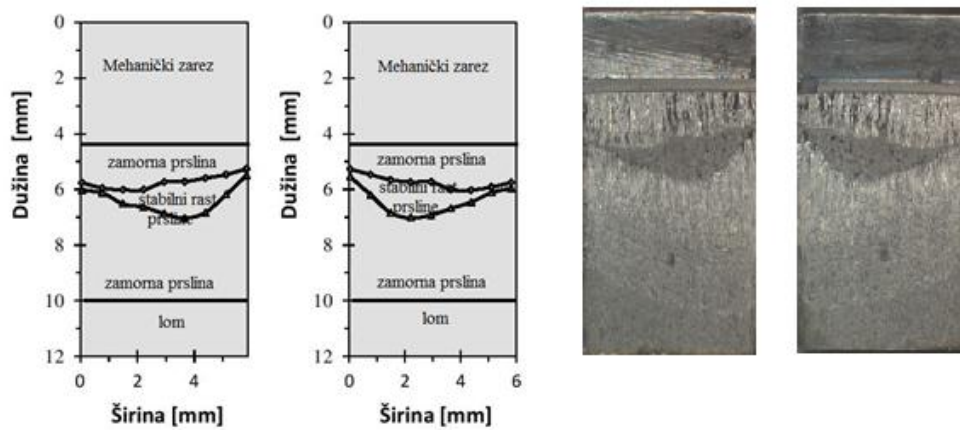
3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.66 Rast prsline u SENB epruveti na povratnoj strani MŠ iz ET 01 (alat tip A, $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹) sa izgledom epruvete poslije loma

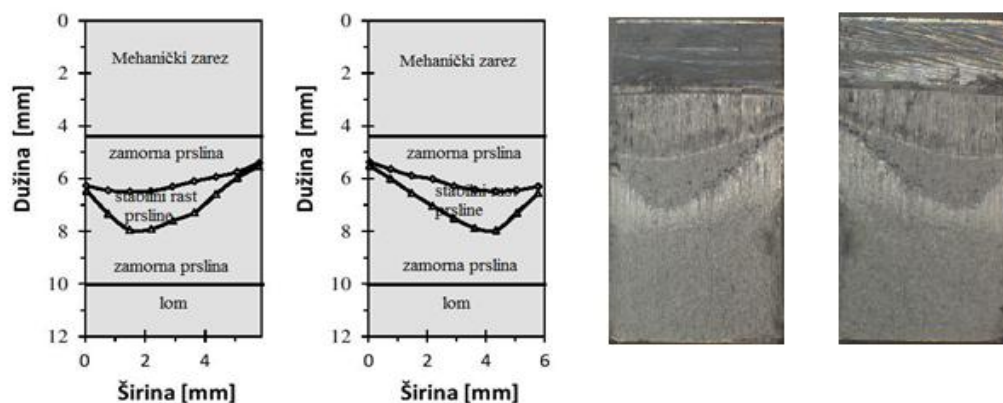


Slika 3.67 Rast prsline u SENB epruveti na povratnoj strani MŠ iz ET 05 (alat tip B, $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹) sa izgledom epruvete poslije preloma



Slika 3.68 Rast prsline u SENB epruveti na povratnoj strani MŠ iz ET 09 (alat tip C, $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹) sa izgledom epruvete poslije preloma

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.69 Rast prsline u SENB epruveti na povratnoj strani MŠ iz ET 13 (alat tip D, $v = 80$ mm/mmm, $n = 850 \text{ min}^{-1}$) sa izgledom epruvete poslije loma

Za ilustraciju prirode i karaktera rasta stabilne prsline do pojave rasta nestabilne prsline odnosno do pojave loma, odabrani su jedan od uzoraka OM legure aluminijuma EN AW 7049A T 652 i po jedan od zavarenih uzoraka iz epruveta ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13. Ostali uzorci, naročito na strani napredovanja alata u MŠ, pokazali su izrazito nestabilno širenje prsline, dok u OM, a posebno na povratnoj strani MŠ, pojavi nestabilnog širenja prsline i loma prethodi period stabilnog rasta prsline.

3.7.3.2.1 Izračunavanje J - integrala

Najvažnije je da programiranje datoteke za vrednovanje rezultata dobijenih “trotačkastim“ eksperimentom sadrži sve podatke do kojih se došlo pomoću izračunatih formula i standardnih preporuka.

Na početku unose se osnovna svojstva epruvete kao što su: visina epruvete W , širina epruvete B , početna dužina prsline a_0 , priraštaj prsline Δa , veličina nepolomljenog ligamenta b_0 , napon tečenja σ_{YS} , zatezni napon σ_{TS} , Poissonov količnik ν i modul elastičnosti E .

Svi potrebni podaci epruveta za osnovni materijal i za eksperimentalne tačke ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13 dati su u tabeli 3.12.

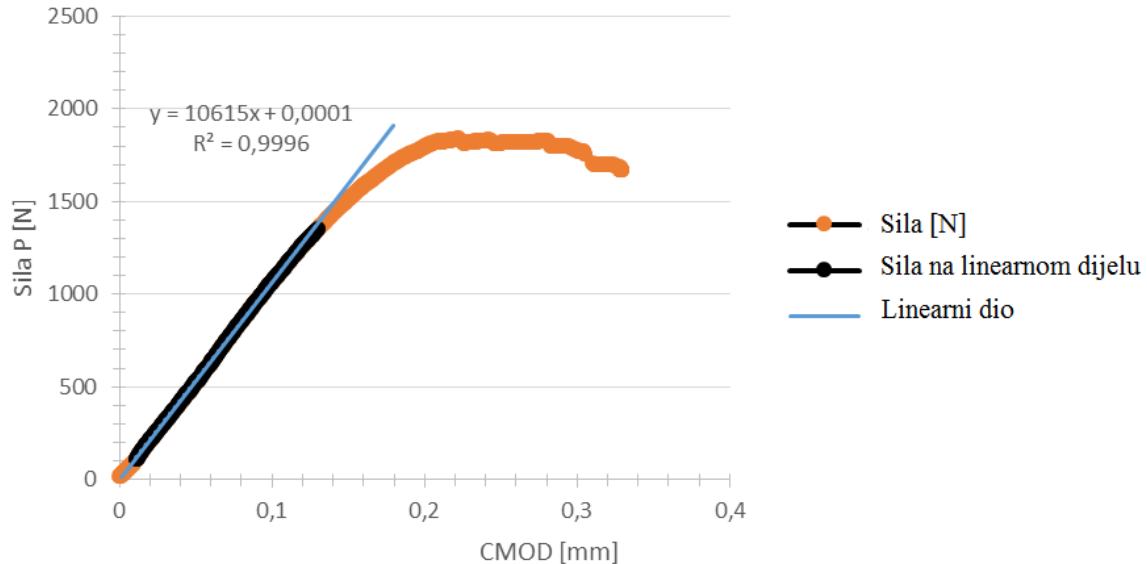
Tabela 3.12 Osnovne geometrijske mjere i mehaničke osobine epruveta za osnovni materijal i četiri eksperimentalne tačke

		W [mm]	B [mm]	a_0 [mm]	Δa [mm]	b_0 [mm]	σ_{YS} [MPa]	σ_{TS} [MPa]	ν [-]	E [MPa]
OM		11,94	5,64	6,024	1,193	5,916	582,03	642,93	0,3	73455
ET 01	ZG	12	4,56	5,989	0,736	5,926	330,4	368,46	0,3	62407
	SS	11,93	6,29	6,022	0,528	5,421	330,4	368,46	0,3	62407
	IS	11,97	6,24	5,765	0,594	6,275	330,4	368,46	0,3	62407
ET 05	ZG	11,90	5,79	6,116	0,604	5,784	342,4	484,84	0,3	71738
	SS	11,96	5,82	6,123	0,532	5,837	342,4	484,84	0,3	71738
	IS	11,96	5,81	5,603	0,610	6,357	342,4	484,84	0,3	71738
ET 09	ZG	11,00	5,88	5,924	0,781	5,962	324,9	358,15	0,3	71363
	SS	11,99	5,87	5,621	0,492	6,391	324,9	358,15	0,3	71363
	IS	11,97	5,83	6,949	0,612	5,625	324,9	358,15	0,3	71363
ET 13	ZG	11,98	5,96	6,258	0,790	5,561	333,3	404,51	0,3	72580
	SS	11,99	5,84	5,721	0,445	6,202	333,3	404,51	0,3	72580
	IS	12,00	5,95	5,886	0,924	5,938	333,3	404,51	0,3	72580

Legenda: ZG - zona „grumena“, SS - suprotnosmjerna strana adekvatna povratnoj strani, IS - istosmjerna strana adekvatna strani napredovanja

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Programiranje počinje kada se potvrdi da su evidentirane sve tačke dobijene tokom testa zamaranjem epruvete i unešene u datoteku. U jednoj koloni su vrijednosti opterećenja P , kN koje se pretvaraju u opterećenje P , N dok su u drugoj koloni vrijednosti otvaranja usta prsline $CMOD$ izmjerene na ekstenziometru na SENB epruveti. Na bazi ove dva podatka crta se dijagram *sila-otvaranje usta prsline* kako bi se sagledao oblik krive za svaku od tačaka testa, slika 3.68.



Slika 3.68 Model dijagrama F-CMOD

Na osnovu dijagrama određuje se linearni dio krive na bazi kojeg se očitava privremena vrijednost K_I koji se potom premješta u model dijagramu $F-CMOD$ do nulte tačke, jer dijagram od početka ne polazi iz ishodišta. Usled toga linearnom dijelu krive dodaje se jednačina krive u obliku:

$$y = k * x + n \dots\dots\dots 3.19$$

kada se početna vrijednost n podijeli sa vrijednošću k to se, zavisno od primjera, dodaje ili oduzima od vrijednosti $CMOD$. Poslije toga izračuna se vrijednost funkcije oblika $f(a_o/W)$ koja je različita kod svake od ispitivanih epruveta. U konkretnom slučaju funkcija oblika epruvete računa se:

$$f\left(\frac{a_o}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_o}{w}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_o}{w}\right) \left(1 - \frac{a_o}{W}\right) \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a_o}{w}\right) + 2,7\left(\frac{a_o}{w}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a_o}{W}\right) \left(1 - \frac{a_o}{W}\right)^{3/2}} \dots\dots\dots 3.20$$

gdje je a_o , mm - dužina prsline, a W , mm - visina epruvete.

Pomoću funkcije oblika moguće je izračunati faktor intenziteta napona $K(i)$, $N/mm^{3/2}$ za svaku tačku testa putem formule: $K(i) = \left(\frac{P(i)*S}{(B*B_N)^{(1/2)}*W^{(1/2)}} \right) * f\left(\frac{a_o}{w}\right) \dots\dots\dots 3.21$

gdje je $P(i)$, N - pojedinačna sila snimljene tačke; S , mm - udaljenost između oslonaca; $B=B_N$, mm – širina epruvete; W , mm – visina epruvete i $f(a_o/W)$ - funkcija oblika.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Određivanje *J-integrala*, N/mm sastoji se od plastičnog i elastičnog dijela iz razloga što se materijal do određene mjere ponaša elastično a nakon toga ponaša se plastično. Do te vrijednosti dolazi se preko otvaranja usta prsline *CMOD* i jednačine krive. U nagibnom linearnom dijelu se *K_i* pomjera od tačke do tačke po dijagramu *F- CMOD* uzimajući u obzir dvije po dvije uporedne tačke. Na taj način obuhvaćene su sve tačke pa se na osnovu njih može odrediti plastični dio otvaranja usta prsline *CMOD* i elastični dio otvaranja usta prsline *CMOD*. Plastični dio *v_{pl}*, mm nalazi se iz jednačine:

$$v_{pl} = - \frac{P - K_i * CMOD}{K_i} \dots\dots\dots 3.22$$

gdje je *P*, N- sila u svakoj od tačaka krive, a *K_i* – koeficijent linearnog dijela jednačine krive.

Nakon dobijanja plastičnog dijela krive, izračunava se elastični dio otvaranja usta prsline *CMOD*, odnosno *v_{el}*, mm:

$$v_{el} = CMOD - v_{pl} \dots\dots\dots 3.23$$

Crtanje dijagrama *F-v_{pl}* otvara mogućnost proračuna površine ispod krive *A_{pl}* koja se određuje pomoću jednačine:

$$A_{pl}(i) = A_{pl}(i-1) + [P(i) + P(i-1)] [v_{pl}(i) - v_{pl}(i-1)] / 2 \dots\dots\dots 3.24$$

pri čemu su takođe posmatraju dvije po dvije tačke da bi izračunala površina između njih.

Prvo se odredi elastični dio *J-integrala* odnosno *J_{el}*, N/mm uz pomoć sledećeg obrasca:

$$J_{el}(i) = \frac{K(i)^2 (1 - \nu^2)}{E} \dots\dots\dots 3.25$$

kod koga je *K(i)*, N/mm^{3/2} - faktor intenziteta napona za svaku tačku; *ν* - Poissonov količnik i *E*, MPa - modul elastičnosti.

Ukupna vrijednost *J – integrala* računa se kada se doda i plastični dio, to jest *J_{pl}*, N/mm prema jednačini iz standarda:

$$J_{pl}(i) = J_{pl}(i-1) + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \left(\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right) \dots\dots\dots 3.26$$

gdje je *b=b₀*, mm –vrijednost nepolomljenog ligamenta; $\eta_{pl(i-1)} = 1,9$ a *B=B_N*, mm - širina epruvete.

Određivanje *J-integrala* značajno je za postupak normalizacije poslije čijeg provođenja se dobijaju elementi krivih otpornosti. Kod postupka normalizacije najznačajnije je posjedovati veću plastičnu zonu i osigurati da epruveta nije krta. U protivnom, kod krutih materijala primjenjuju se druge metode koje tretira standard *ASTM E 399*. Otuda je potrebno najprije izračunati vrijednosti *a_{bi}*, *v' _{pli}* i *P_{Ni}* na osnovu kojih se određuju koeficijenti *a, b, c* i *d* a zatim i korigovanu silu *P_N*.

Proces programiranja odvija se na način da se koristeći *J-integral* izračunaju korigovane dužine prsline *a_{bi}* za svaku pojedinačnu tačku, kako slijedi:

$$a_{bi} = a_0 + \frac{J_i}{2 * \sigma_Y} \dots\dots\dots 3.27$$

gdje je *σ_Y*, MPa – prosječna vrijednost napona tečenja dobijena tokom statičkih ispitivanja,

- potom se vrijednost *v' _{pli}* dobija na osnovu plastičnog dijela *CMOD* i visine epruvete *W*:

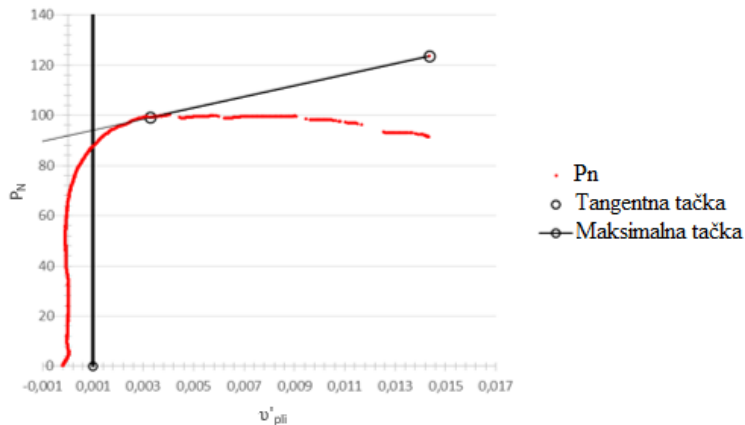
$$v'_{pli} = \frac{v_{pli}}{W} \dots\dots\dots 3.28$$

- na kraju se izračuna pojedinačna sila normalizacije *P_{Ni}* za svaku od tačaka posebno, prema jednačini:

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

$$P_{Ni} = \frac{P_i}{WB \left(\frac{W - a_{bi}}{W} \right)^\eta pl} \dots\dots\dots 3.29$$

Na pomenuti način izračunate su sve vrijednosti postupka normalizacije dovoljne za crtanje model dijagrama $P_N - v'_{pli}$ pomoću koga se obavlja normalizacija, slika 3.69.



Slika 3.69 Model dijagrama $P_N - v'_{pli}$

Na dijagramu se crtaju dvije linije. Jedna je vertikalna linija kod vrijednosti $v_{pli} = 0,001$ po standardu određena, a druga kosa linija je u stvari tangenta na krivu. Tangenta polazi od poslednje tačke u kojoj je najveća dužina prsline do tačke na krivoj. Ova linija varira od slučaja do slučaja i nikada nije pod istim nagibom i u istoj tački. Ove dvije linije definišu broj i raspon tačaka koje će se koristiti u modelu približavanja krive, upotrebljavajući ih u rasponu od vrijednosti $v_{pli} = 0,001$, tačke na krivoj do poslednje tačke ručno dodate u tabeli.

Izabrane vrijednosti v'_{pli} i P_N koje se nalaze u tom intervalu prebacuju se u drugi list *Excel* datoteke i dodaje konačnoj vrijednosti gdje je najveća dužina prsline, koristeći formulu:

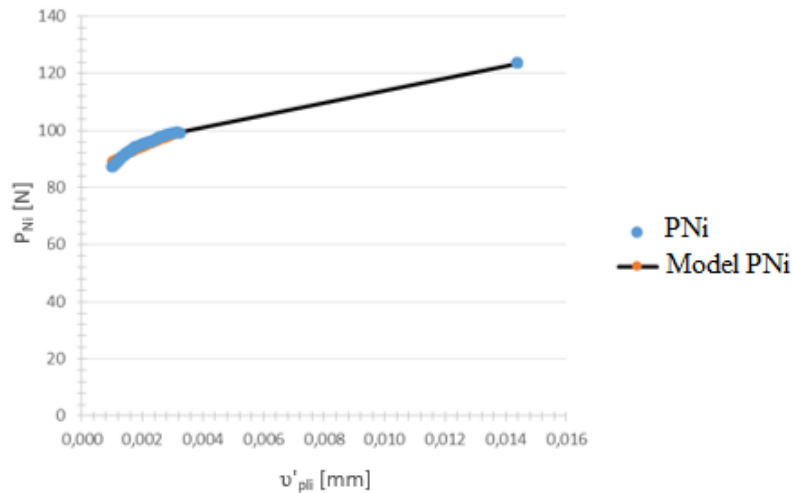
$$y = \frac{(ax + bx + cx^2)}{(d + x)} \dots\dots\dots 3.30$$

gdje je $y = P_{Ni}$, $x = v'_{pli}$ a a , b , c i d su koeficijenti koji se računaju. Posredstvom ove jednačine računa se model za svaku tačku posebno koje se prenose u novi list. U modelu se upotrebljavaju približne vrijednosti koeficijenata a , b , c i d , a prave se vrijednosti utvrđuju naknadnim boljim programom. Aproksimacija (približavanje) obavlja se tako što postoji model za izračunavanje jednačine 3.30 za svaku tačku ponaosob. Odstupanje izmedju sile P_{Ni} i modela sile P_{Ni} se računa po obrascu:

$$Dev = (P_{Ni} - model P_{Ni})^2 \dots\dots\dots 3.31$$

Nakon zbira svih suma program omogućava približavanje pravim vrijednostima koeficijenata a , b , c i d na način što traži najmanju moguću vrijednost zbira odstupanja. Za vrijeme najmanjih vrijednosti zbira odstupanja program je najbliži pravim vrijednostima koeficijenata. Za pravilno izabrane koeficijente crta se dijagram $P_{Ni} - v'_{pli}$ u koji se unosi dijagram *model P_{Ni}* (aproksimativna kriva određena je metodom najmanjih kvadrata) kako bi se sagledalo da li se *model P_{Ni}* dovoljno blisko približio vrijednostima P_{Ni} , slika 3.70.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA



Slika 3.70 Model dijagrama $P_{Ni} - v'_{pli}$

Ovim postupkom dobijaju se približne vrijednosti koeficijenata a , b , c i d kojima se izračuna vrijednost normalizovane sile P_N svake tačke posebno od vrijednosti $v'_{pli} = 0,001$:

$$P_N = \frac{a + b v'_{pl} + c v'^2_{pl}}{d + v'_{pl}} \dots\dots\dots 3.32$$

- koristeći jednačinu 3.29 i izračunate vrijednosti normalizacione sile P_N potrebno je odrediti nove a_i / W svake pojedinačne tačke koristeći samo vrijednosti veće od $v'_{pli} = 0,001$. Nova jednačina ima oblik:

$$\frac{a_i}{W} = 1 - \left(\frac{P_i}{P_{Ni} * W * B} \right)^{\frac{1}{\eta}} pl \dots\dots\dots 3.33$$

- pomoću ove jednačine određuje se vrijednost dužine prsline a_i za svaku tačku, kako slijedi:

$$a_i = \frac{a_i}{W} * W \dots\dots\dots 3.34$$

pri čemu se vrijednost a_i / W određuje iz jednačine 3.33.

- ustanovljavanje vrijednosti Δa vrši se na sledeći način:

$$\Delta a = a_i - a_{(i-1)} \dots\dots\dots 3.35$$

na osnovu koje je očigledno da postoji razlika između dužina prsline svake pojedinačne tačke, pri čemu treba napomenuti da je za $v'_{pli} = 0,001$ određena vrijednost $\Delta a = 0$:

- vrijednost nepolomljenog ligamenta se takođe razlikuje od tačke do tačke, a izračunava se na bazi jednačine:

$$b_o = W - a_i \dots\dots\dots 3.36$$

pa je primjetno da samo razlika u visini W SENB epruveta utiče na dužinu prsline.

Procedura se ponavlja tako što se pvo izračuna faktor intenziteta napona $K(i)$, N/mm^{3/2} koristeći jednačinu 3.21, ali se umjesto univerzalne funkcije oblika $f(a_o / W)$ koristi trenutni oblik funkcije $f(a_i / W)$ svake pojedinačne tačke.

Po sličnoj proceduri izračunava se vrijednost za J -integral, jer se razdvaja elastični od plastičnog dijela. Kao kod jednačine 3.25, J_{el} , N/mm računa se na istovjetan način, s tim da se ovdje $K(i)$ mijenja za postojeću dužinu prsline svake od tačaka.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

- Mala promjena javlja se u računu J_{pl} , N mm kada se koristi sledeća jednačina:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \left(\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right) \right] * \left[\gamma_{pl(i-1)} \left(\frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \right] \dots\dots\dots 3.37$$

gdje su:

$$\eta_{pl(i)} = 3,667 - 2,199 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) + 0,437 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \dots\dots\dots 3.38$$

$$\gamma_{pl(i)} = 0,131 - 2,131 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) + 0,1465 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \dots\dots\dots 3.39$$

Veoma važno je naglasiti da je utvrđena prva vrijednost $J_{pl}=0$ i da je drugačiji račun nemoguć jer ne postoje vrijednosti za $(i-1)$.

- Konačna vrijednost J -integrala sastoji se od elastičnog i plastičnog segmenta svake od pojedinačnih tačaka i računa se iz jednačine:

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \dots\dots\dots 3.40$$

Vrijednost $CTOD-A$ (i), mm krive otpornosti određuje se na stadardom propisan način i povezana je sa vrijednošću J -integrala preko jednačine:

$$\delta_{(i)} = \frac{J_{(i)}}{m_{(i)} * \sigma_Y} \dots\dots\dots 3.41$$

gdje je J -integral podijeljen sa prosječnim zbirom napona tečenja i zatezne čvrstoće, kao i faktora m . Vrijednost σ_Y , MPa računa se iz obrasca:

$$\sigma_Y = \frac{\sigma_{YS} + \sigma_{TS}}{2} \dots\dots\dots 3.42$$

U jednačini (3.42) je σ_{YS} , MPa –napon tečenja, a σ_{TS} MPa - zatezna čvrstoća.

Faktor m nalazi se iz jednačine:

$$m = A_0 - A_1 \left(\frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right) + A_2 \left(\frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right)^2 - A_3 \left(\frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right)^3 \dots\dots\dots 3.43$$

u kojoj su vrijednosti A_0, A_1, A_2 i A_3 računaju:

$$A_0 = 3,18 - 0,22 \left(\frac{a_i}{W} \right) \dots\dots\dots 3.44$$

$$A_1 = 3,18 - 0,22 \left(\frac{a_i}{W} \right) \dots\dots\dots 3.45$$

$$A_2 = 3,18 - 0,22 \left(\frac{a_i}{W} \right) \dots\dots\dots 3.46$$

$$A_3 = 3,18 - 0,22 \left(\frac{a_i}{W} \right) \dots\dots\dots 3.47$$

Gornje jednačine važe samo ako je ispunjen uslov $\sigma_{YS} / \sigma_{TS} \geq 0,5$.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

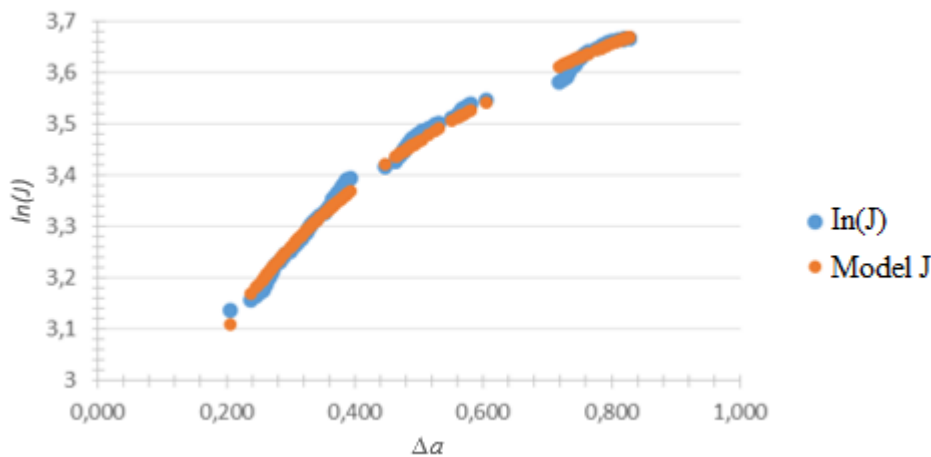
Poslednji čin je crtanje krive otpornosti za *J-integral*. Do nje se dolazi tako što se vrijednostima *J-integrala* određenim odgovarajućim jednačinama, u postupku aproksimacije (približavanja) dodaju koeficijenti C_1 i C_2 u sledećim koracima: prilikom aproksimacije (približavanja) za krivu otpornosti *J-integrala*, vrijednosti se *J-integrala* i $\Delta a = 0,2$ i više, prenose na novi list *Excelove* datoteke. Potom se izračunaju vrijednosti $\Delta a / k$ i dodaju se prirodnim logaritmima $\ln(J)$ i $\ln(\Delta a/k)$, prema jednačini:

$$\ln(J) = \ln(C_1) + C_2 * \ln\left(\frac{\Delta a}{k}\right) \dots\dots\dots 3.48$$

Na ovakav način izračunat je prirodni logaritam *J-integrala*. Poslije se računa odstupanje $\ln(J)$ i *model* ($\ln(J)$) prema:

$$Dev=(\ln(J) - model(\ln(J)))^2 \dots\dots\dots 3.49$$

nakon čega se međusobno sumiraju, pri čemu se određuje približna vrijednost konstanti C_1 i C_2 koje se takođe računaju tako da se model krive približi do minimalne vrijednosti zbira odstupanja. Za potvrdu konstanti C_1 i C_2 crta se dijagram $\ln(J) - \Delta a$, slika 3.71.



Slika 3.71 Model dijagrama $\ln(J)$ - Δa

Sa model dijagrama vidi se da izračunata vrijednost u velikoj mjeri odgovara i da se odstupanje ne može više minimizirati, na osnovu čega se zaključuje da su konstante C_1 i C_2 pravilno odabrane. Ovako određene konstante C_1 i C_2 se koriste se za *J-integral* za određene vrijednosti dužine prslina Δa .

$$J = e^{\ln(c_1) + \ln(\Delta a / k)} \dots\dots\dots 3.50$$

Na samom kraju opisane procedure do crtanja krivih otpornosti potrebno je proći etape:

- početno crtanje dijagrama $J-\Delta a$,
- u dijagram se zatim crtaju konstrukcione linije dobijene iz jednačine,
- potom se crtaju paralelne linije konstruktivnoj liniji na udaljenosti $\Delta a = 0,15$ mm, $\Delta a = 0,2$ mm i $\Delta a = 1,5$ mm,
- dolazi se do zone u kojoj važe rezultati a izvan koje dolazi do loma materijala:

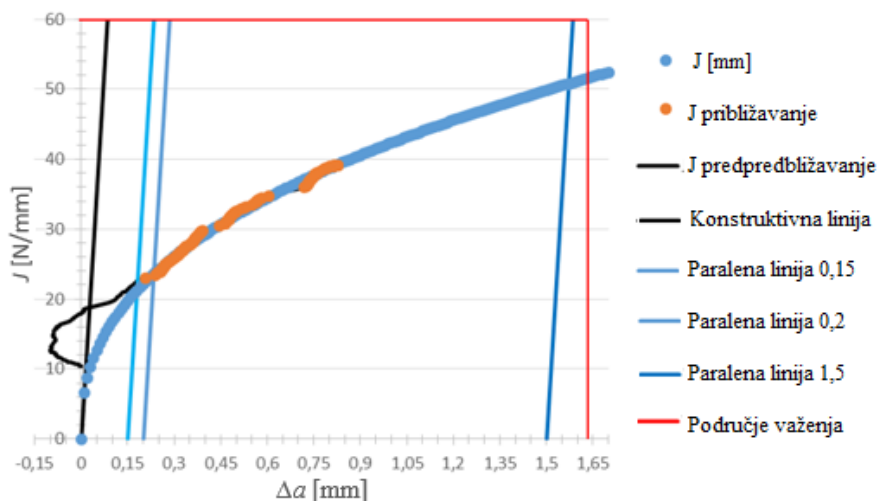
prvi slučaj: prekoračenje ograničenja $\Delta a_{limit} = 0,25 * b_0$

drugi slučaj: limit za *J-integral* je: $J_{limit} = \frac{b_0 * \sigma_Y}{7,5}$

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.7.4 Kriva otpornosti $J-\Delta a$

Kriva otpornosti $J-\Delta a$ (plava boja) ima izgled na dijagramu na slici 3.72. Dodata je vrijednost koja je korišćena u aproksimaciji odnosno približavanju (narandžasta boja) u cjelokupnom dijagramu vrijednosti J -integrala u postupku predprijžavanja (crna boja).



Slika 3.72 Model dijagrama J -krive otpornosti

Na dijagramu je uočljivo kako se kriva korišćena u približavanju, odnosno aproksimaciji dobro poklapa sa krivom otpornosti (plava boja), što znači da su rezultati relevantni i mjerodavni. Paralelna linija u $\Delta a = 0,15$ mm pokazala se neodgovarajućom, pa se dalje traži paralelna linija kako bi odredili J_{Ic} , N/mm analogno slici 3.72, to jest crta se paralelna linija iz $\Delta a = 0,2$ mm. Sa presjecišta ovih linija očitava se tražena vrijednost J_{Ic} , odnosno žilavost loma K_{JIC} , N/mm^{3/2} ili N/m^{3/2}, iz jednačine:

$$K_{JIC} = \sqrt{E' + J_{Ic}} \dots\dots\dots 3.51$$

gdje je E , MPa i jednako je $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$

3.8. Fraktografska analiza površine preloma

Za analizu topografije preloma elektronom mikroskopijom (SEM/EDS analiza) korišćene su epruvete nakon loma na instrumentalizovanom Charpy klatnu. Ispitivanja su urađena u ZTMU na uzorcima zavarenim tipovima alata A, B, C i D sa promjenljivim odnosom $n_{alata}/v_{zav} = 10,625; 12,50; 9,375; 14,16$, respektivno.

Ispitivanja su izvedena na kompjuterizovanom skening elektronskom mikroskopu tip JEOL JSM-6460 LV opremljenom EDS uređajem Oxford INCA, rezolucije 3-4 nm (nanometra) sa uvećanjem u rasponu 8-300 000 x u Univerzitetском centru za elektronsku mikroskopiju u Novom Sadu, slika 3.73.

Fraktografijom se u ovom slučaju izučavanjem površine preloma posmatranih uzoraka dovode u vezu mikromehanizmi loma i unutrašnje karakteristike strukture legure EN AW 7049A T652. Prema mehanizmu nastajanja, u osnovi, razlikuju se duktilni, krti i mješoviti lom. Većina metalnih materijala lomi se duktilnim mehanizmom, a ako ne sadrže uključke lome se plastičnom deformacijom specifičnoj po dominantnoj redukciji površine [257]. Nijesu rijetki slučajevi da se na česticama sekundarnih faza pod dejstvom naprezanja lom započinje lomljenjem samih čestica ili odvajanjem matriksa od njih.

3.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Daljom deformacijom materijala stvaraju se lokalne fibrozne strukture i spajanja mokropora, odnosno kidanja međuatomnih veza izazivajući duktilni lom. Glavni oblik duktilnog loma je smicajno razaranje koje se dešava po ravnima nagnutim pod uglom od 45° prema osi napreznja, dok je drugi tip razaranja lom cijepanjem pri nižoj plastičnoj deformaciji u odnosu na duktilni lom. Karakteriše ga velika brzina propagacije prsline sa malom deformacijom i potrošnjom energije, tzv. krti lom sa svjetlosnim površinama loma [258].



Slika 3.73 Operater u trenutku SEM/EDS analize jednog od uzoraka nastalog poslije loma legure EN AW 7049 A na skening elektronskom mikroskopu tip JEOL JSM -6460LV

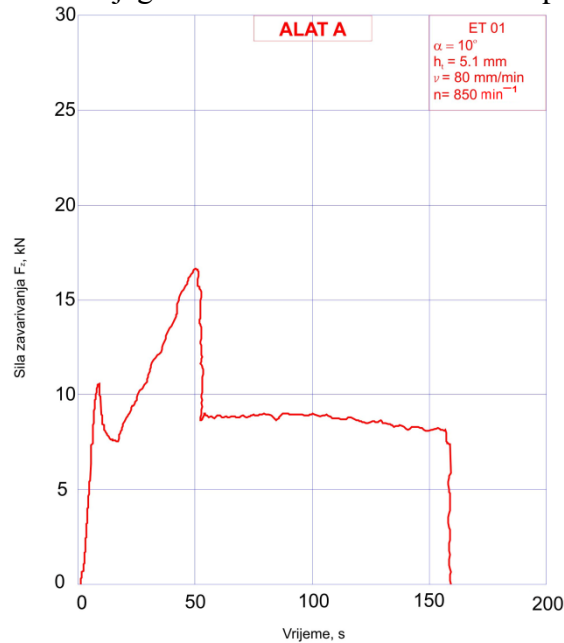
Ovaj mikroskop ima veliku dubinu vidnog polja i rezoluciju što daje mogućnost trodimenzionalnog posmatranja prelomnih površina i izvan zone fokusa. Mikroskop je opremljen EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) za analizu energije fotona karakterističnih X – zraka zahvaljujući činjenici da se energija ekscitacije pobuđenog elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar samog atoma [259]. On omogućava da se na karakterističnim površinama preloma odredi mjesto iniciranja prsline, priroda i pravac prostiranja. Njegovom upotrebom određuje se učešće hemijskih elemenata mjesta inicijacije prsline, a X-zraci nastaju kao posledica sudara upadnih elektrona sa elektronima koji se nalaze u ljuskama atoma ispitivanog materijala. Vraćanjem pobuđenih elektrona u niži energetski nivo emituju se X - zraci konstantne talasne dužine tako da svaki od hemijskih elemenata iz sastava legure opisuje karakteristične X-zrake. Separacija zračenja elemenata izvodi se posredstvom EDS detektora na osnovu kojeg je moguće odrediti maseni ili atomski udio elemenata. EDS sistem aktivira X-zrake, hlađenje u tečnom azotu i integrisanu računarsku podršku za prikupljanje i analizu podataka. Maksimalne vrijednosti energije odgovaraju različitim elementima u uzorku, dok maseni ili atomski udio hemijskog elementa određuje broj signala za taj element [260]. Zavisnost intenziteta energije i X-zračenja prikazuje se grafički i izražava se u keV.

Pregledanje uzoraka ET 01, ET 06, ET 11 i ET 16 na SEM-u izvršeno je pri povećanjima 25 – 5000x, na način da su praćene promjene topografije preloma od centra MŠ, odnosno zone „grumena“(ZG) –u podnožju i na vrhu jezgra (donjoj i gornjoj regiji) MŠ, lijevo i desno od njega, na različitim mjestima ZTMU(-4 mm, -8 mm na strani napredovanja, odnosno +4 mm, +8 mm na povratnoj strani MŠ). Kriterijum za izbor uzoraka za SEM/EDS analize površine preloma bili su rezultati prethodnih ispitivanja energije udara i udarne žilavosti.

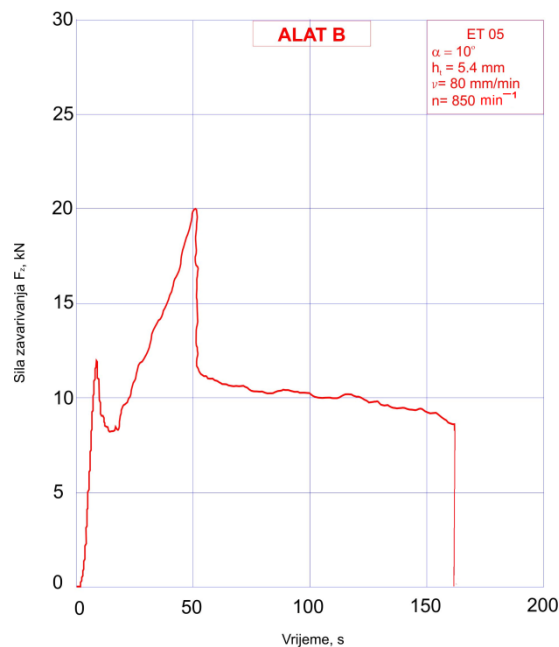
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

4.1 Rezultati mjerenja intenziteta sile zavarivanja F_z

Mjerenje vrijednosti sile zavarivanja F_z izvedeno je na svim uzorcima zavarenim tipovima alata A, B, C, D i E, a ovdje su prezentovani dijagrami za po jedan uzorak ET 01, ET 05, ET 09, ET 13 i ET 17. Na slikama 4.1 do 4.5 prikazani su dijagrami odnosa sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z tokom odvijanja pojedinih faza i među faza u kretanju alata u aksijalnom pravcu, kao i ciklusa zavarivanja tokom kojeg se alat kreće translatorno u X-pravcu.

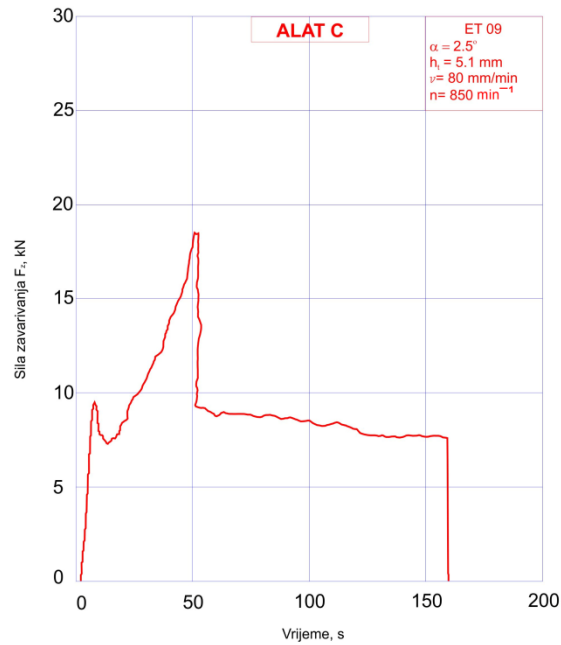


Slika 4.1 Zavisnost sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z uzorka ET 01 zavarenog alatom tip A

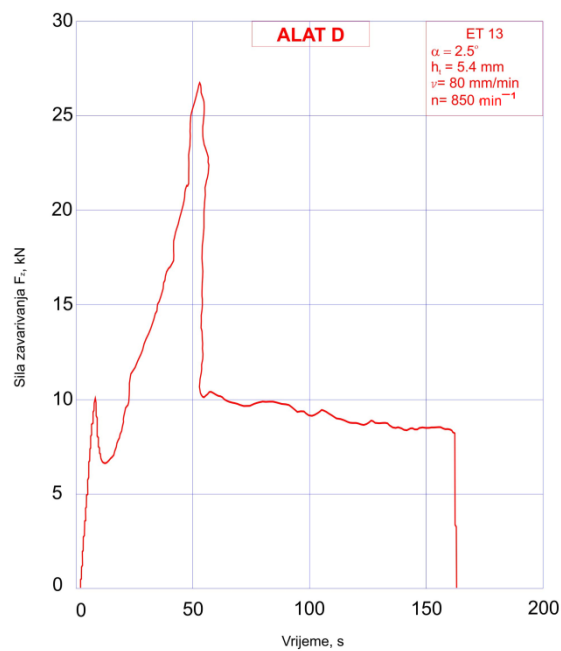


Slika 4.2 Zavisnost sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z uzorka ET 05 zavarenog alatom tip B

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

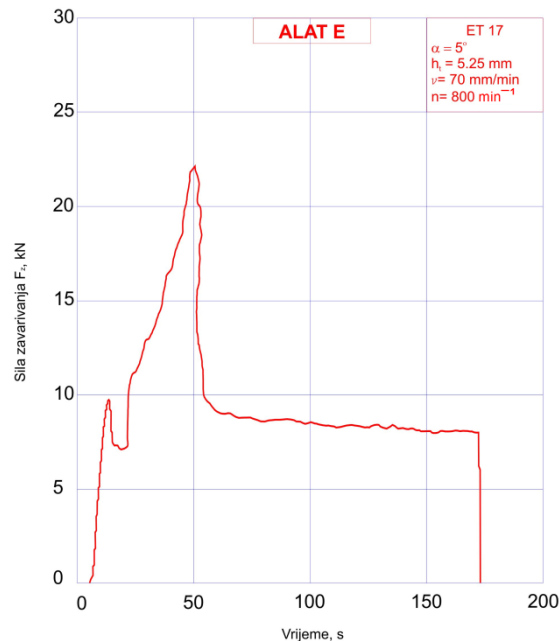


Slika 4.3 Zavisnost sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z uzorka ET 09 zavarenog alatom tip C



Slika 4.4 Zavisnost sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z uzorka ET 13 zavarenog alatom tip D

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.5 Zavisnost sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z uzorka ET 17 zavarenog alatom tip E

Analiza odnosa sile zavarivanja F_z i vremena zavarivanja t_z kod svih tipova alata u I fazi (prodiranje trna alata) koja traje 10 s, pokazuje nagli porast vrijednosti intenziteta, dok u I među fazi koja traje takođe 10 s, bilježi pad intenziteta. Nagli skok F_z tokom II faze-prodiranje čela alata traje 30 s, zatim naglo opada u toku trajanja II međufaze, dok neznatno i postepeno opada do kraja II ciklusa -processa zavarivanja u trajanju između $t_z = 120 \text{ s}$ do $t_z = 140 \text{ s}$. Kontinuirani manji pad intenziteta sile zavarivanja F_z pripisuje se povećanju temperature radnog komada i manjem dejstvu omekšanog materijala ispred čela alata u smjeru zavarivanja.

4.1.1 Rezultati mjerenja dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd}

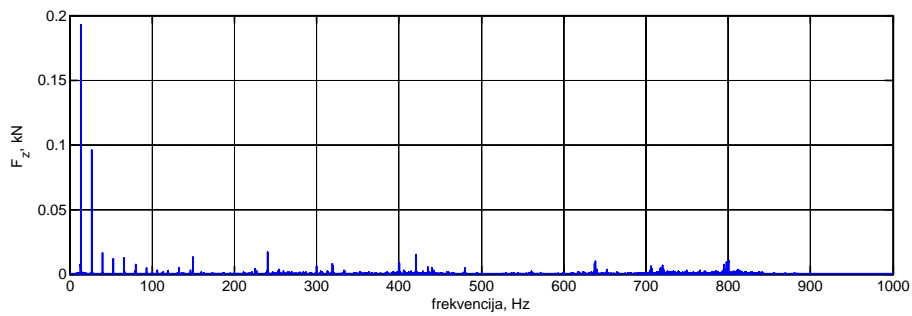
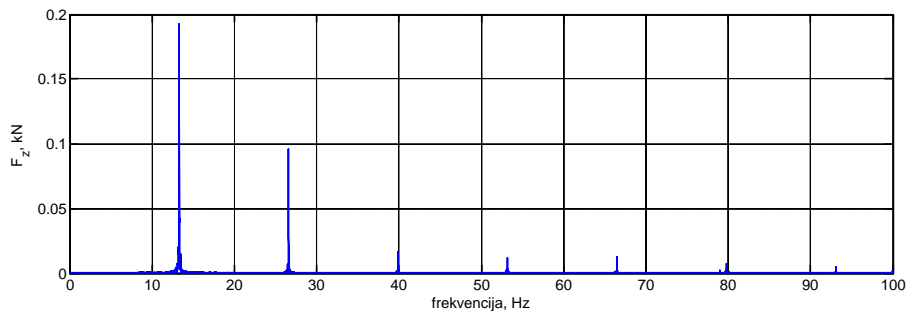
Rezultati intenziteta dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} za svaku eksperimentalnu tačku prikazani su preko frekventnih dijagrama u opsegu od 0 do 100 Hz i od 0 do 1000 Hz. Pojedinačnom analizom oba domena ispitivanja zapaža se intenzivniji rast F_{zd} u području frekvencije od 0 Hz do 30 Hz nakon čega nastupa period mirne i uniformne vrijednosti F_{zd} na većim učestanostima.

Stanje se može okvalifikovati početnim povećanim otporom nedovoljno izmiješanog (omekšanog) materijala i njegovom reaktivnošću prvo na trn (I faza), a potom i na čelo alata (II faza) za vrijeme trajanja prodora alata u aksijalnom pravcu.

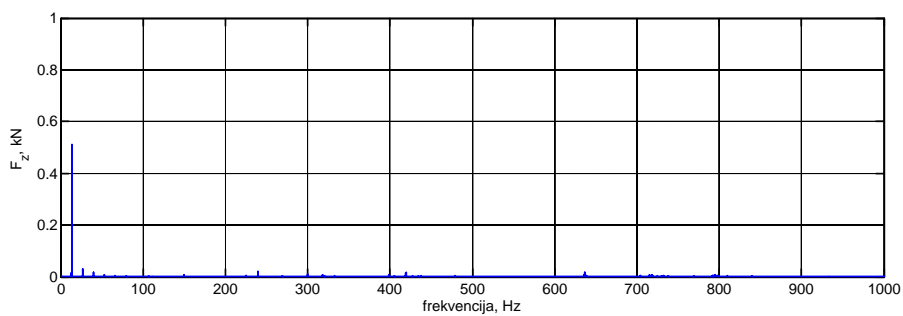
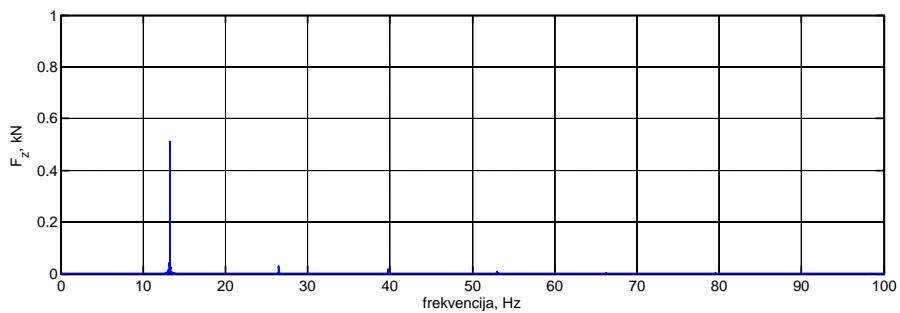
Ciklus zavarivanja obilježava izuzetno nizak nivo vrijednosti F_{zd} kod svih ispitanih uzoraka bez posebnog uticaja na tip korištenog alata za zavarivanje.

Na slikama 4.6 do 4.10 dati su pripadajući frekventni dijagrami dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} .

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

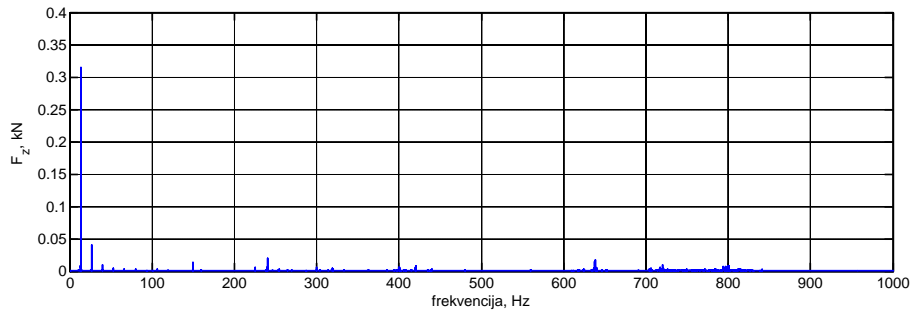
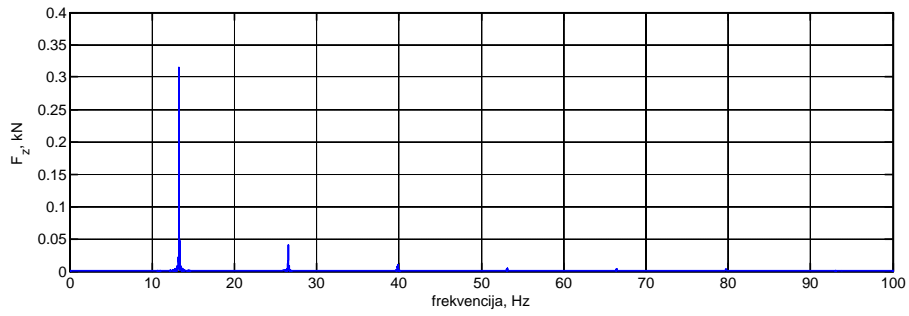


Slika 4.6 Frekventni dijagram dinamičke komponente sile zavarivanja za ET 01

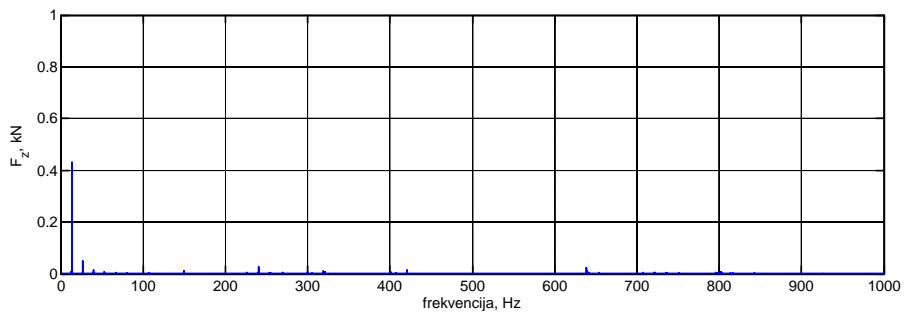
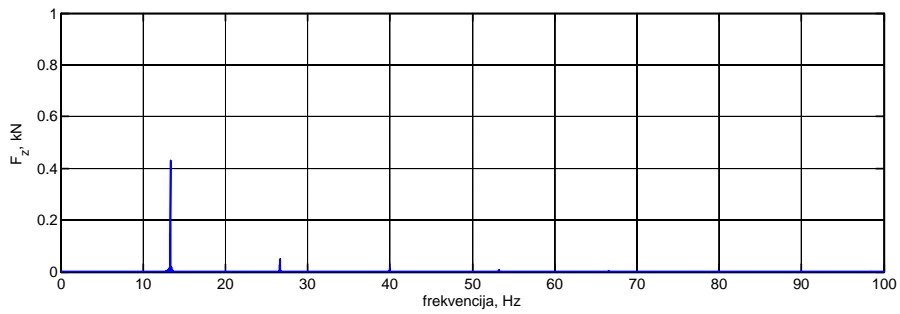


Slika 4.7 Frekventni dijagram dinamičke komponente sile zavarivanja za ET 05

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

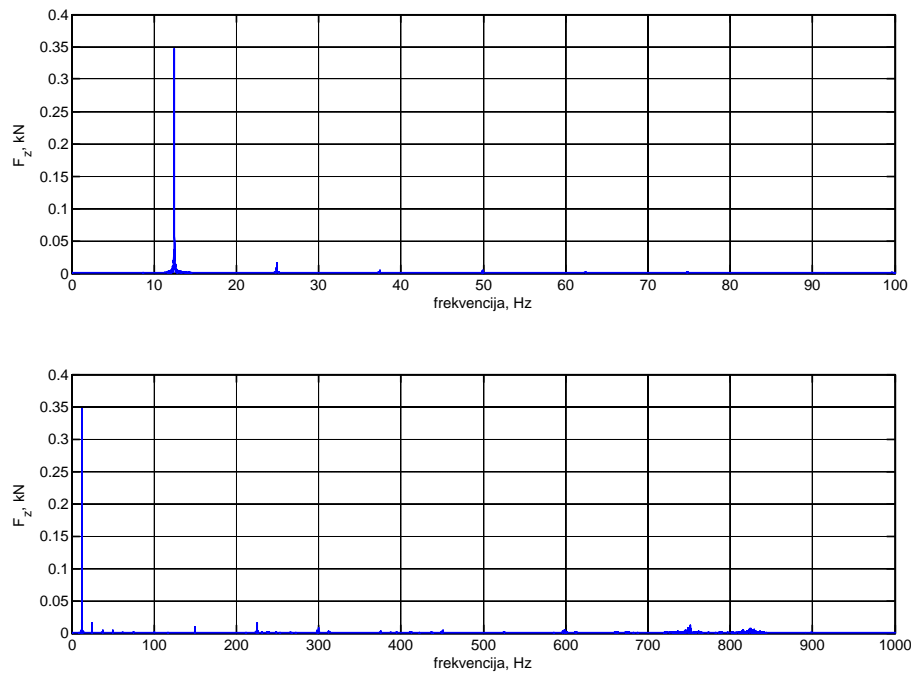


Slika 4.8 Frekventni dijagram dinamičke komponente sile zavarivanja za ET 09



Slika 4.9 Frekventni dijagram dinamičke komponente sile zavarivanja za ET 13

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.10 Frekventni dijagram dinamičke komponente sile zavarivanja za ET 17

Prikazani dijagrami ukazuju da kod alata sa manjom dužinom i manjim uglom konusa trna (alat tip C i alat tip E) učestanost oscilovanja nestaje poslije frekvencije od 15 Hz, dok kod alata sa većim uglom konusa (alat tip A) frekvencija traje sve do učestanosti od 28 Hz.

4.2 Rezultati mjerenja ubrzanja alata - komponente a_x , a_y i a_z

Mjerenje ubrzanja vibracija alata u X, Y i Z pravcu trajalo je od početka dodira alata sa radnim komadima do kraja procesa zavarivanja, odnosno od početka I faze, tokom II ciklusa i do kraja III faze. Sve vrijednosti unešene su u tabelu 4.1.

Tabela 4.1 Vrijednosti ubrzanja alata u tri pravca

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Br. eks.	n , min^{-1}	f_1 , Hz	n_{iz} , min^{-1}	a_x , mm/s^2	a_y , mm/s^2	a_z , mm/s^2
ET 01	850	13,29	850,42	1,887	1,845	1,238
ET 02	750	13,24	749,28	1,727	2,474	1,653
ET 03	750	11,69	749,55	3,313	1,507	1,242
ET 04	850	11,71	850,75	2,396	1,451	1,364
ET 05	850	13,26	850,36	1,230	1,5 93	1,366
ET 06	750	13,28	749,61	1,297	2,151	1,513
ET 07	750	11,73	750,00	1,079	1,445	1,243
ET 08	850	13,25	850,12	2,931	2,026	1,633
ET 09	850	13,29	850,23	1,657	2,097	1,718
ET 10	750	13,29	749,90	1,919	2,526	1,872

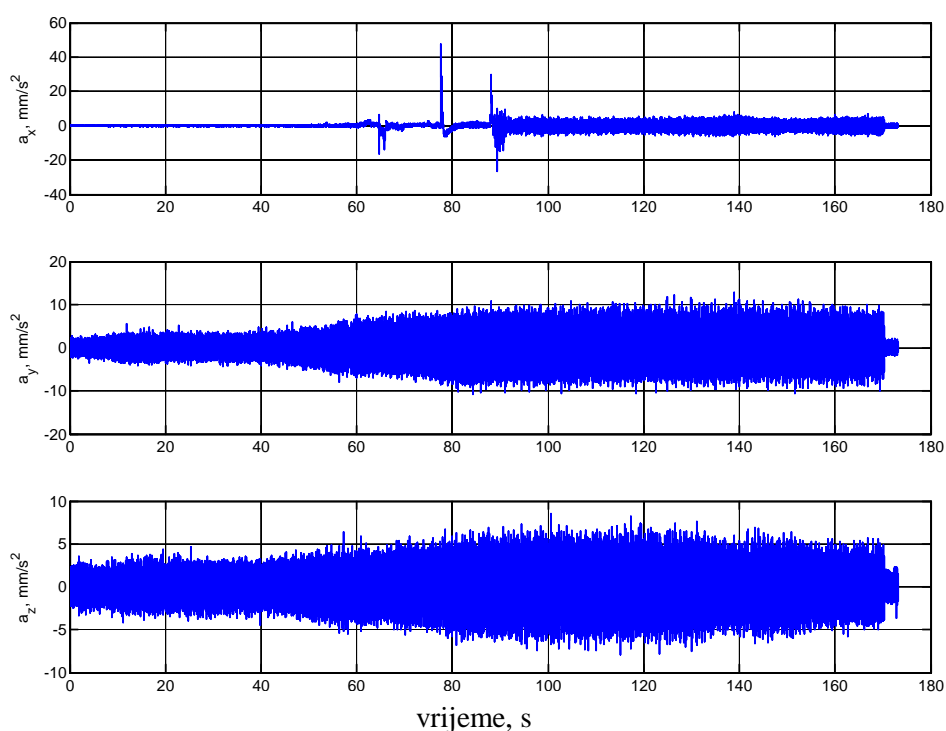
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

ET 11	750	11,73	749,58	1,896	1,434	1,374
ET 12	850	13,31	849,81	2,242	2,329	1,697
ET 13	850	13,31	798,66	1,396	2,046	1,426
ET 14	750	13,30	798,13	1,472	2,168	1,509
ET 15	750	11,72	703,39	1,145	1,461	1,386
ET 16	850	13,26	795,56	1,581	2,118	1,513
ET 17	800	12,48	748,66	1,416	1,452	1,262
ET 18	800	12,49	749,30	1,645	1,505	1,222
ET 19	800	12,49	749,62	1,439	1,421	1,202
ET 20	800	12,47	748,29	1,625	1,506	1,118

Rezultati su prikazani preko dijagrama u vremenskom i frekventnom domenu. Pojedinačna analiza oscilacija alata bez obzira na primijenjeni postupak i način mjerenja ne znači mnogo bez sagledavanja ukupnog dinamičkog okruženja sistema i uporedne analize svake eksperimentalne tačke ponaosob.

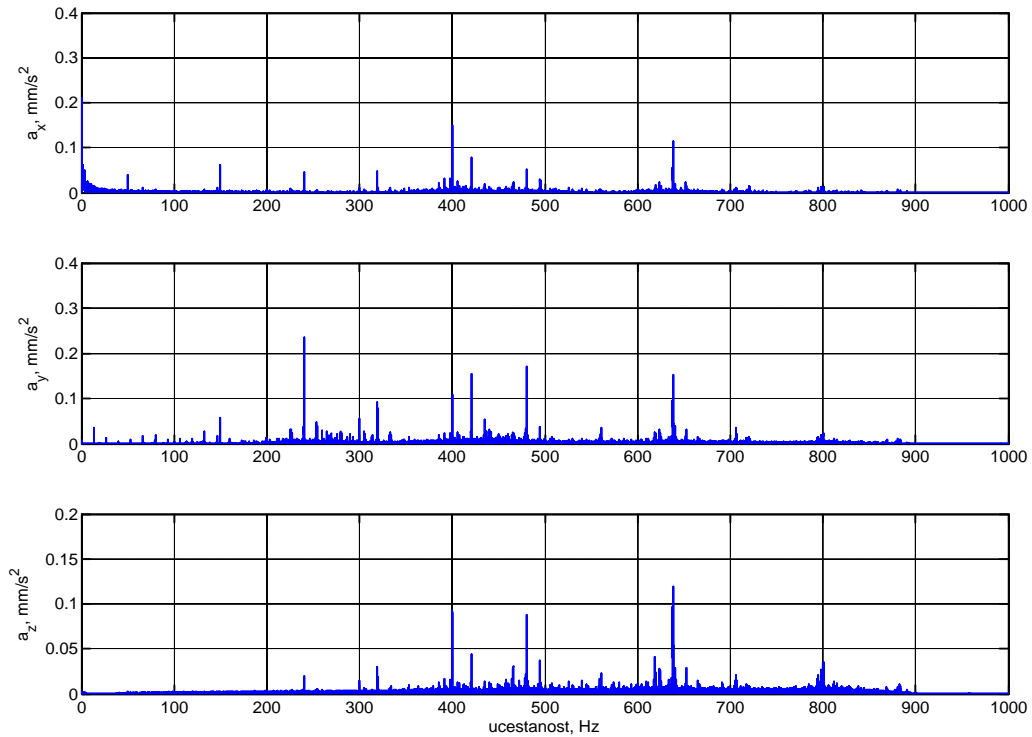
Jedino tako izvedeni zaključci relevantni su i validni za donošenje ocjene o vibrodinamičkom stanju alata i predmeta obrade. Individualnom faznom, međufaznom i ciklusnom komparacijom u vremenskom domenu niskih frekvencija sagledavaju se nivoi oscilacija alata svakog od 20 uzoraka.

Frekventni domeni na višim frekvencijama oscilovanja alata, iako posredno mjereni preko stezne ploče na oplati komada, ukazuju na porast ubrzanja alata na većim učestanostima tokom odvijanja II ciklusa.

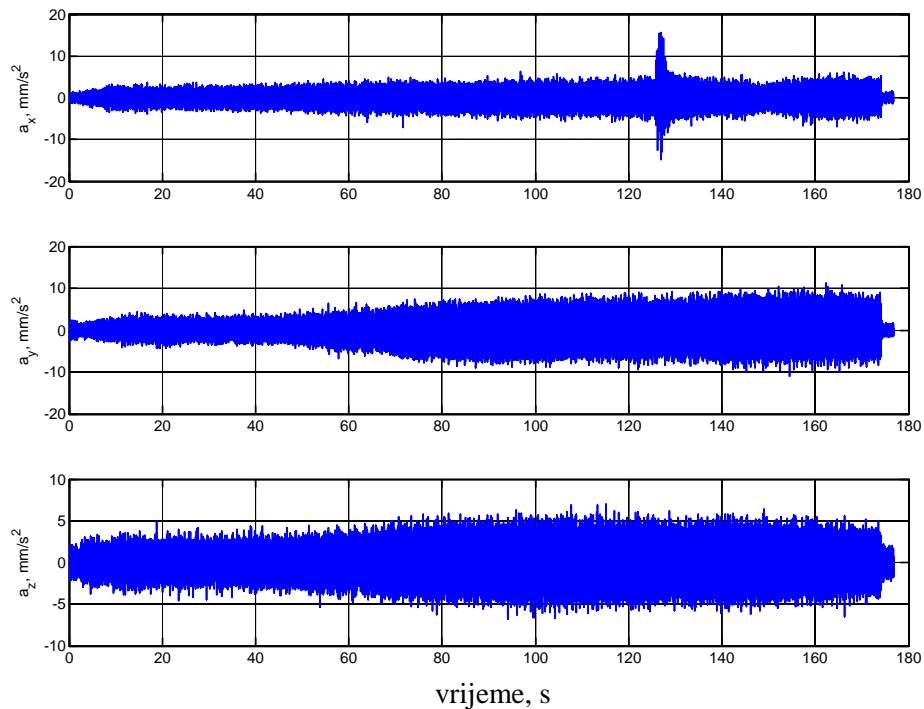


Slika 4.11 Vremenski dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip A za eksperimentalnu tačku ET 01

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

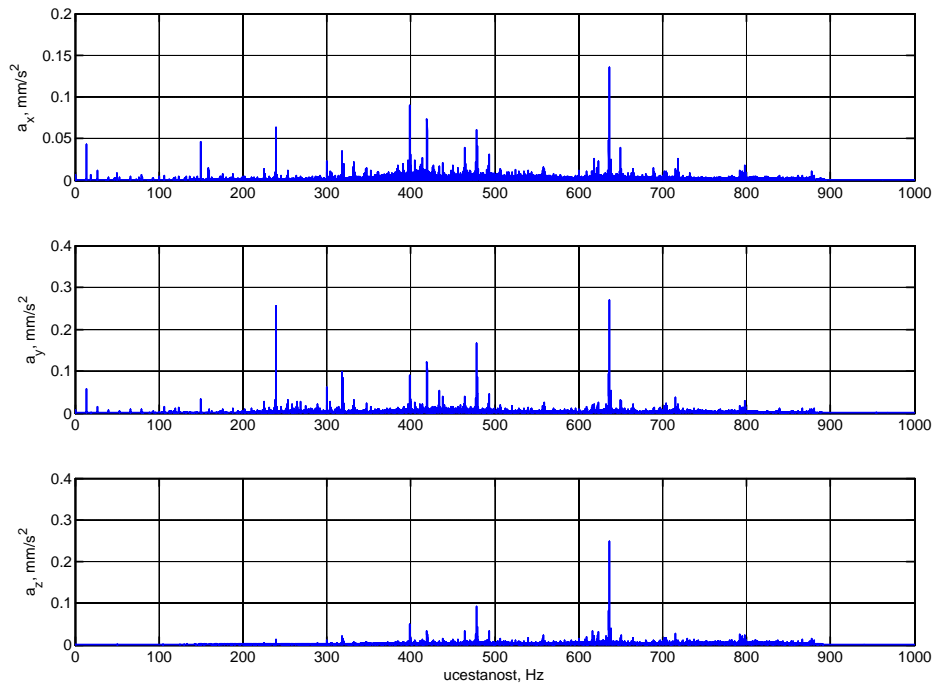


Slika 4.12 Frekventni dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip A za eksperimentalnu tačku ET 01

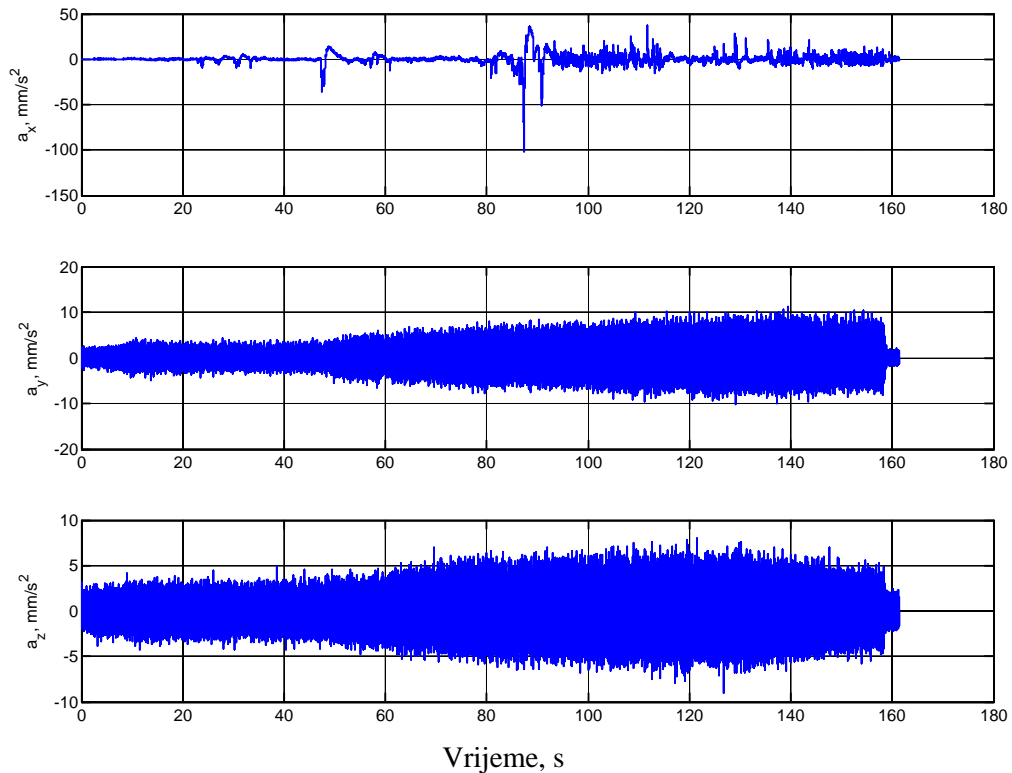


Slika 4.13 Vremenski dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip B za eksperimentalnu tačku ET 05

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

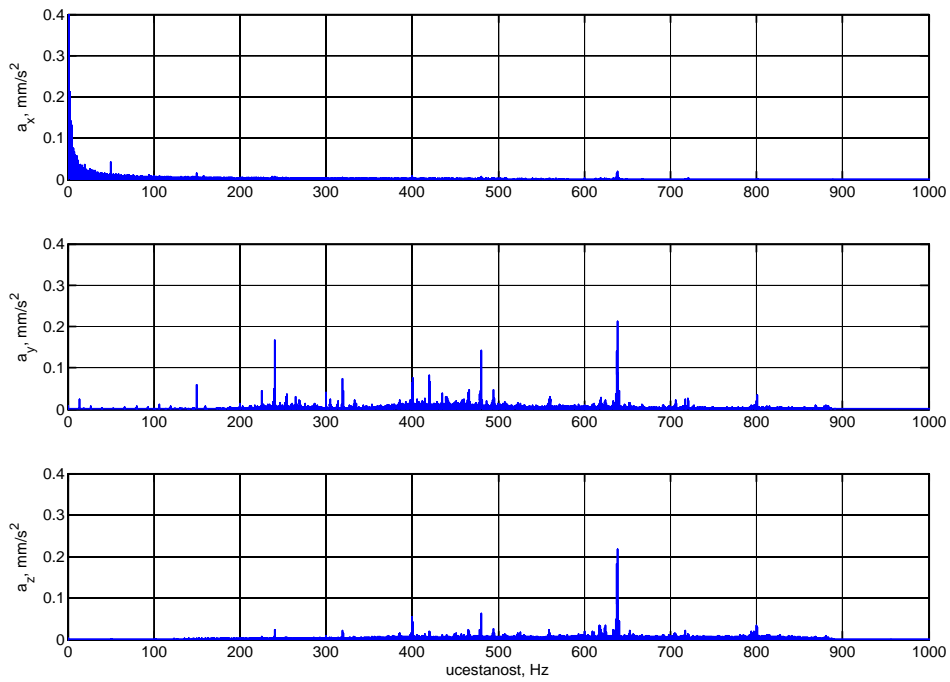


Slika 4.14 Frekventni dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip B za eksperimentalnu tacku ET 05

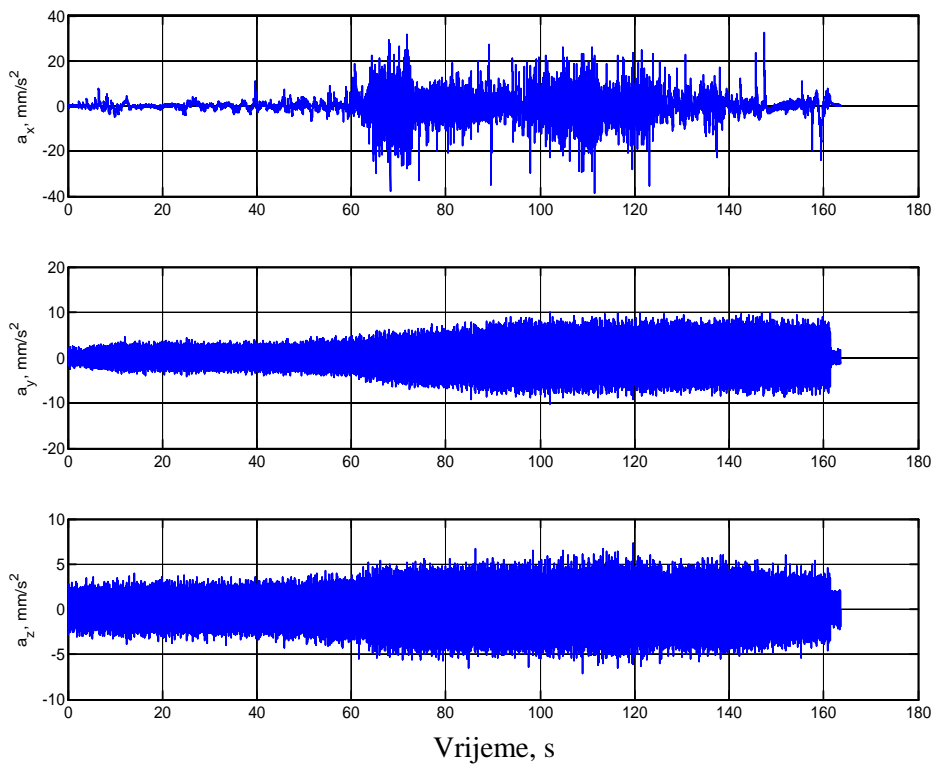


Slika 4.15 Vremenski dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip C za eksperimentalnu tacku ET 09

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

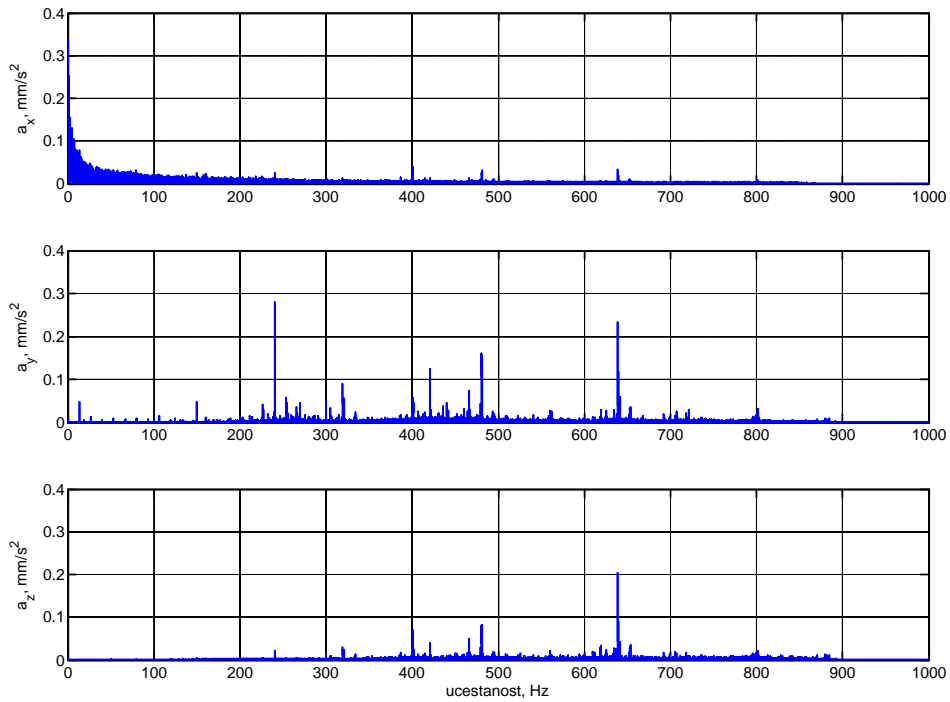


Slika 4.16 Frekventni dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip C za eksperimentalnu tačku ET 09

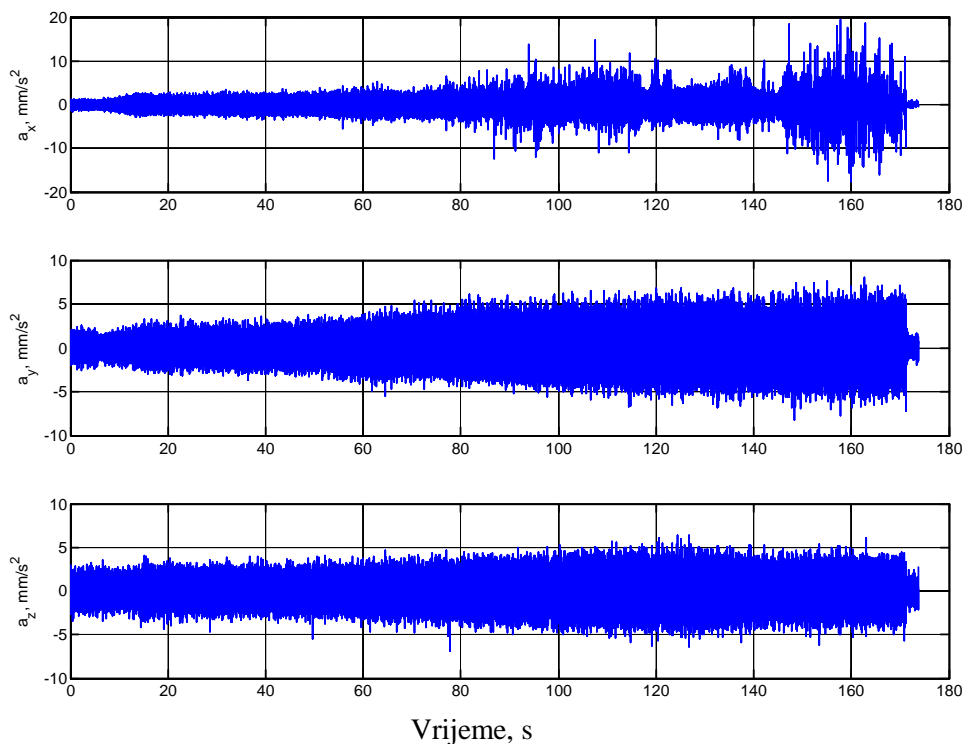


Slika 4.17 Vremenski dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip D za eksperimentalnu tačku ET 13

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

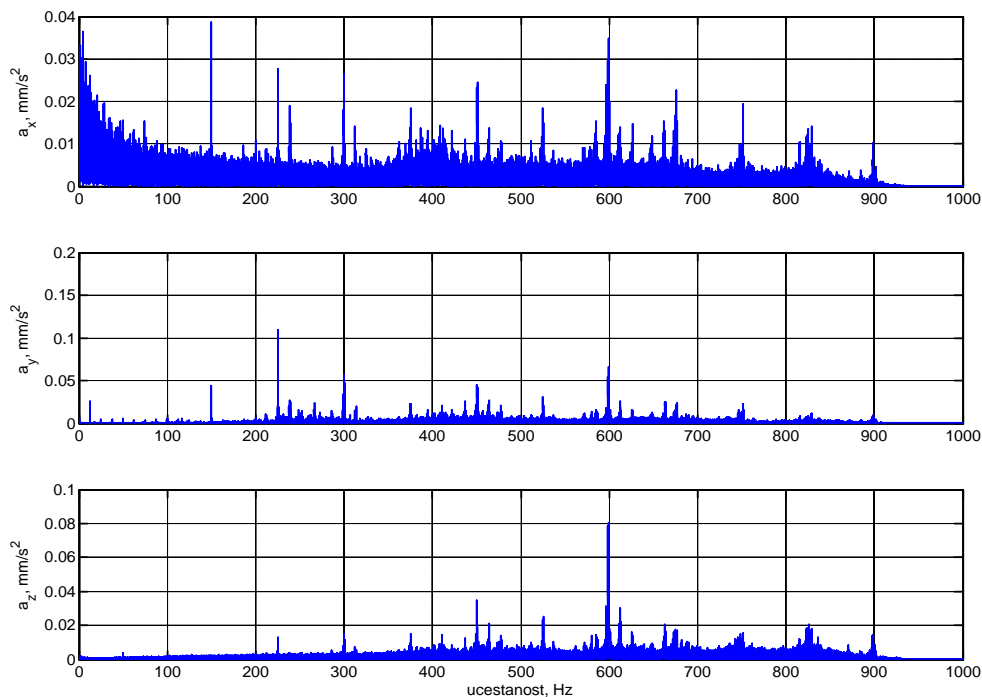


Slika 4.18 Frekventni dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip D za eksperimentalnu tačku ET 13



Slika 4.19 Vremenski dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip E za eksperimentalnu tačku ET 17

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.20 Frekventni dijagram trokomponentnog ubrzanja alata tip E za eksperimentalnu tačku ET 17

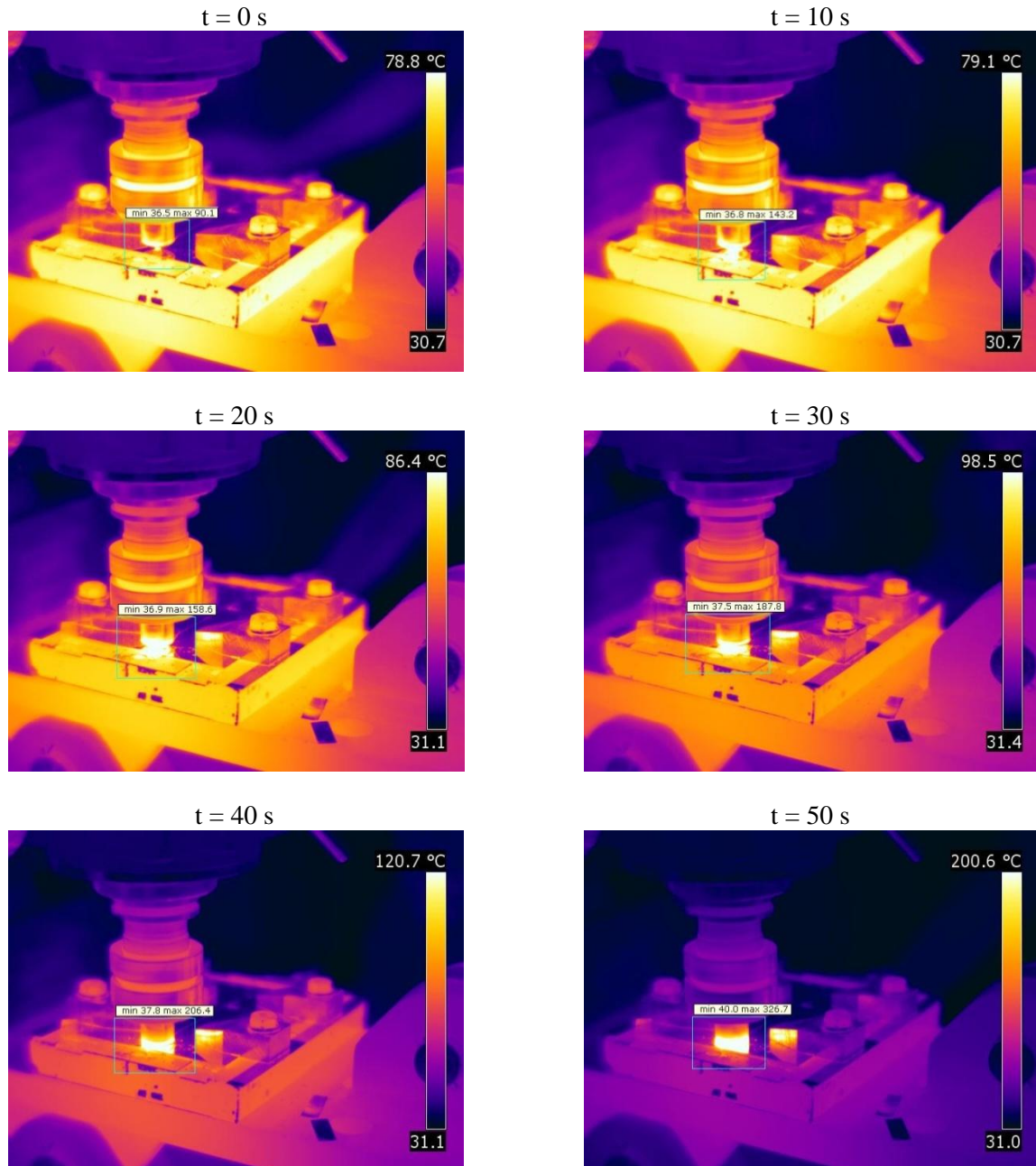
Alat za zavarivanje vrši pravolinijsko kretanje duž linije spoja tokom kog na njega, pored ostalih sila F_z i F_y , djeluje sila u uzdužnom pravcu F_x . Njoj se suprotstavlja sila otpora materijala proporcionalna brzini zavarivanja. U ovom slučaju, koji se ne može analogno primijeniti na ostale sile F_z i F_y , alat vrši prinudne prigušene vibracije rješive matematičkim modelom-nehomogenim diferencijalnim jednačinama. Tada se formulacija jednačina predstavlja kao zbir opšteg integrala homogenog dijela jednačine i jednog partikularnog integrala cijele jednačine. Ovako uopšteno postavljanje problema prinudnih vibracija alata sa učešćem sile otpora proporcionalne brzini otpora nenjutnovskog viskoplastičnog fluida daje osnov za zaključak:

- prinudne vibracije su bez amortizacije i imaju frekvenciju jednaku frekvenciji prinudne sile,
- prinudne vibracije na zavise od početnih uslova kretanja alata-početka ciklusa zavarivanja, dok amplituda prinudnih vibracija pri postojanju čak i malog prigušenja ima konačnu vrijednost,
- po okončanju vremenskog intervala snimanja tokom zavarivanja–trajanja II ciklusa, sopstvene vibracije amortizovane prigušenjem, zanemarljivo su male i imaju tretman prinudnih vibracija, i
- na malim amplitudama bilo koje od tri sile F_x , F_y i F_z nastupaju prinudne vibracije sa velikim amplitudama pod uslovom da kružna frekvencija prinudne sile na alatu bude blizu kružne frekvencije sopstvenih vibracija samo ako je otpor kretanju alata mali, odnosno i pri velikoj vrijednosti amplitude prinudne sile alata, amplituda prinudnih vibracija je mala ako je frekvencija prinudne sile alata mnogo veća od frekvencije sopstvenih vibracija.

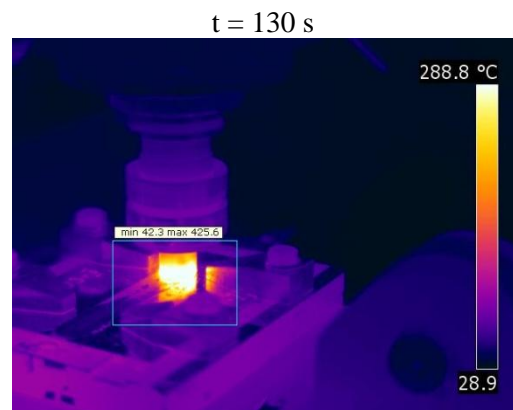
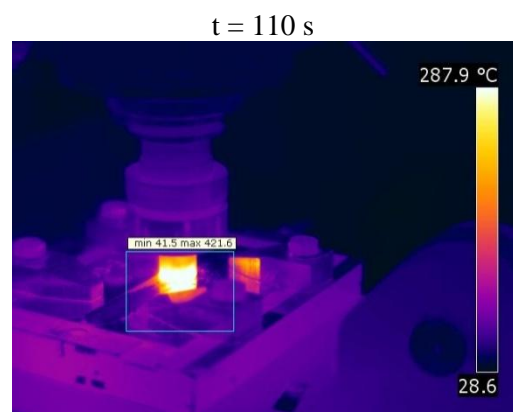
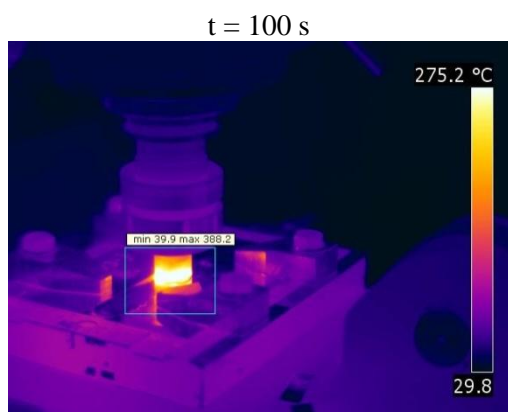
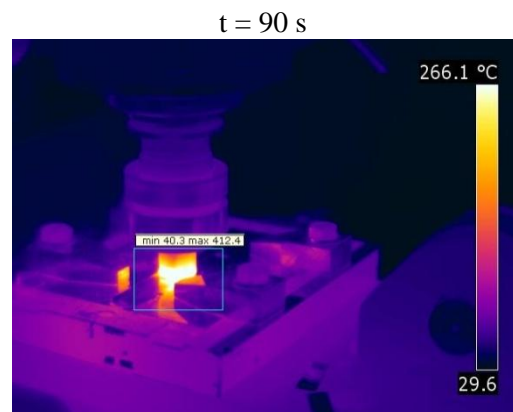
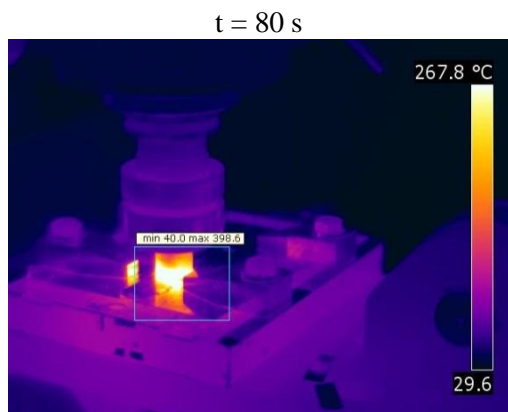
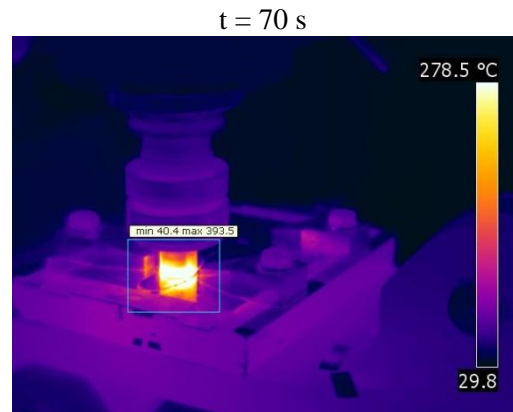
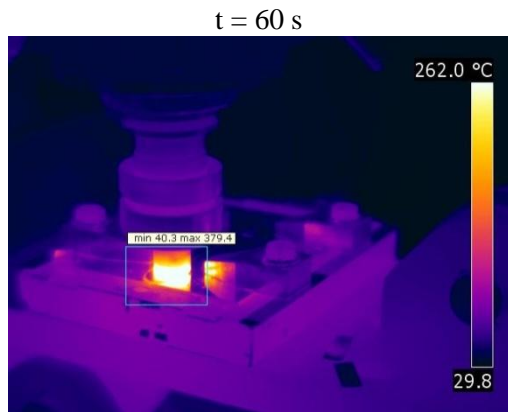
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

4.3 Termogrami faza i ciklusa zavarivanja

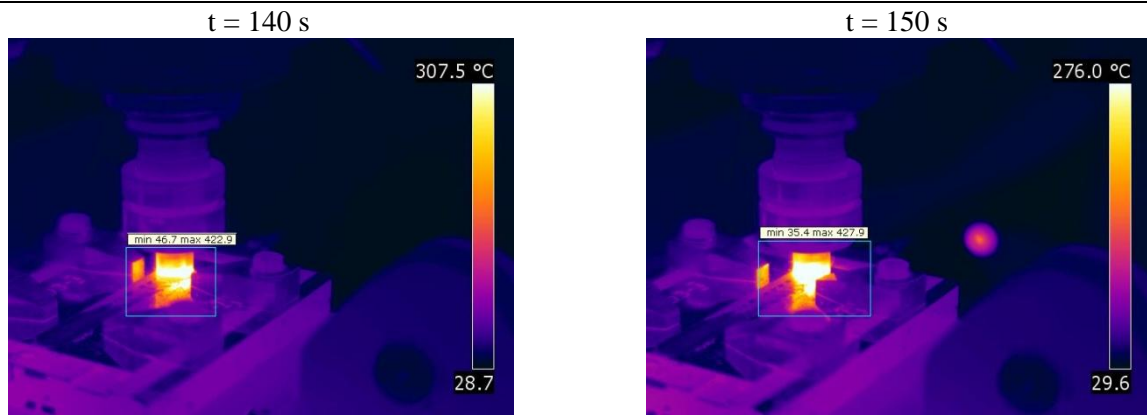
Prikazani termogrami kao rezultat termografskog mjerenja prikazuju sliku temperaturne raspodjele po posmatranoj površini alata i uzoraka od početka I faze, ciklusa zavarivanja do kraja III faze. Iako se beskontaktnim mjerenjem i brzim odzivom dobija relativno jednostavna interpretacija termograma, moguće je na ovaj način sagledavanje samo površinskih efekata na zavarivanim limovima. Temperaturna skala na ekranu pokazuje trenutnu vrijednost temperature u realnom vremenu.



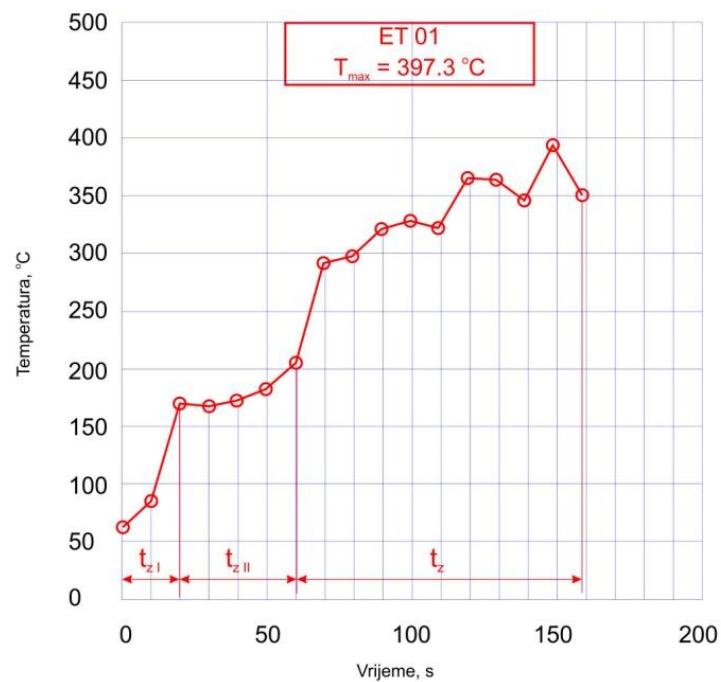
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



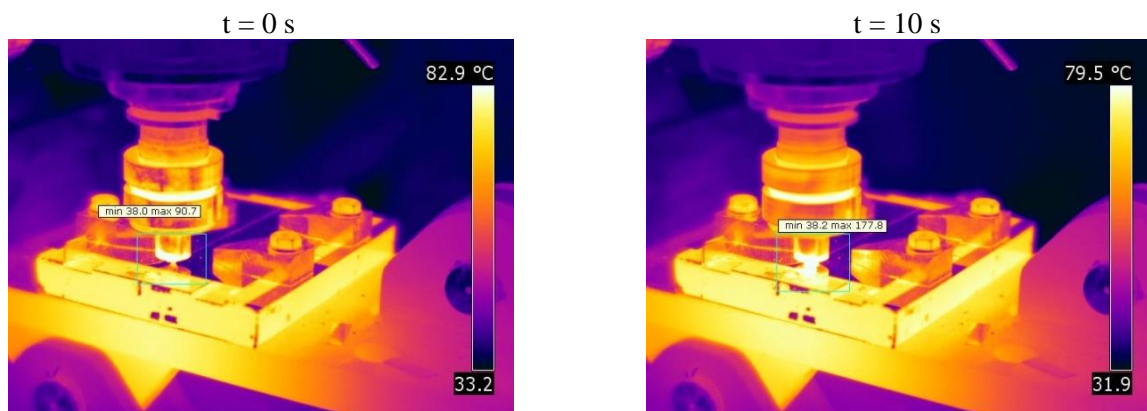
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



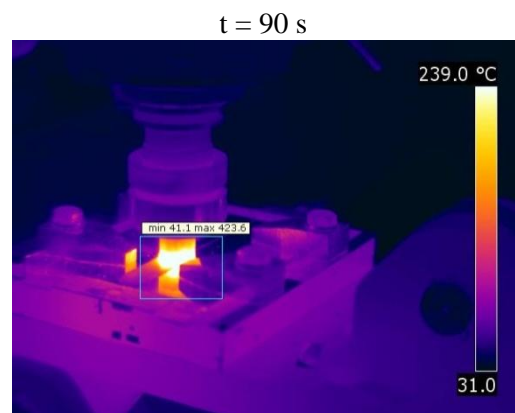
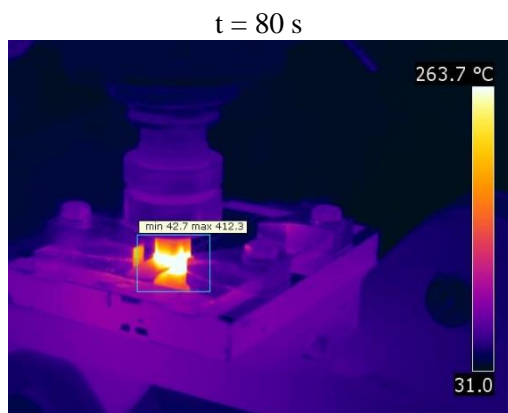
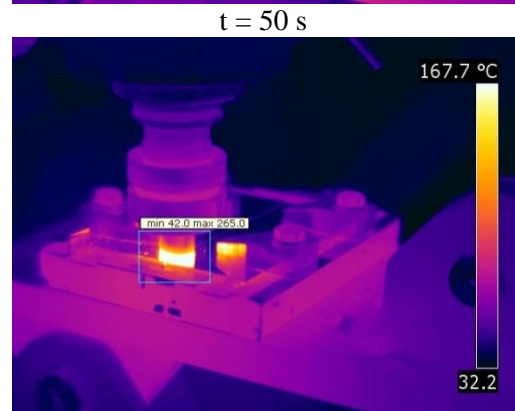
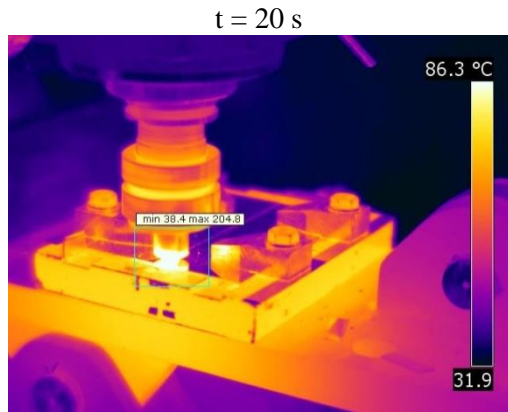
Slika 7.24 IC snimak tokom zavarivanja sa alatom tip A uzorka ET 01



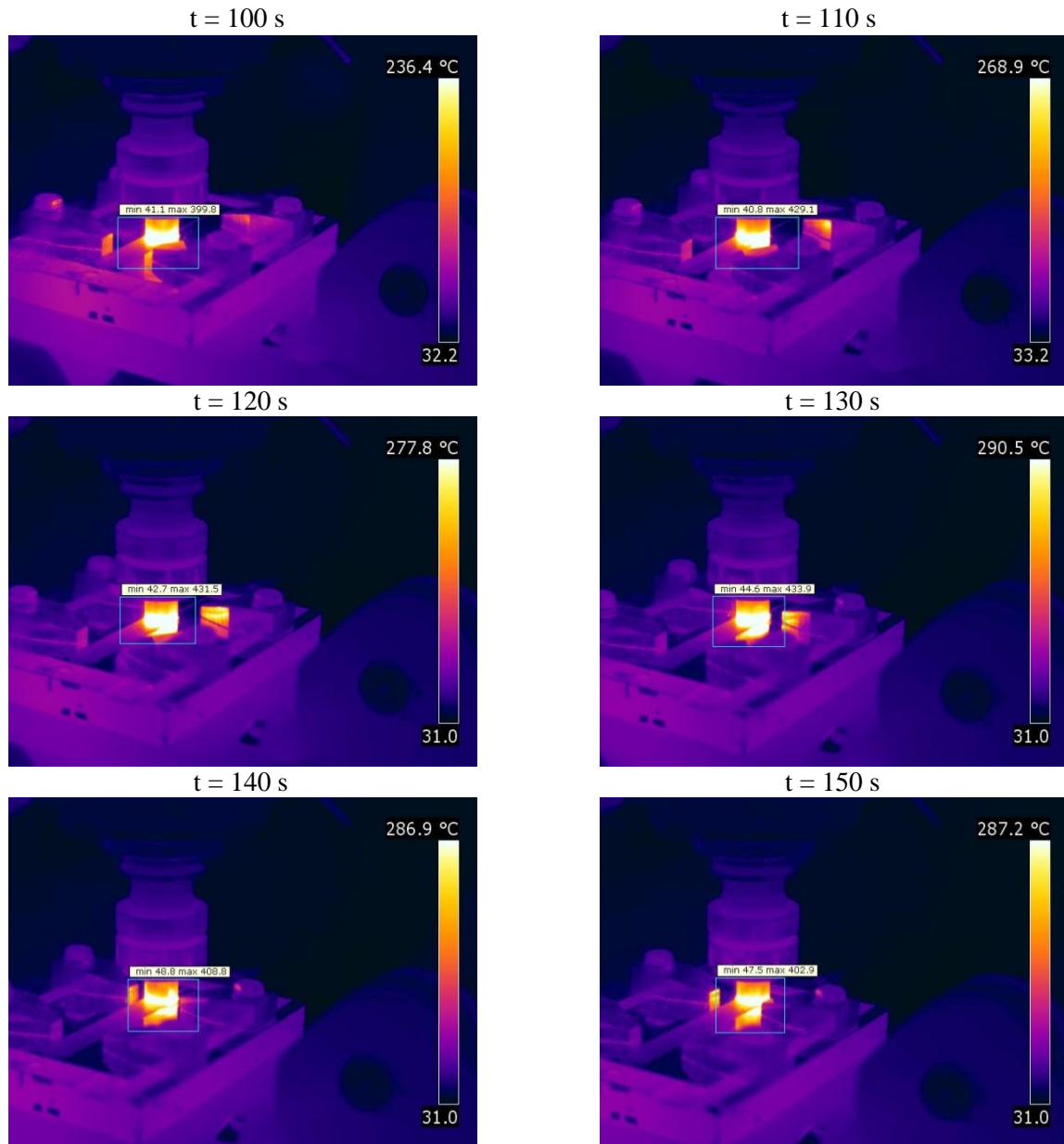
Slika 4.21 Dijagram temperature oboda alata tip A tokom zavarivanja uzorka ET 01



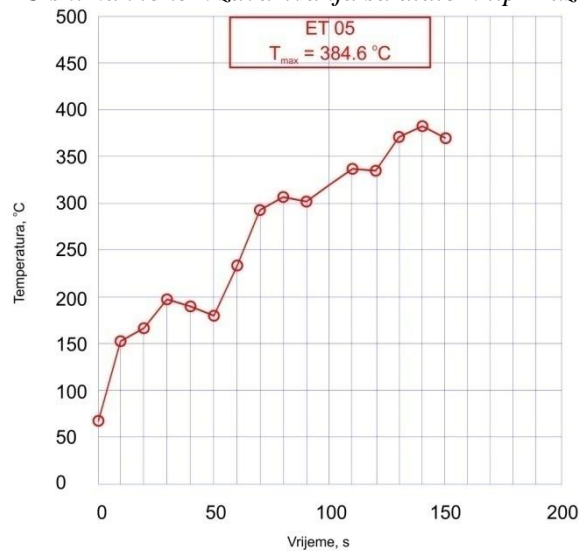
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

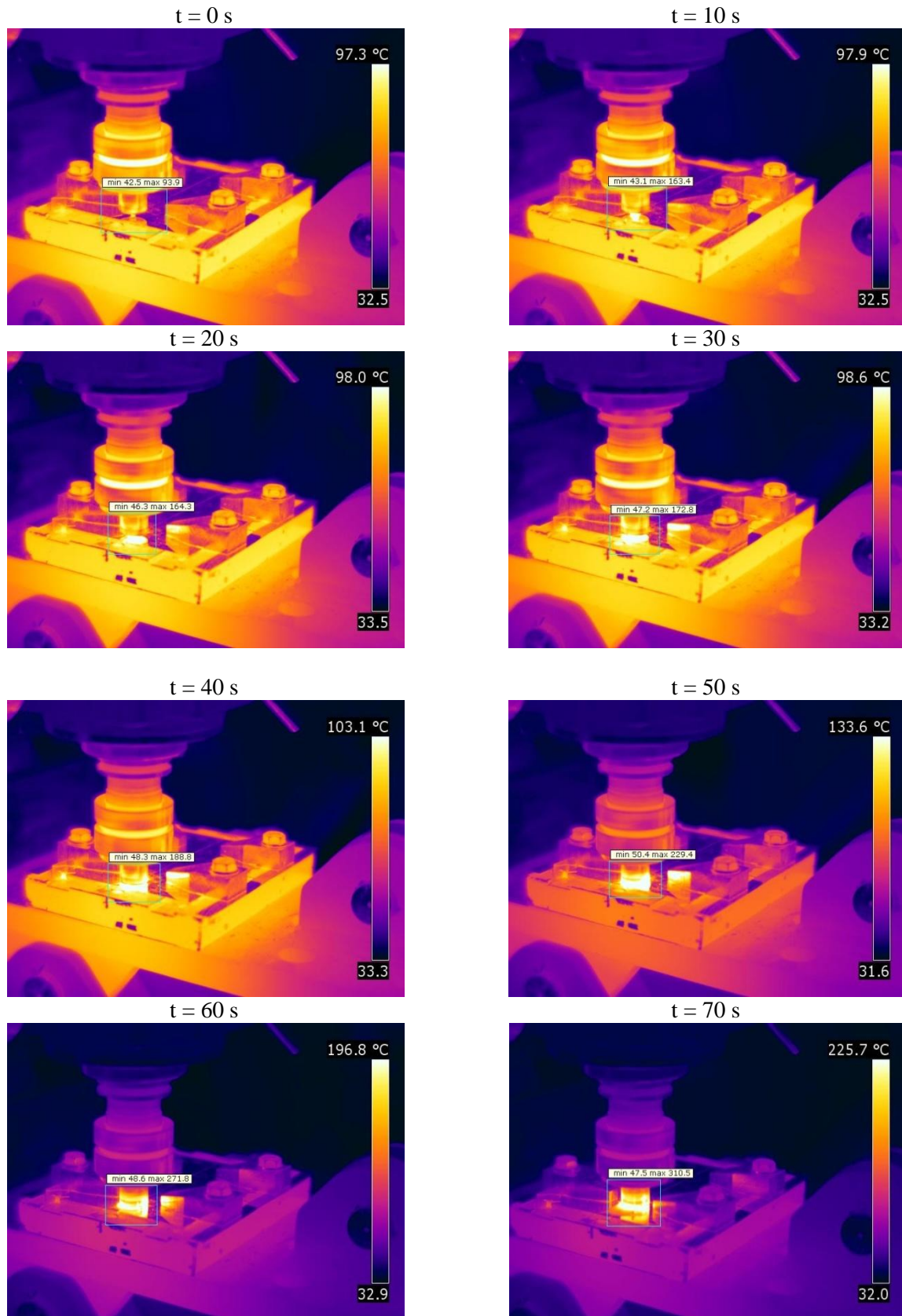


Slika 4.22 IC snimak tokom zavarivanja sa alatom tip B uzorka ET 05

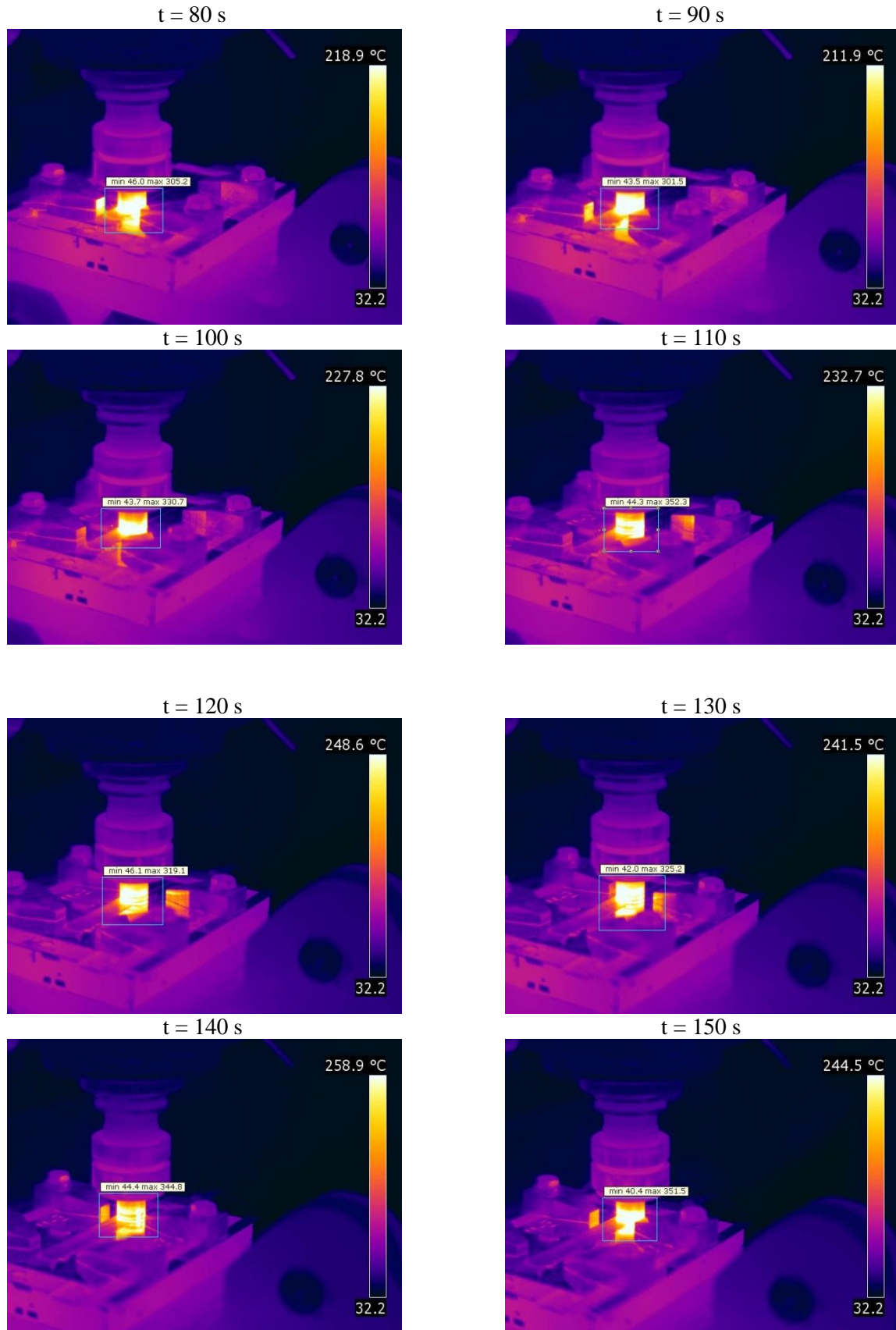


Slika 4.23 Dijagram temperature oboda alata tip B tokom zavarivanja uzorka ET 05

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

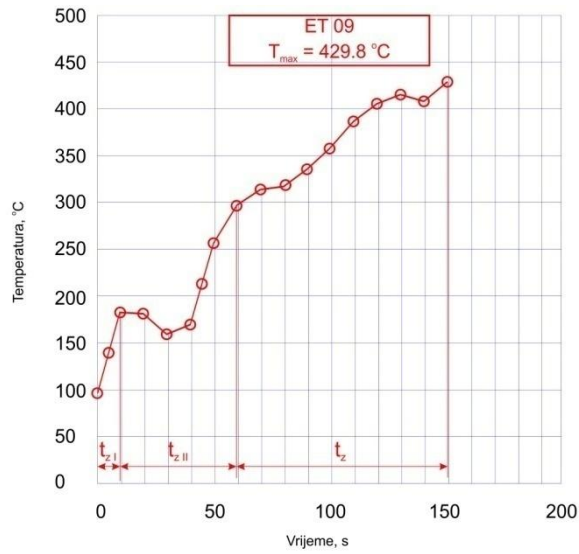


4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

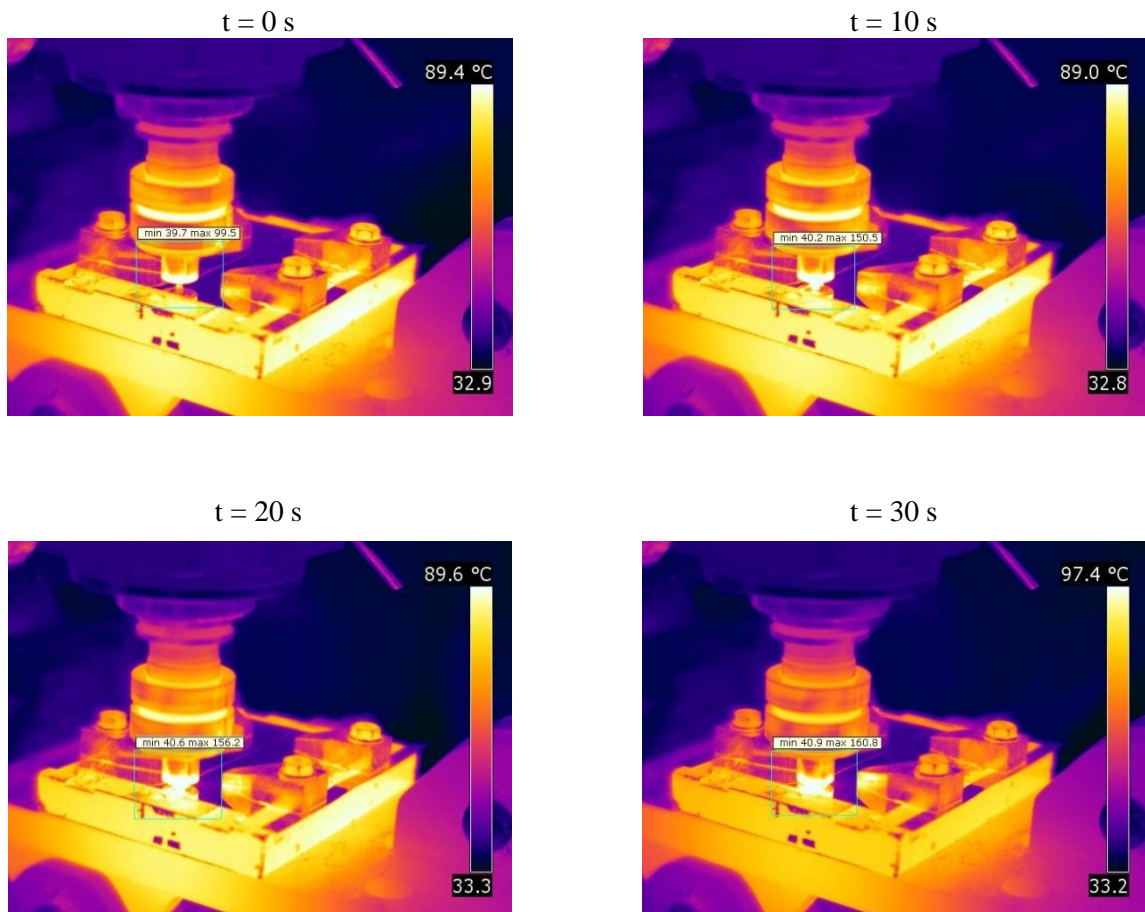


Slika 4.24 IC snimak tokom zavarivanja sa alatom tip C uzorka ET 09

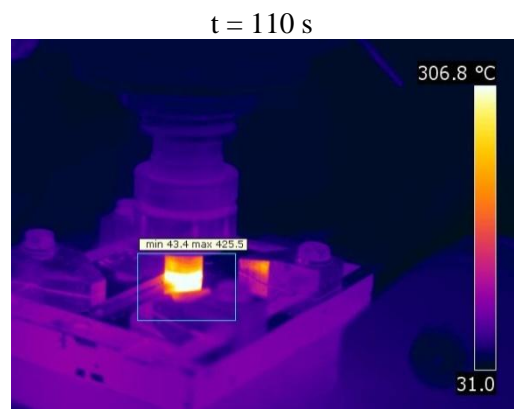
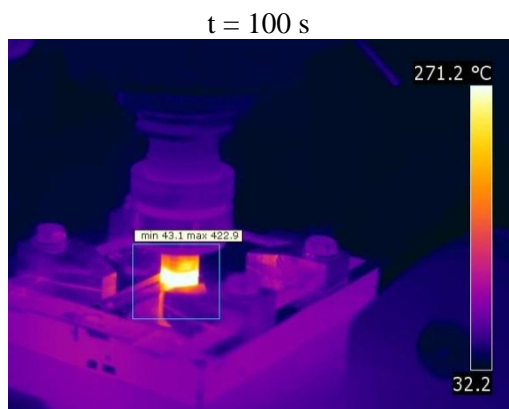
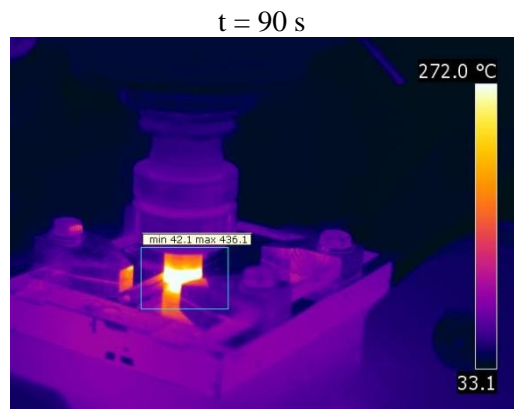
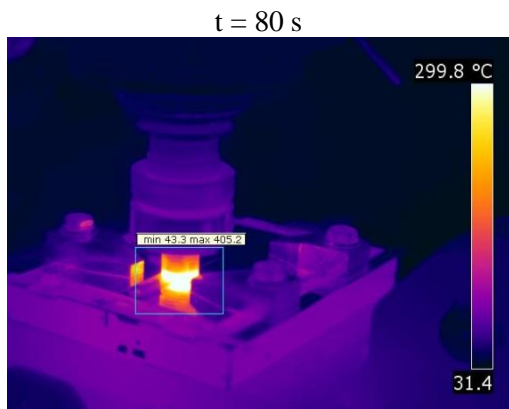
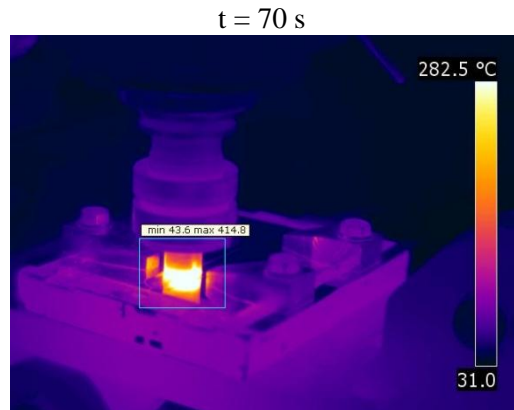
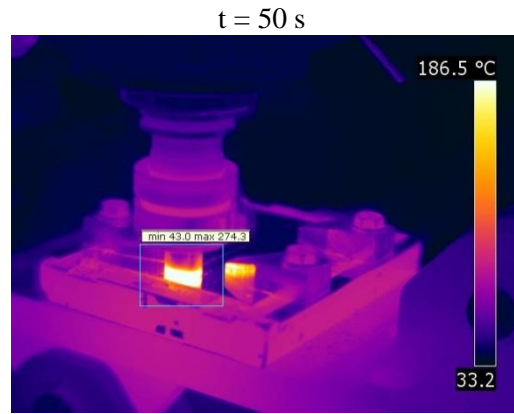
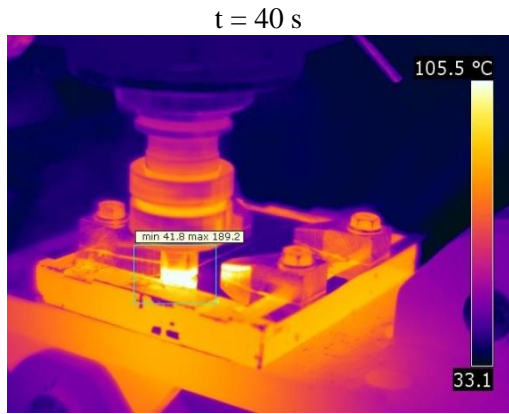
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



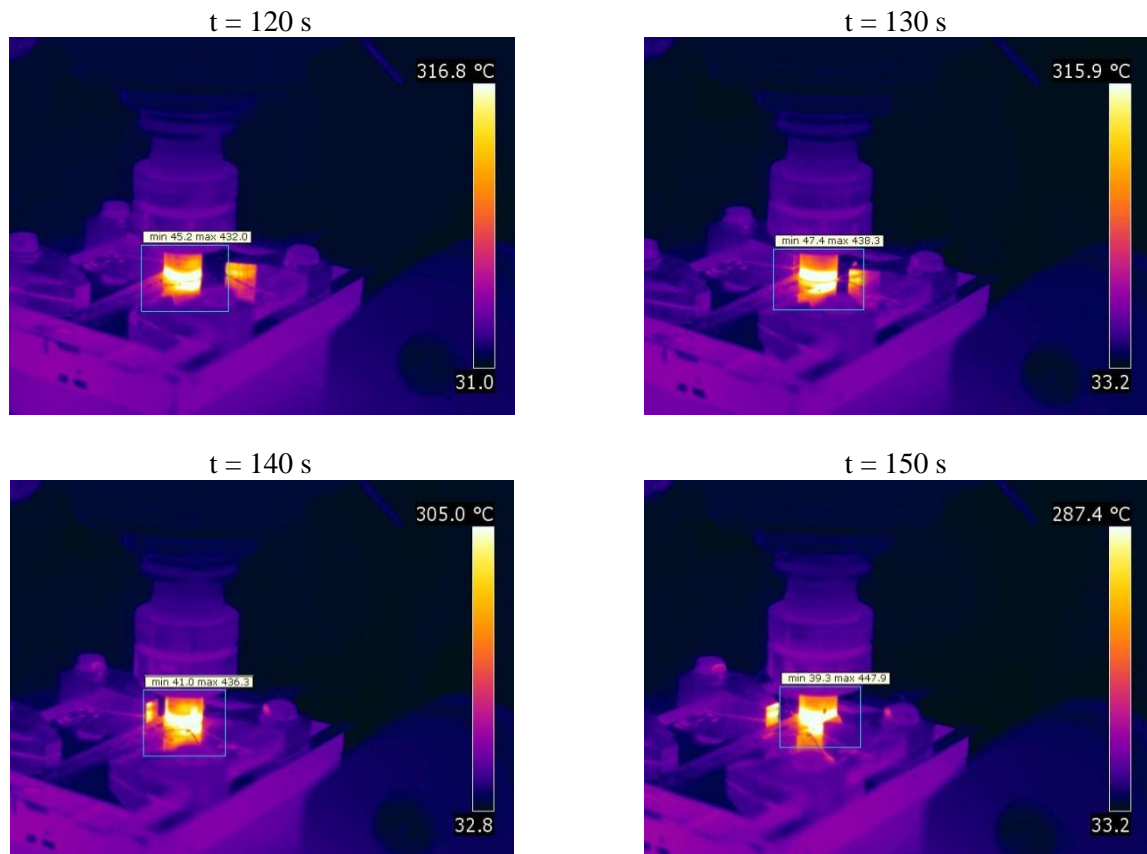
Slika 4.25 Dijagram temperature oboda alata tip C tokom trajanja zavarivanja uzorka ET 09



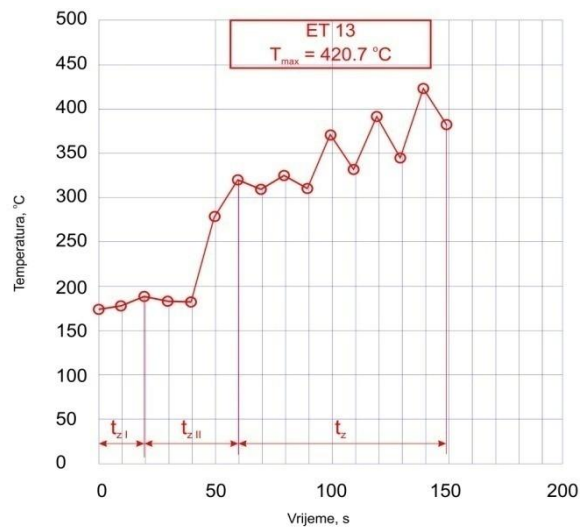
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

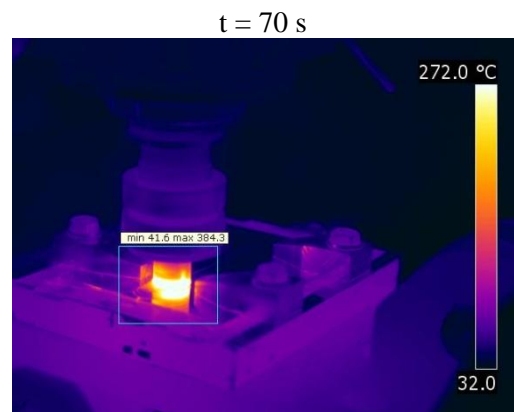
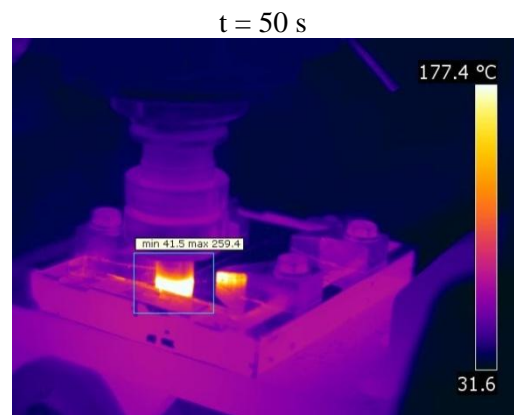
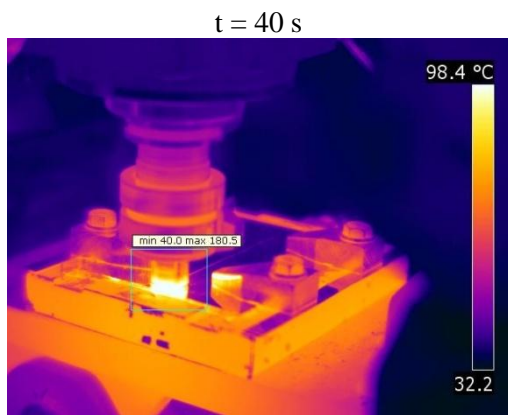
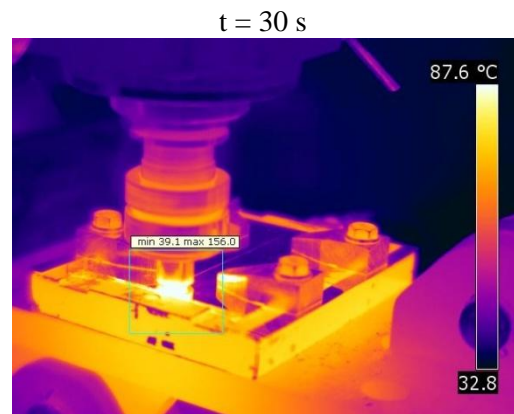
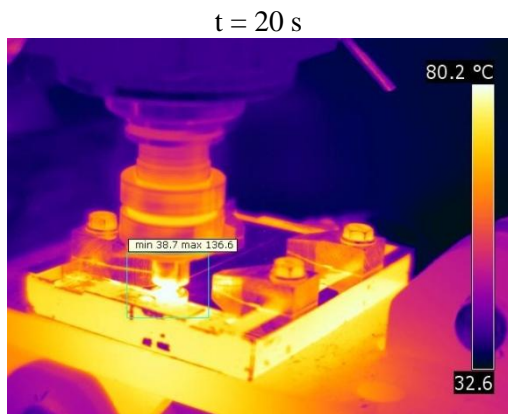
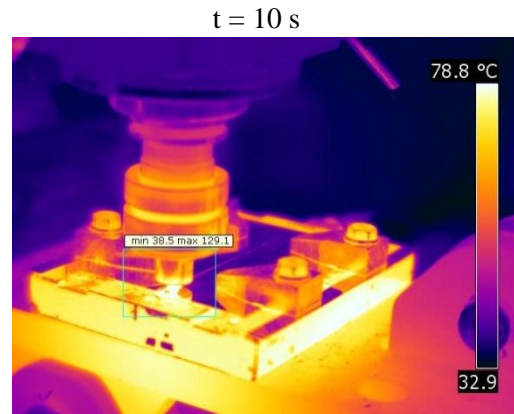


Slika 7.30 IC snimak tokom zavarivanja sa alatom tip D uzorka ET 13

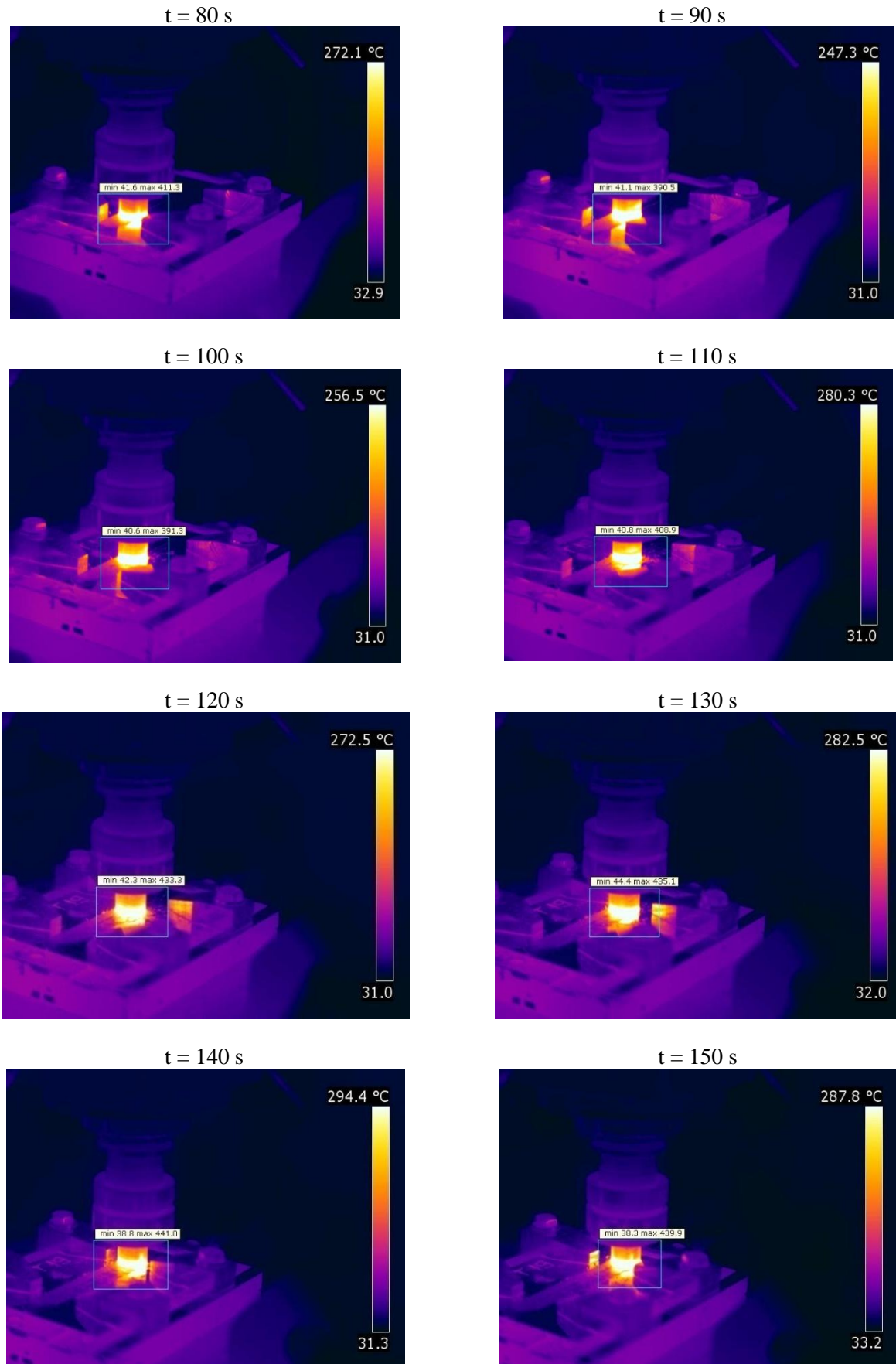


Slika 4.26 Dijagram temperature oboda alata tip D tokom zavarivanja uzorka ET 13

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

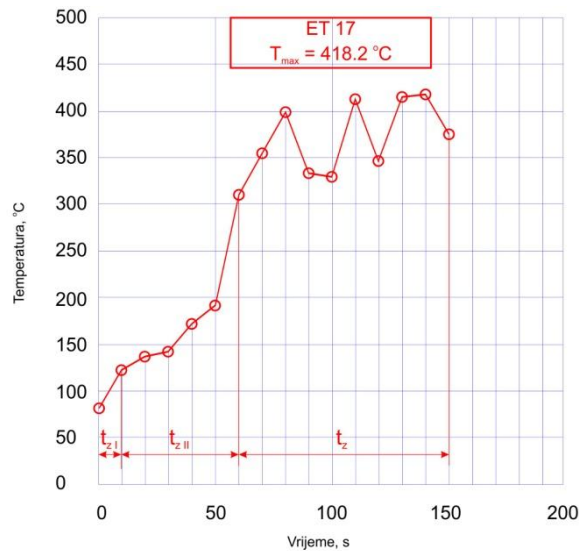


4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.27 IC snimak tokom zavarivanja sa alatom tip E uzorka ET 17

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.28 Dijagram temperature oboda alata tip E tokom zavarivanja uzorka ET 17

4.4 Rezultati ispitivanja MŠ metodama bez razaranja

Uočeni defekti lica i korjena MŠ kod tri metode ispitivanja obilježeni su strelicom na fotografijama. U svim odabranim eksperimentalnim tačkama odnos kinematskih parametara bio je konstantan $n_{alata}/v_{zav} = 10,625$ uz korišćenje različitih tipova alata A, B, C i D.

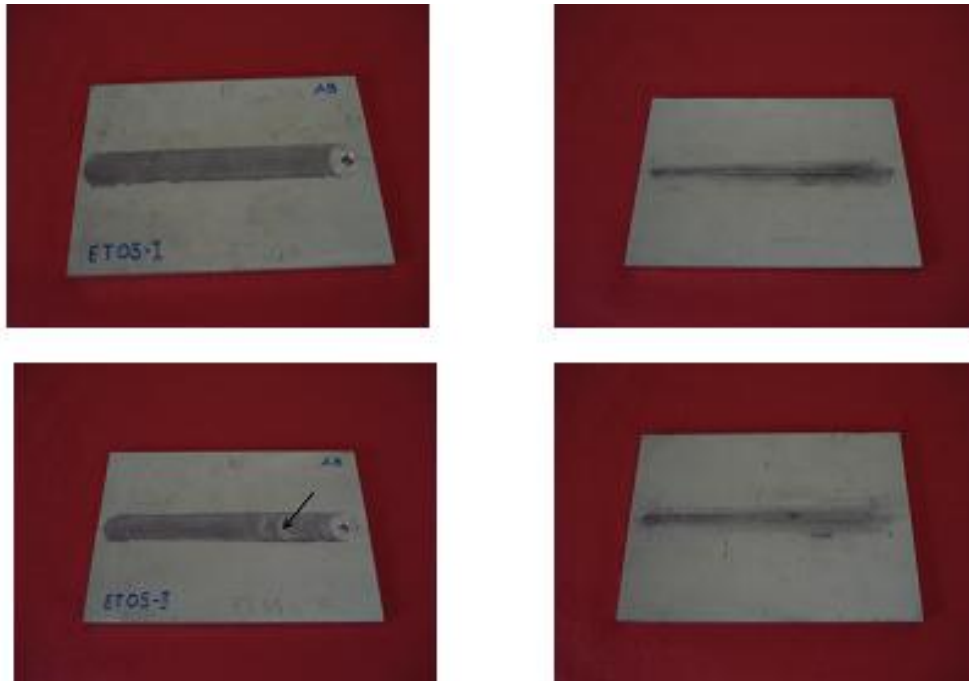
4.4.1 Rezultati vizuelnog pregleda

Ova metoda obuhvata preglede golim okom i lupom. Fotografije izgleda su na slikama 4.29 do 4.32.



Slika 4.29 Izgled lica i korjena MŠ za ET 01 zavarenu sa alatom tip A

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

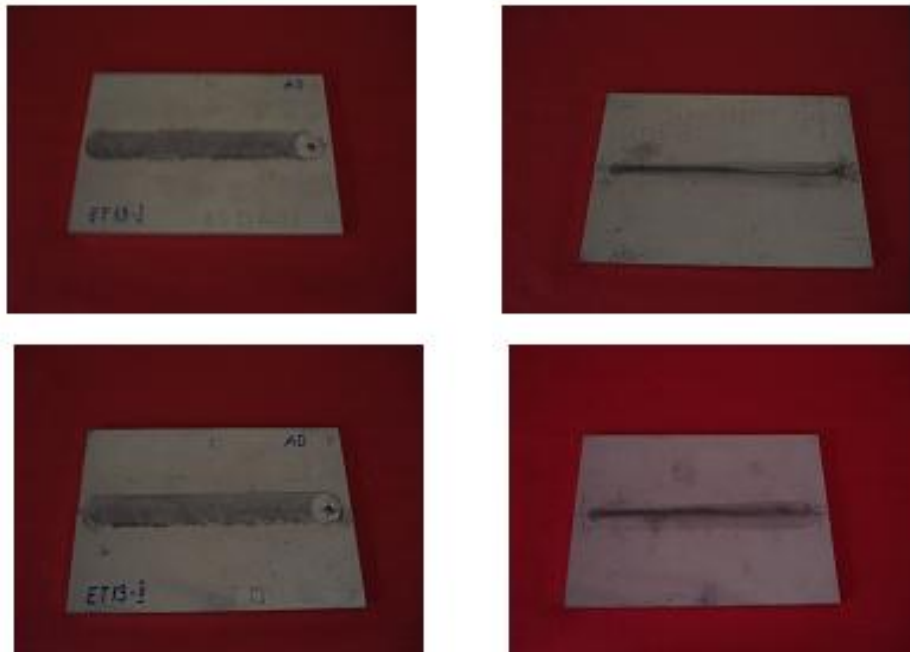


Slika 4.30 Izgled lica i korjena MŠ za ET 05 zavarenu sa alatom tip B



Slika 4.31 Izgled lica i korjena MŠ za ET 09 zavarenu sa alatom tip C

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.32 Izgled lica i korjena MŠ za ET 13 zavarenu sa alatom tip D

4.4.2 Rezultati pregleda penetrantima korjena MŠ

Ovom metodom ispitani su korjenci MŠ na istim uzorcima iz eksperimentalnih tačaka ET 01, ET 05, ET 9 i ET 13. Bojazan da bi nestabilnost parametara na početku i na kraju zavarivanja mogla biti uzrok grešaka tipa nedostatka korjena uslovlila je ocjenu testa nakon primjene penetranta. Rezultati testa dati su na slikama 4.33 do 4.36.



Slika 4.33 Izgled korjena MŠ nakon testa penetrantima uzorka ET 01 zavarenog alatom tip A



Slika 4.34 Izgled korjena MŠ nakon testa penetrantima uzorka ET 05 zavarenog alatom tip B

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.35 Izgled korjena MŠ nakon testa penetrantima uzorka ET 09 zavarenog alatom tip C



Slika 4.36 Izgled korjena MŠ nakon testa penetrantima uzorka ET 13 zavarenog alatom tip D

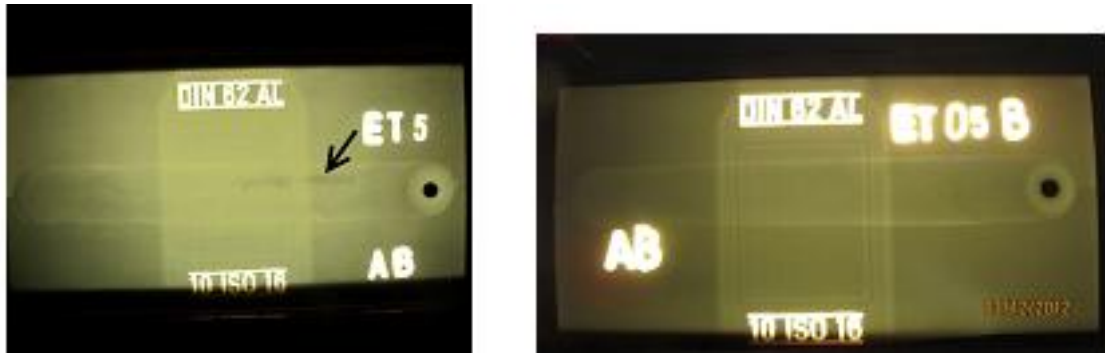
4.4.3 Rezultati radiografske kontrole zavarenih spojeva

Radiogrami zavarenih uzoraka prikazani su na slikama 4.37 do 4.40. Budući da je ova metoda veoma pouzdana u ocjeni zapreminskih grešaka, odnosno grešaka u unutrašnjosti zavarenog mjesta, posebno se obratila pažnja na eventualno prisustvo „tunnel“ efekta.

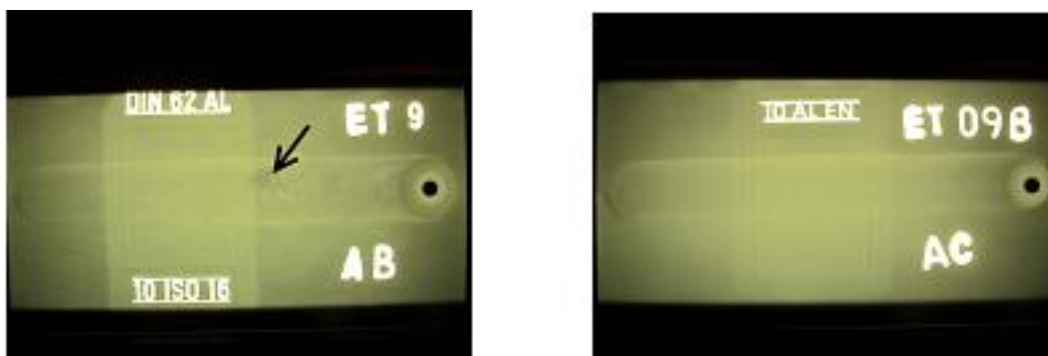


Slika 4.37 Radiogram uzorka ET 01 zavarenog alatom tip A

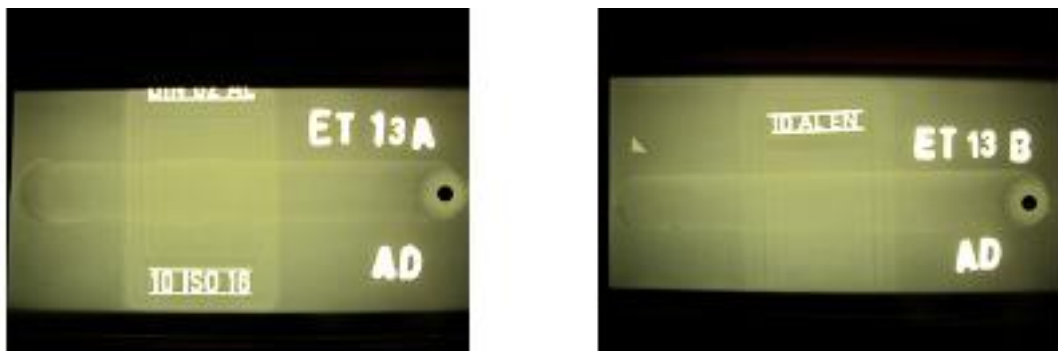
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.38 Radiogram uzorka ET 05 zavarenog alatom tip B



Slika 4.39 Radiogram uzorka ET 09 zavarenog alatom tip C



Slika 4.40 Radiogram uzorka ET 13 zavarenog alatom tip D

Osim uzoraka ET 05 i ET 09 na kojima se vide ranije uočene greške lica MŠ, na ostalim uzorcima senzitivnost ove metode nije pokazala postojanje zapreminskih grešaka. Autor se odlučio da kvalitet zavarenih spojeva ocijeni integrativnim pristupom pri čemu je diskvalifikacioni kriterijum bio da dužina prsline u korjenu metala zavara ispitana PT metodom kumulativno ne bude veća od 60 mm. Rezultati su prikazani u tabeli 4.2.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Tabela 4.2 Ocjena kvaliteta zavarenih spojeva na osnovu VT, PT i RT

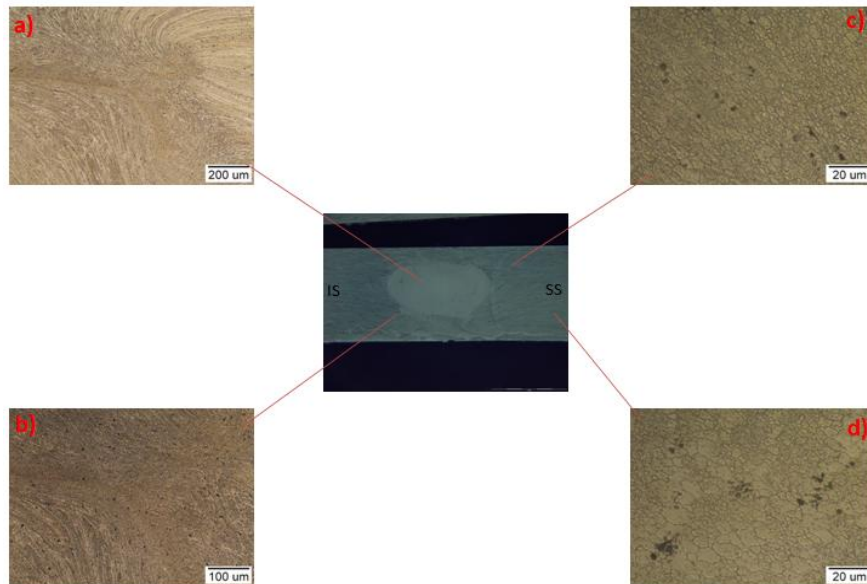
Redni broj	Tip alata A,B,C,D,E	Parametri procesa zavarivanja			Ispitivanje metodama bez razaranja			Ocjena
		n (min^{-1})	v (mm/min)	n/v	VT LMŠ/K MŠ	PT LMŠ/KMŠ	RT	
ET 01 A ET 01 B	A	850	80	10.625	+/+	-/-	+	
ET 02 A ET 02 B	A	750	60	12.500	+/-	-/-	+	
ET 03 A ET 03 B	A	750	80	9.375	+/+	+/+	+	
ET 04 A ET 04 B	A	850	60	14.167	-/-	+/+	+	
ET 05 A ET 05 B	B	850	80	10.625	+/-	+/+	+	
ET 06 A ET 06 B	B	750	60	12.500	+/-	+/-	+	
ET 07 A ET 07 B	B	750	80	9.375	+/-	+/-	+	
ET 08 A ET 08 B	B	850	60	14.167	-/-	-/+	+	
ET 09 A ET 09 B	C	850	80	10.625	+/-	+/+	+	
ET 10 A ET 10 B	C	750	60	12.500	-/-	-/+	+	
ET 11 A ET 11 B	C	750	80	9.375	+/-	-/+	+	
ET 12 A ET 12 B	C	850	60	14.167	+/-	+/+	+	
ET 13 A ET 13 B	D	850	80	10.625	+/-	+/+	+	
ET 14 A ET 14 B	D	750	60	12.500	+/+	+/+	+	
ET 15 A ET 15 B	D	750	80	9.375	-/-	+/+	+	
ET 16 A ET 16 B	D	850	60	14.167	+/-	+/-	+	
ET 17	E	800	70	11.4	+/-	+/-	+	
ET 18	E	800	70	11.4	+/-	+/+	+	
ET 19	E	800	70	11.4	+/-	+/+	+	
ET 20	E	800	70	11.4	+/-	+/+	+	

Legenda: ■ nezadovoljava ■ osrednje ■ zadovoljava LMŠ - lice MŠ, KMŠ – korjen MŠ

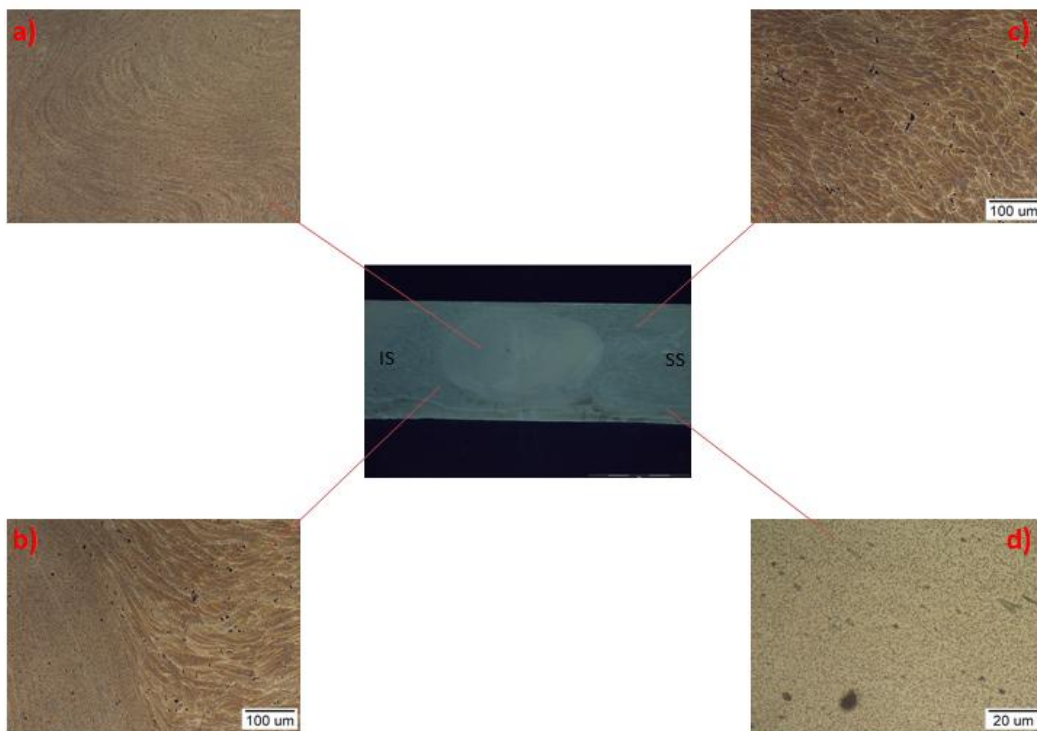
4.4.4 Rezultati analize makro i mikrostrukture

Na slikama 4.41 do 4.44 prikazane su fotografije makroizbrusaka sa izgledima mikrostrukture u karakterističnim oblastima zavarenog spoja u eksperimentalnim tačkama ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

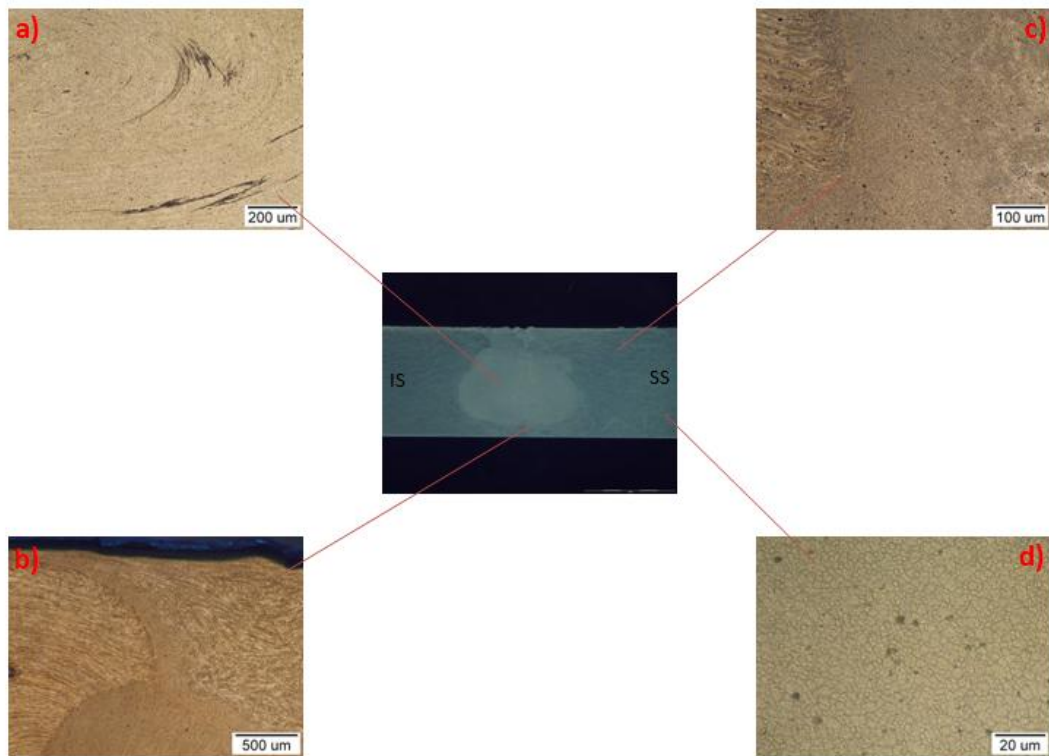


Slika 4.41 Izgled makrostrukture izbruska sa mikrostrukturama a) zone "grumena", b) ZTMU, c) ZUT i d) OM u eksperimentalnoj tački ET 01 zavarenoj sa alatom tip A

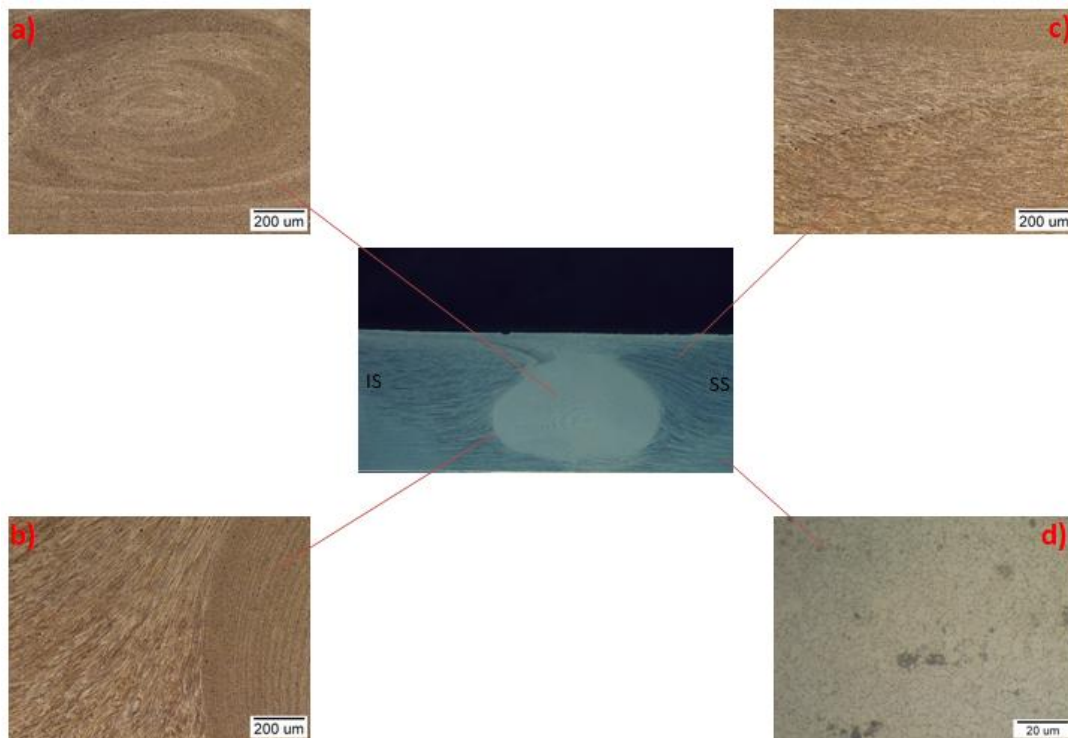


Slika 4.42 Izgled makrostrukture izbruska sa mikrostrukturama a) zone "grumena", b) ZTMU, c) ZUT i d) OM u eksperimentalnoj tački ET 05 zavarenoj sa alatom tip B

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.43 Izgled makrostrukture izbruska sa mikrostrukturama a) zone "grumena", b) ZTMU, c) ZUT i d) OM u eksperimentalnoj tački ET 09 zavarenoj sa alatom tip C



Slika 4.44 Izgled makrostrukture izbruska sa mikrostrukturama a) zone "grumena" b) ZTMU c) ZUT i d) OM u eksperimentalnoj tački ET 13 zavarenoj sa alatom tip D

Pregledom i analizom prikazanih mikrostrukturnih karakteristika jasno se zapažaju različiti mehanizmi koji dovode do formiranja specifičnosti u većini konstituenata MŠ. Jedini zajednički imenilac je prisustvo zaostalih produkata prethodne termičke obrade OM kod svih tačaka

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

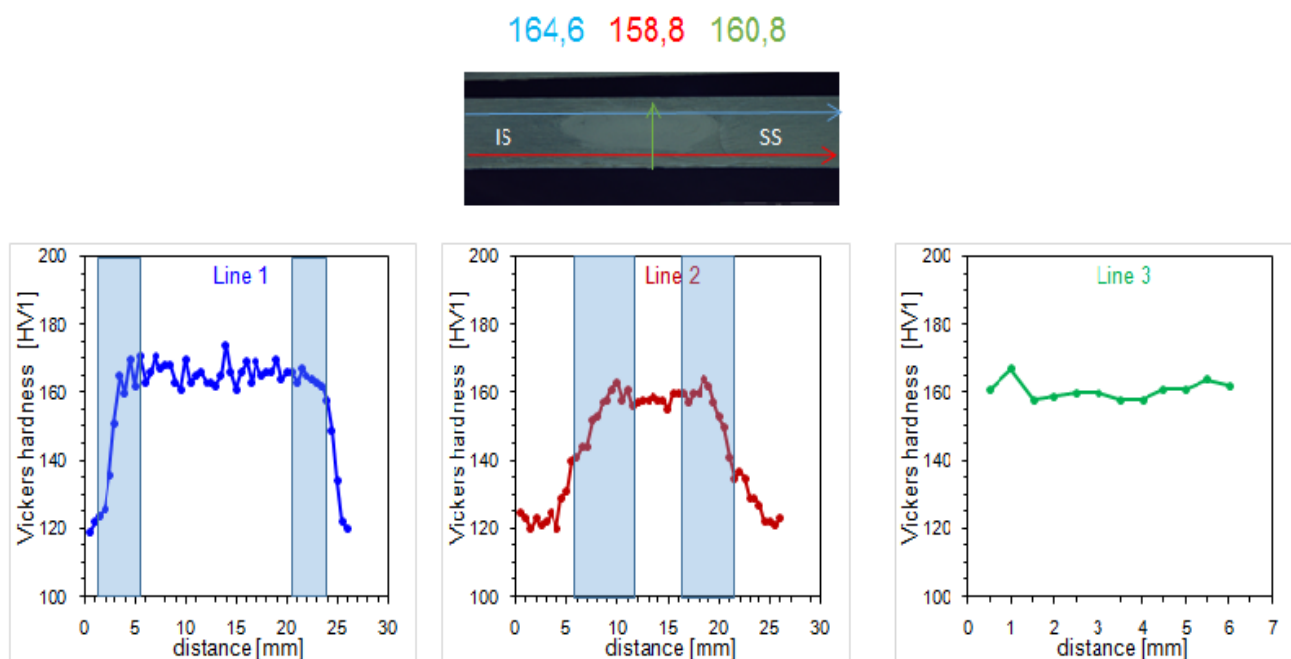
eksperimenta, slika 4.41 d), 4.42 d), 4.43 d) i 4.44 d). Vidljiva su brojna IM jedinjenja, talozi ili znaci “prestarivanja” na koje može da utiče blizina izvora toplote tokom procesa zavarivanja.

Krećući se od OM prema centru MŠ nailazi se na ZUT kod koje se uočava manje ili više izražen uticaj toplote nastale trenjem i okolnog hladnijeg materijala, zbog čega se djelimično mijenja njena lokacija, a što se zapaža veličinom krupnijih zrna, slika 4.41 c) i slika 4.42 c). Zrna se smanjuju prema regijumu bližem ZTMU mijenjajući orijentaciju usled toplotnog inputa koji neposredno zavisi od parametara i pravca zavarivanja, djelimično vidljivo na slikama 4.43 c), 4.44 c). Ova struktura kao i struktura OM ne posjeduje elemente rekristalizacije. U tranzicionoj oblasti prema ZTMU koja je veoma blizu ZTMU, značajno se smanjuje veličina zrna, jer su zrna u ZTMU zahvaćena intenzivnijem uticaju ekstremno visoke brzine plastične deformacije i gradijenta toplote, slika 4.41 b), 4.42 b), 4.43 b) i 4.44 b).

Kulminiranje ova dva uticaja dešava se u zoni “grumena”, osobenoj po izrazito sitnim i finim zrnima koja se pripisuju dinamičkoj rekristalizaciji, slika 4.41 a), 4.42 a), 4.43 a) i 4.44 a). Dinamička rekristalizacija se smatrala nemogućom kod legura aluminijuma iz razloga što se oporavak odvija brzo na povišenim temperaturama pogotovo u prisustvu velike koncentracije čestica druge faze.

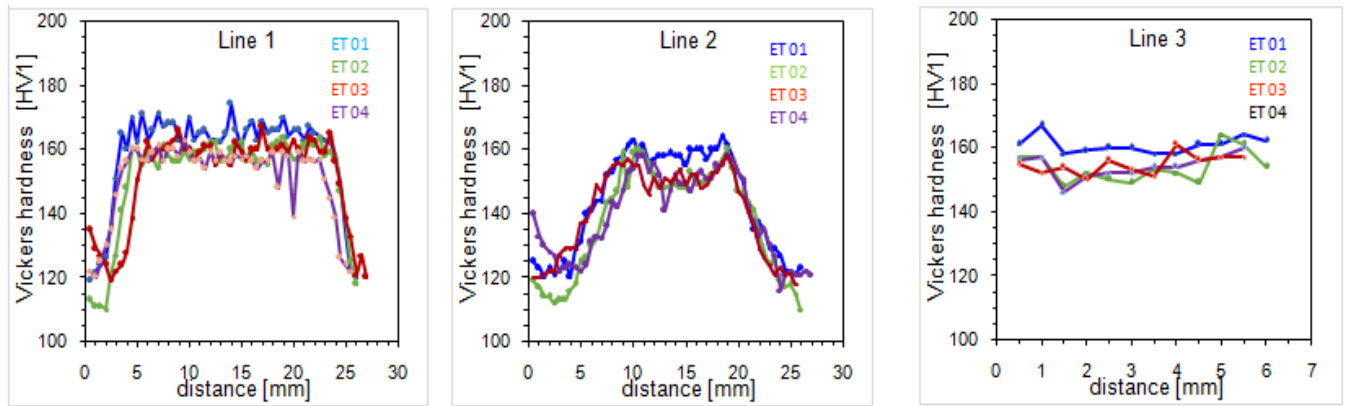
4.4.5 Rezultati mjerenja tvrdoće poprečnog presjeka

Na slikama 4.45 do 4.52 dati su pojedinačni grafički prikazi profila tvrdoće za eksperimentalne tačke ET 01, ET 05, ET 09 i zbirni grafički prikaz distribucije tvrdoće za sve eksperimentalne tačke grupisane po tipu korišćenog alata.

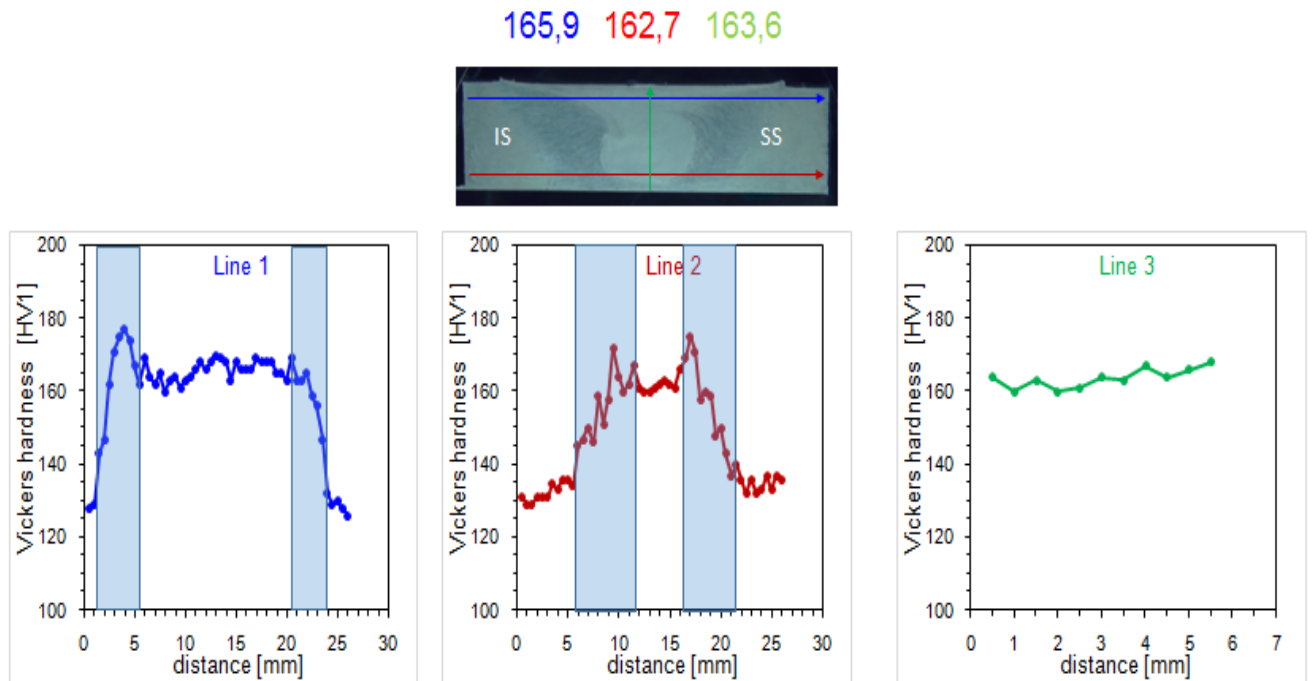


Slika 4.45 Profil raspodjele tvrdoće u ET 01 zavarenoj sa alatom tip A

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

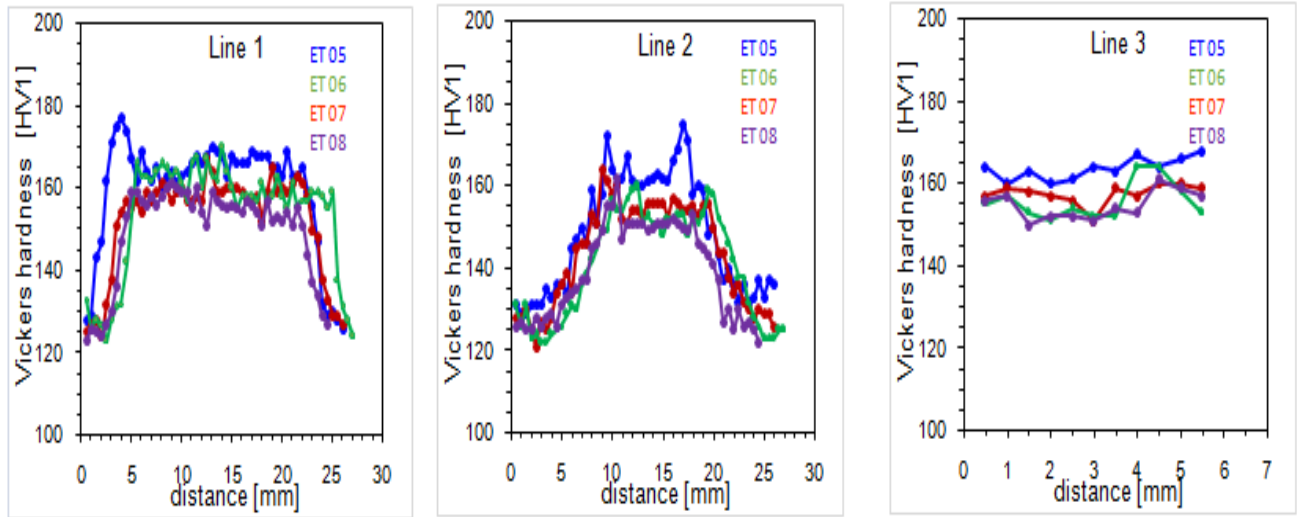


Slika 4.46 Zbirni grafički prikazi raspodjele tvrdoće za ET 01, ET 02, ET 03 i ET 04 zavarene alatom tip A



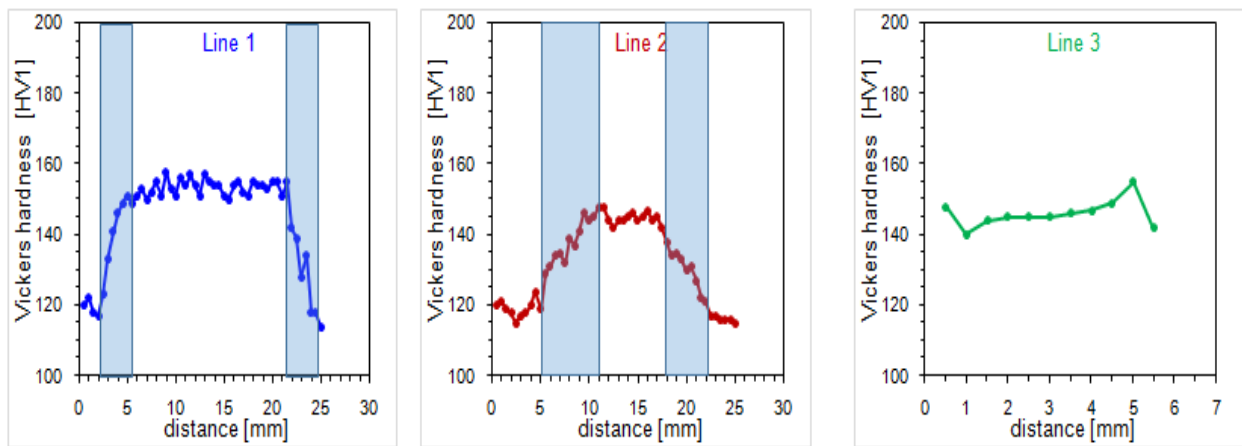
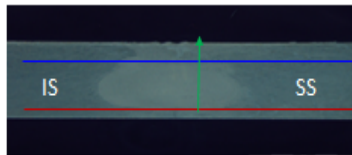
Slika 4.47 Profil raspodjele tvrdoće za ET 05 zavarenoj alatom tip B

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



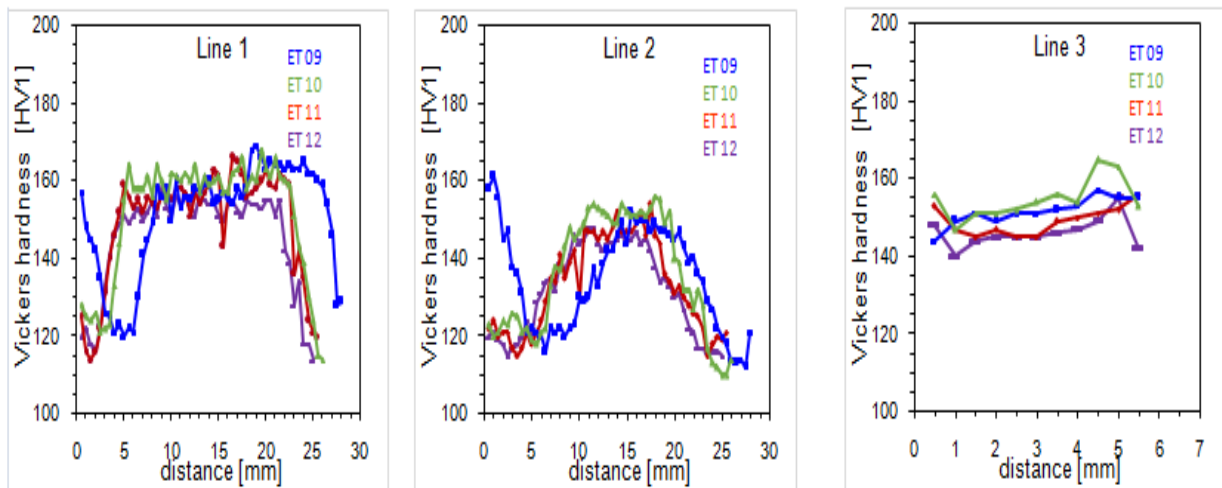
Slika 4.48 Zbirni grafički prikazi raspodjele tvrdoće za ET 05, ET 06, ET 07 i ET 08 zavarene alatom tip B

153,1 144,5 146

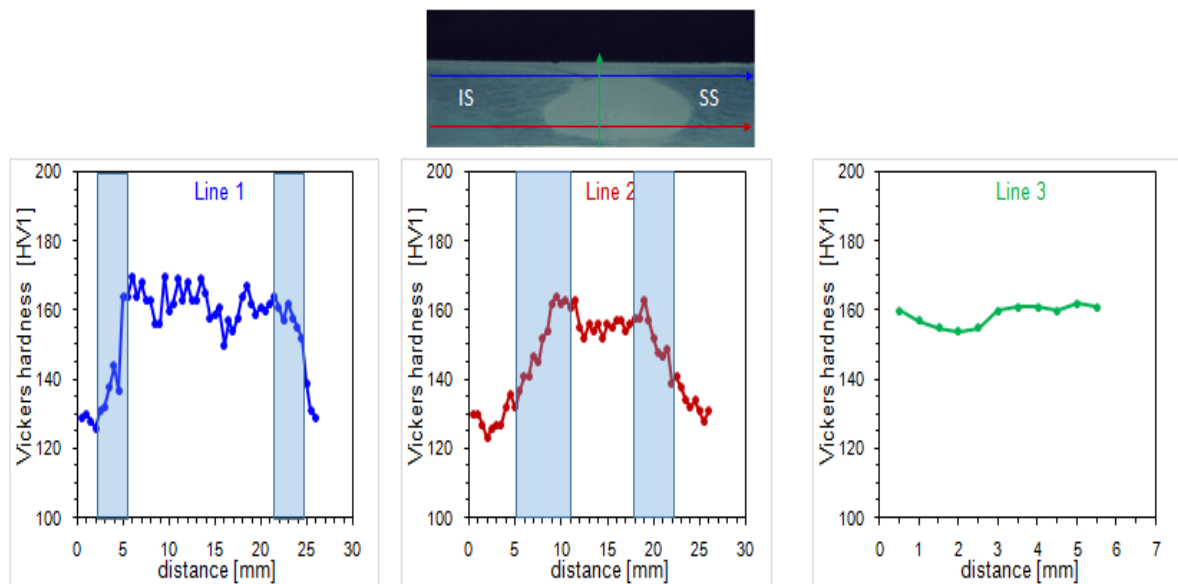


Slika 4.49 Profil raspodjele tvrdoće za ET 09 zavarenoj sa alatom tip C

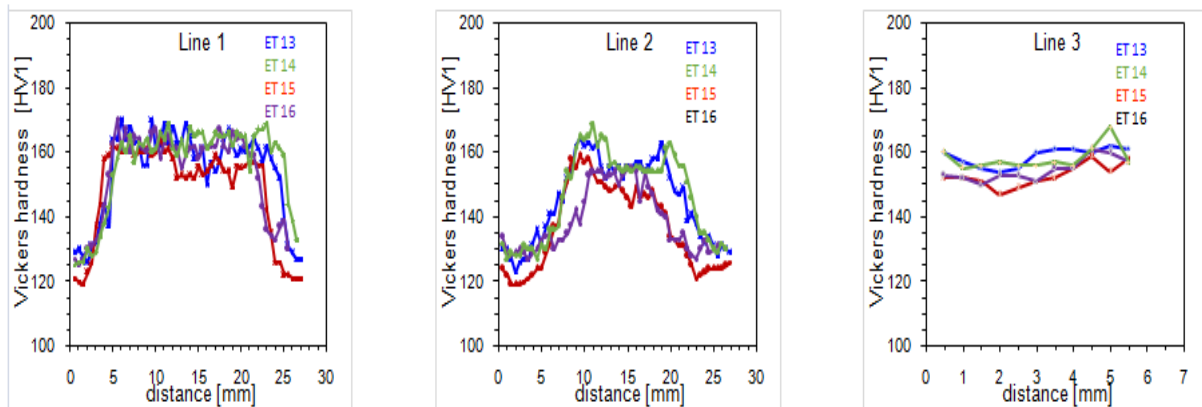
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.50 Zbirni grafički prikazi raspodjele tvrdoće za ET 09, ET 10, ET 11 i ET 12 zavarene alatom tip C
162,4 157,3 158,7



Slika 4.51 Profil raspodjele tvrdoće za ET 13 zavarenoj alatom tip D



Slika 4.52 Zbirni grafički prikazi raspodjele tvrdoće za ET 13, ET 14, ET 15 i ET 16 zavarene alatom tip D

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Ovakav način prezentacije profila i distribucije tvrdoće ima smisla iz razloga što se pregledom i upoređivanjem grafikona stiče slika o raspodjeli tvrdoće, ne samo od strane napredovanja prema povratnoj strani MŠ, već i na površini poprečnog presjeka od podnožja prema vrhu MŠ. Tako na primjer, nivo vrijednosti tvrdoće kod uzoraka zavarenih sa alatom tip A ($n = 850^{-1}$ min, $v = 80$ mm/min) po površini poprečnog presjeka MŠ (linija 1) u ZTMU dostiže vrijednost od 10% do 15% veću na strani napredovanja i na povratnoj strani MŠ od tvrdoće OM. Najmanja vrijednost tvrdoće u zoni “grumena” i povratnoj strani MŠ (oko 18%) registrovana je kod ET 04 kod koga je brzina zavarivanja iznosila $v = 60$ mm/min pri istom broju obrtaja alata i tipu alata. Uzorci zavareni alatom tip B pokazuju sličnu tendenciju distribucije tvrdoće pri čemu je očigledan pad tvrdoće sa smanjenim brojem obrtaja alata u zoni bliže korjenu MŠ, dok je tvrdoća u zoni bliskoj uticaju čela alata značajno veća od tvrdoće OM na strani napredovanja od ZTMU prema ZUT.

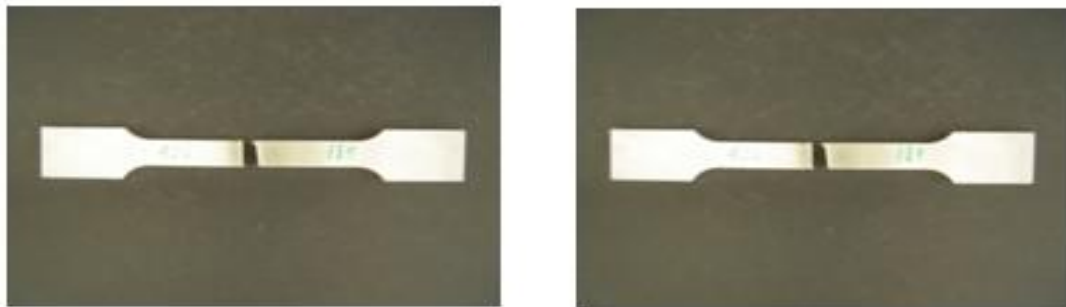
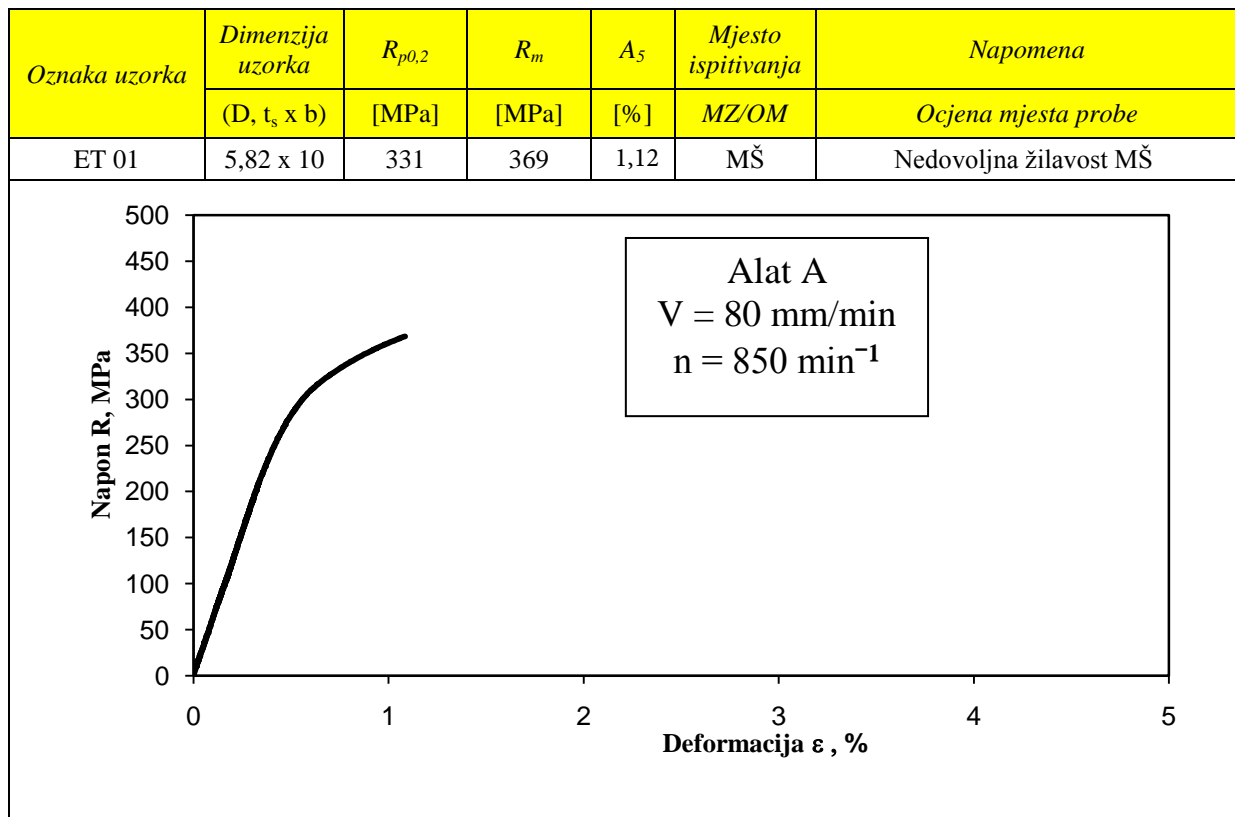
Tvrdoća u poprečnom presjeku uzoraka zavarenih alatom tip C u zoni linije 1 na nivou je tvrdoće OM, dok je na liniji 2 i na liniji 3 značajno manjih vrijednosti bez značajnijeg uticaja brzine zavarivanja i broja obrtaja alata. Zona “grumena” ima vrijednost tvrdoće blizu tvrdoće OM kod uzoraka zavarenih alatom tip D i bez značajnijeg pada tvrdoće u zoni linije 1 na strani napredovanja i na povratnoj strani, dok na liniji 2 ima ekstremno pad u ZUT.

Porast tvrdoće u zoni “grumena” MŠ, većoj čak od OM, može se objasniti ili smanjenjem veličine zrna ili izdvajanjem sekundarnih faza usled pojave rekristalizacije koja je dominantna u ovoj oblasti zavarenog spoja. Povećana brzina zavarivanja uslovljava da se pri nepromijenjenom broju obrtaja alata, povećava tvrdoća u oblastima koje su bliže čelu alata što stvara termomehanička naprezanja. Gledano i po debljini uzorka to je oblast koja pogoduje neposrednom direktnom istovremenom uticaju trenja i deformacije. Veći ugao konusa alata i dužina trna utiču na početak raspodjele tvrdoće od centra MŠ prema strani napredovanja ili povratnoj strani, jer je u zoni “grumena” po liniji 3 tvrdoća bez velikih promjena (uzorci zavareni alatom tip C od 140 HV1 do 165 HV1, odnosno 150 HV1 do 165 HV1). Uticaj kinematskih parametara najočigledniji je na profilima raspodjele tvrdoće u regionu udaljenom od podnožja MŠ na strani napredovanja sa prilično ujednačenim vrijednostima tvrdoće ZTMU, dok na liniji 2 profil tvrdoće ima pad na udaljenijim mjestima od centra MŠ.

4.4.6 Rezultati testa jednoosnim zatezanjem

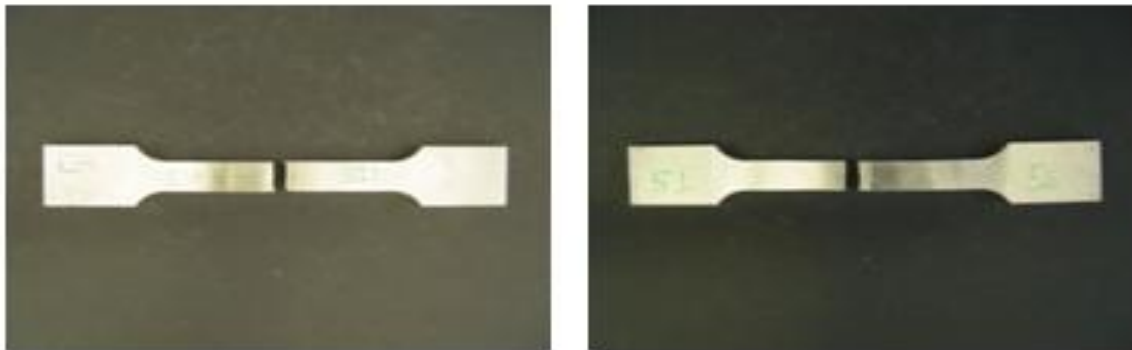
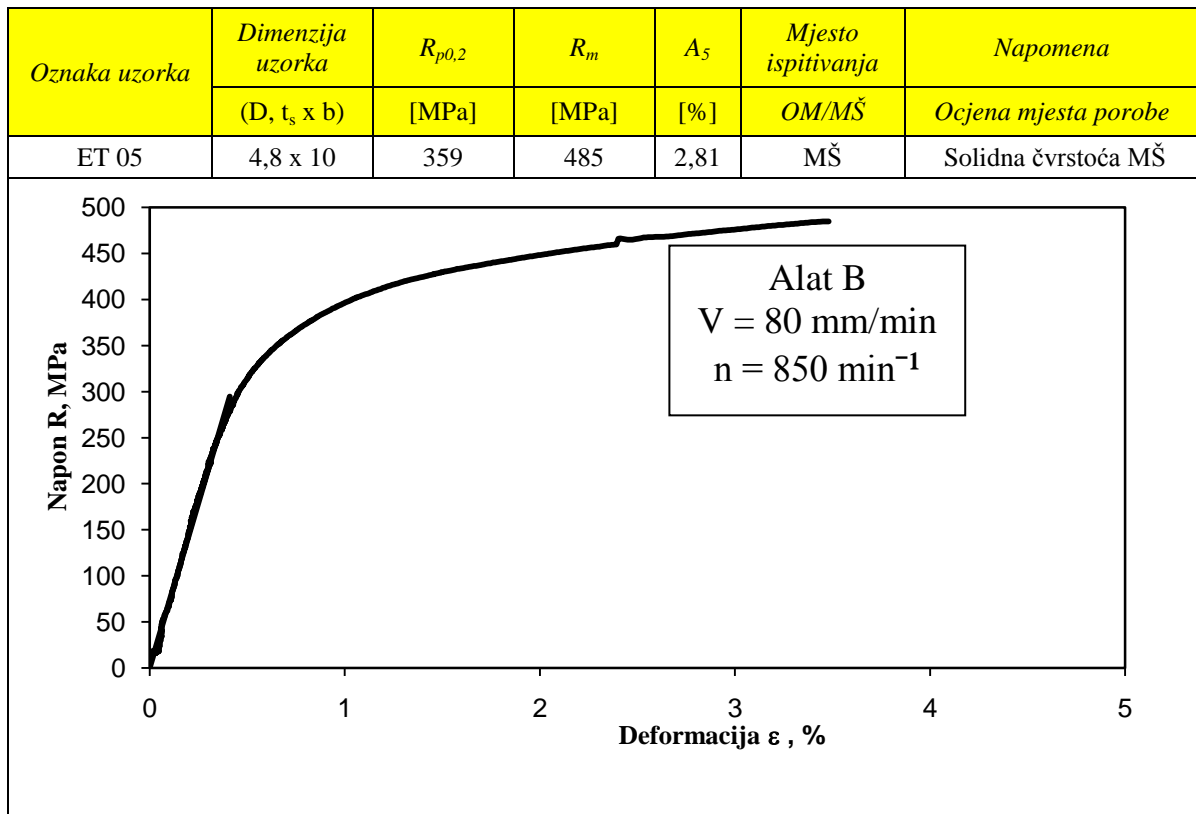
Statička ispitivanja jednoosnim zatezanjem izvedena su na svih 32 epruvete iz 16 komada eksperimentalno zavarenih ploča korišćenjem različitih tipova alata i promjenljive kombinacije broja obrtaja alata i brzine zavarivanja. Iz već navedenih razloga, na slikama 4.53 do 4.57 prikazani su dijagrami zatezanja u tačkama ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.53 Inženjerski dijagram zatezanja i izgled epruveta nakon prekida u ET 01 zavarenoj alatom tip A

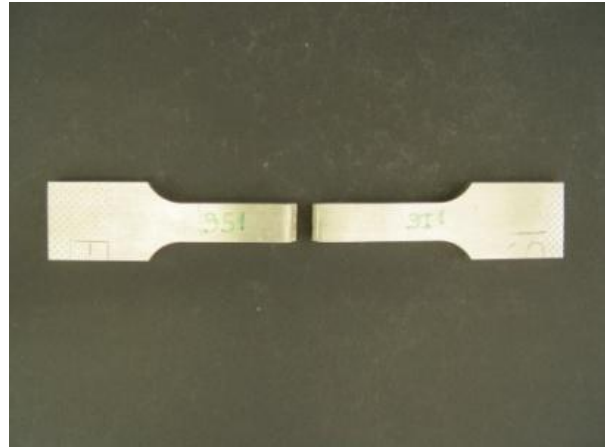
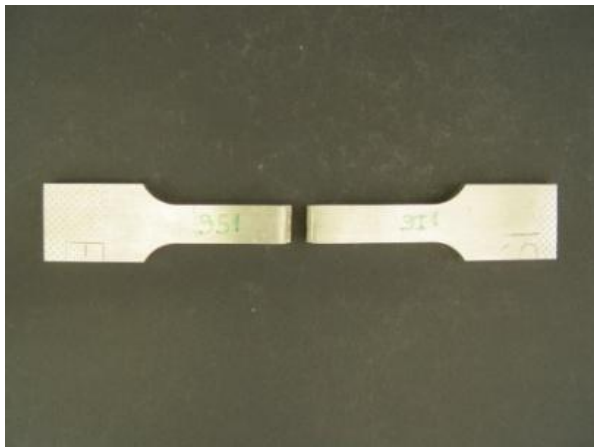
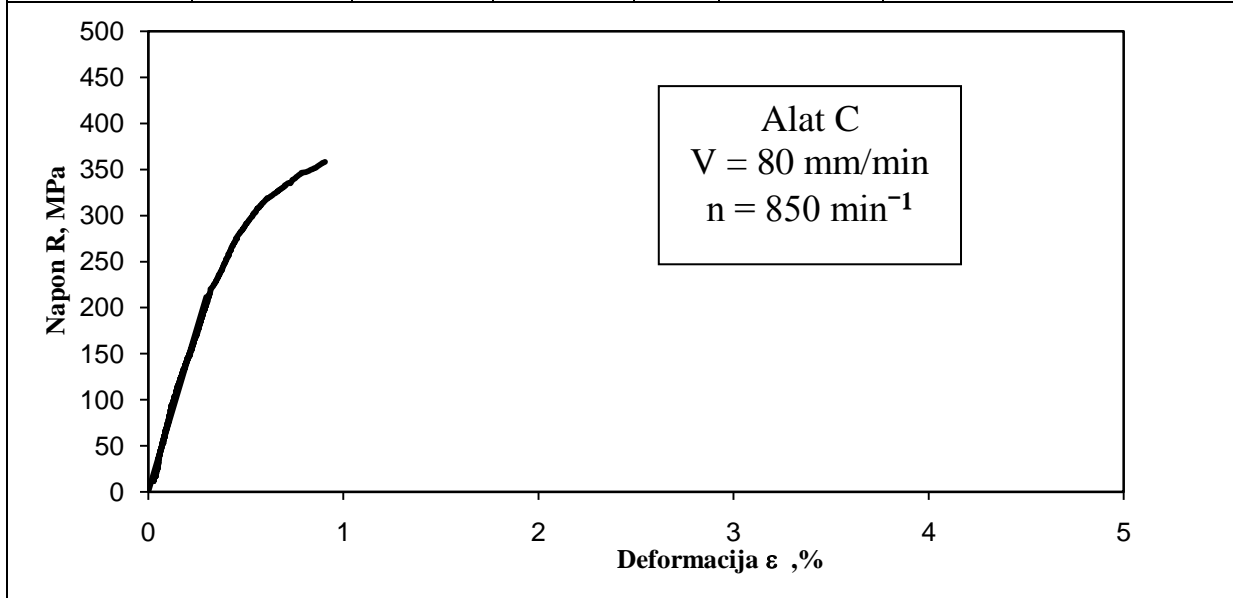
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.54 Inženjerski dijagram zatezanja i izgled epruveta nakon prekida u ET 05 zavarenoj alatom tip B

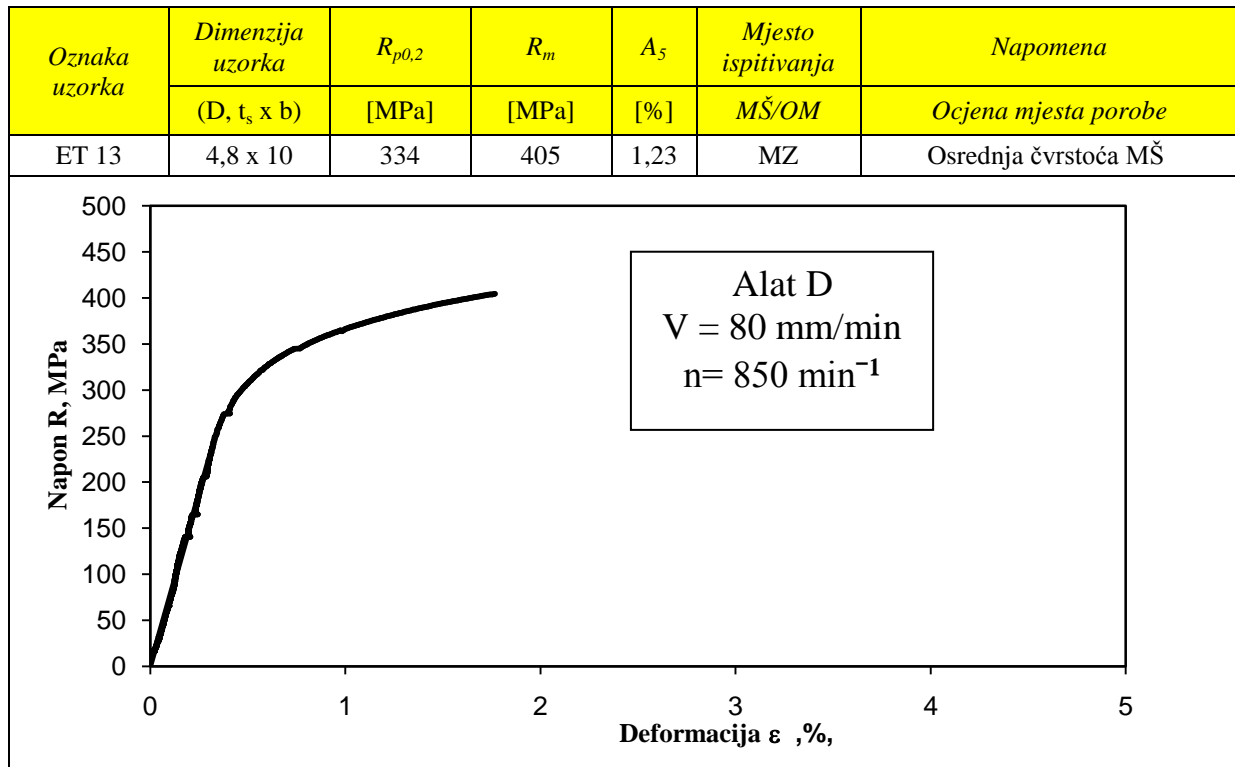
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Oznaka uzorka	Dimenzija uzorka	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Mjesto ispitivanja	Napomena
	(D, t _s x b)	[MPa]	[MPa]	[%]	MZ/OM	Ocjena mjesta porobe
ET 09	4,8 x 10	325	359	0,40	MZ	Nedovoljna čvrstoća MŠ



Slika 4.55 Inženjerski dijagram zatezanja i izgled epruveta nakon prekida uzorka u ET 09 zavarenoj alatom tip C

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.56 Inženjerski dijagram zatezanaja i izgled epruveta poslije prekida u ET 13 zavarenoj sa alatom tip D

Ove rezultate potrebno je tabelarno predstaviti radi komparativne analize i donošenja odgovarajućih zaključaka.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Tabela 4.3 Prikaz rezultata mehaničkog ispitivanja osnovnog materijala i zavarenih ploča u ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13

Broj uzorka	Zatezna čvrstoća, R_m [MPa]	Napon tečenja, $R_{p0,2}$ [MPa]	Modul elastičnosti, E [MPa]	Izduženje, A_5 [%]	Kontrakcija,Z [%]
OM	643	583	73455	66	17,64
ET01	369	331	62407	1,12	-
ET05	485	359	71738	2,81	-
ET09	359	325	71363	0,40	-
ET13	405	334	74580	1,23	-

Potrebno je takođe tabelarno prikazati i sve eksperimentalno dobijene vrijednosti pametara zatezanja sa inženjerskih dijagrama dobijenih jednoosnim zatezanjem epruveta iz svih 16 eksperimentalnih tačaka kako bi odredila zatezna efikasnost zavarenih spojeva $\mathcal{E}_{M\dot{S}/OM}$.

To je ključni indikator kvaliteta zavarenih spojeva i mjera uspješnosti primjene postupka ZTM kod ove legure aluminijuma.

Tabela 4.4 Pregled rezultata testa jednoosnim zatezanjem sa vrijednošću zatezne efikasnosti zavarenih spojeva

Eksp. tačka	Tip alata A,B,C,D	Geometrijski faktori postupka ZTM		Kinematski faktori postupka ZTM		Parametri statičkih ispitivanja			Efikasnost zav. spoja $\mathcal{E}_{M\dot{S}/OM}$ [%]
		h , [mm]	α [°]	v_{zav} [mm/min]	n_{alata} [%/min]	Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	Napon tečenja $R_{p0,2}$ MPa	Izduženje, A_5 [%]	
ET01	A	5,1	10	80	850	369	3301	1,12	57,30
ET02	A	5,1	10	60	750	455	287	1,08	70,06
ET03	A	5,1	10	80	750	481	355	2,73	74,75
ET04	A	5,1	10	60	850	423	343	1,04	65,60
ET05	B	5,4	10	80	850	485	359	2,81	75,48
ET06	B	5,4	10	60	750	323	284	0,80	52,02
ET07	B	5,4	10	80	750	481	361	3,87	74,79
ET08	B	5,4	10	60	850	392	318	1,06	60,08
ET09	C	5,4	2,5	80	850	359	325	0,40	57,74
ET10	C	5,4	2,5	60	750	375	293	0,90	58,82
ET11	C	5,4	2,5	80	750	405	323	1,06	62,82

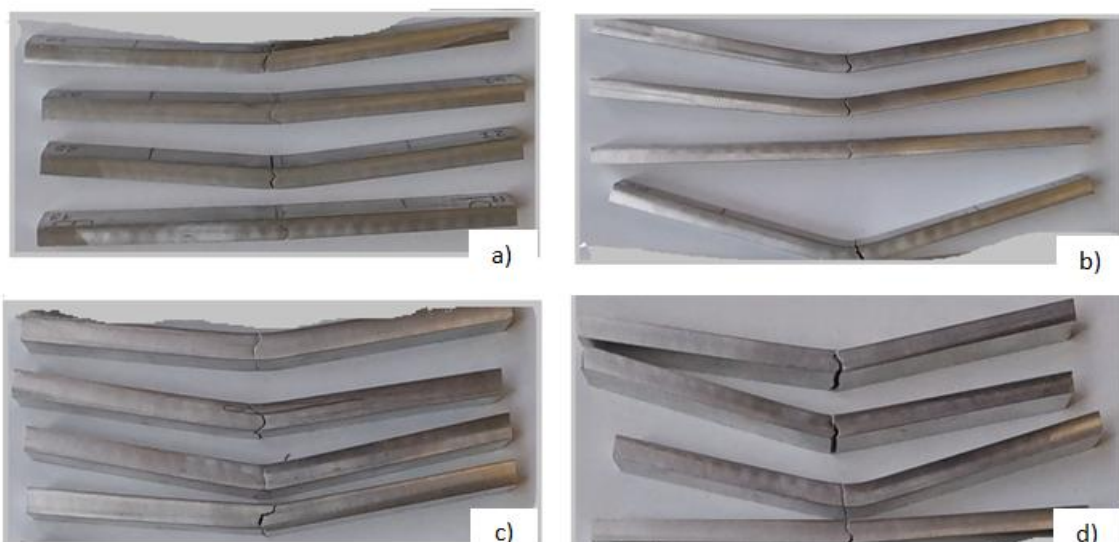
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

ET12	C	5,4	2,5	60	850	469	330	3,18	72,58
ET13	D	5,1	2,5	80	850	405	334	1,23	62,92
ET14	D	5,1	2,5	60	750	423	338	1,06	65,66
ET15	D	5,1	2,5	80	750	364	296	0,63	56,61
ET16	D	5,1	2,5	60	850	370	360	0,25	57,15

Površni osvrt na prezentirane rezultate statičkih karakteristika MŠ uzoraka zavarenih sa istim odnosom kinematskih parametara, odnosno najvećim vrijednostima broja obrtaja alata i brzine zavarivanja u eksperimentu, ide u prilog teorijskim razmatranjima. Povećanjem brzine zavarivanja i broja obrtaja alata dobijaju se bolji rezultati zateznih karakteristika legura aluminijuma povišene čvrstoće, a lom epruvete je u zoni „grumena“ obično sa orijentacijom prema povratnoj strani MŠ.

4.4.7 Rezultati savojnog testa zavarenih spojeva

Tokom izvođenja probe savijanjem oko lica MŠ epruvete iz 16 eksperimentalnih tačaka registrovan je ugao njihovog savijanja do pojave prslina na korjenoj strani. Nakon toga vizuelnom metodom ocijenjena je bliža lokacija pojave prslina i pravac prostiranja. Kod svih savijanih epruveta prslina se pojavljuju u ZTMU na prelasku zone „grumena“ prema okolnim sadržajima prema povratnoj strani na udaljenostima od 6 mm do 9 mm od centra jezgra MŠ. Mjesta pojave prslina u saglasnosti su sa nalazom kontrole penetrantima kada su nađene greške nedostatka „provara“ i profilom raspodjele tvrdoće na liniji 2 (korjena strana) u podnožju MŠ. Na slici 4.57 su izgledi epruveta nakon pojave prslina (broj eksperimentalne tačke gledano odozdo prema gore) na kojima se vidi da je prslina na svakoj epruveti začeta u centru MŠ sa pravcem prostiranja najčešće prema povratnoj strani. Pojava prslina podudara se sa lokacijom greške u korjenu MŠ sa smjerom prslina u najvećem broju prema povratnoj strani MŠ.

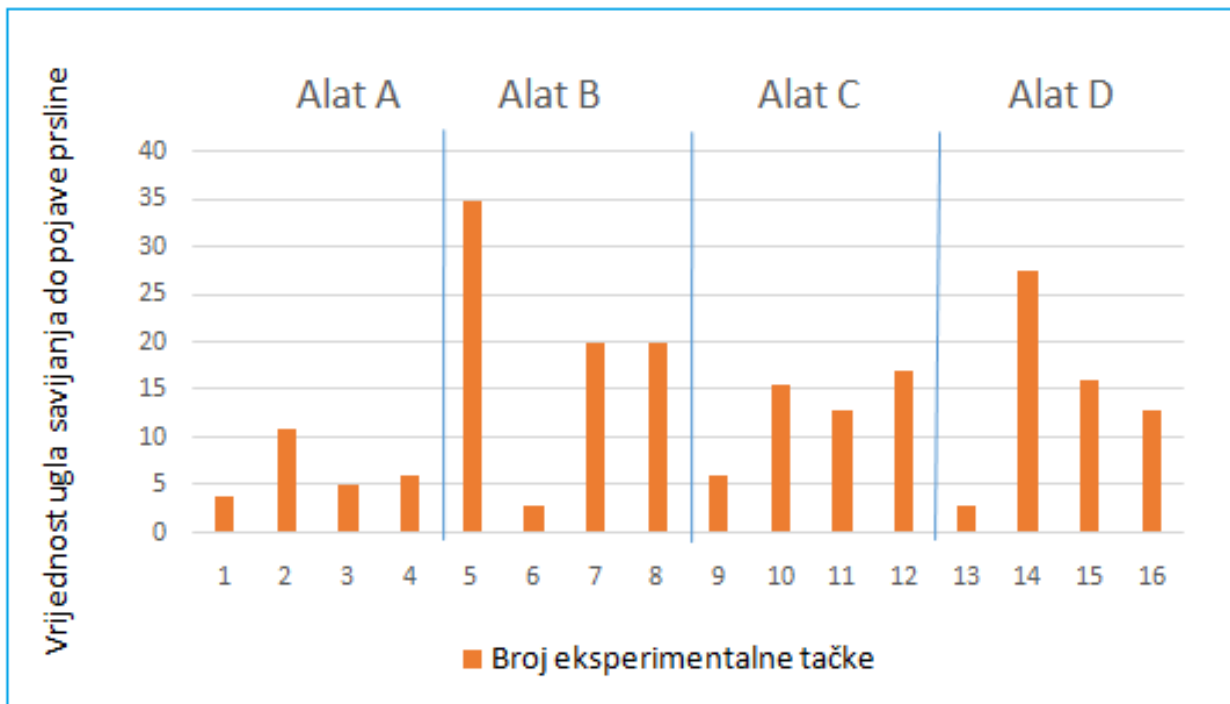


Slika 4.57 Izgled mjesta loma na epruvetama nakon savijanja u tri tačke u ET 01 do ET 16 zavarenih alatima A, B, C i D

Radi lakše uporedne analize rezultata testa na savijanje u tri talke izvršeno je njihovo grafičko prikazivanje. Cilj je da se komparacijom utvrdi do kojeg su se stepena mogle savijati epruvete

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

prije nego se pojavi prslina na korjenoj strani MŠ pri upotrebi različitih alata za zavarivanje, slika 4.58.



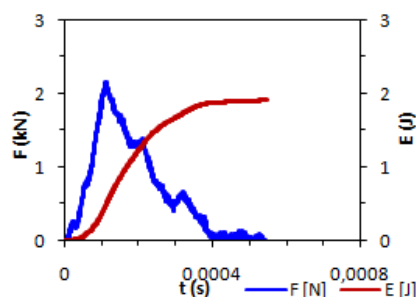
Slika 4.58 Grafički prikaz vrijednosti ugla savijanja do pojave prsline na epruvetama u eksperimentalnim tačkama ET 01 do ET 16

4.5 Rezultati ispitivanja energije udara

Interpretacija izmjerenih vrijednosti energije udara i udarne žilavosti urađenih tokom testa na Charpy klatnu podrazumijeva grafičku interpretaciju odnosa sile i vremena i energije i vremena. Osim toga potrebno je odrediti udarnu žilavost KV , energiju udara Eu , količinu energije za iniciranje prsline Ei i količinu energije potrebnu za njeno propagiranje Ep .

Prvo je neophodno dobiti vrijednosti za OM, a kasnije za ZTMU u MŠ zavarenih epruveta. Na slici 4.59 tablično je prikazana vrijednost navedenih parametara, grafički odnos *sila-vrijeme*, *energija-vrijeme* i izgled polomljene epruvete iz OM.

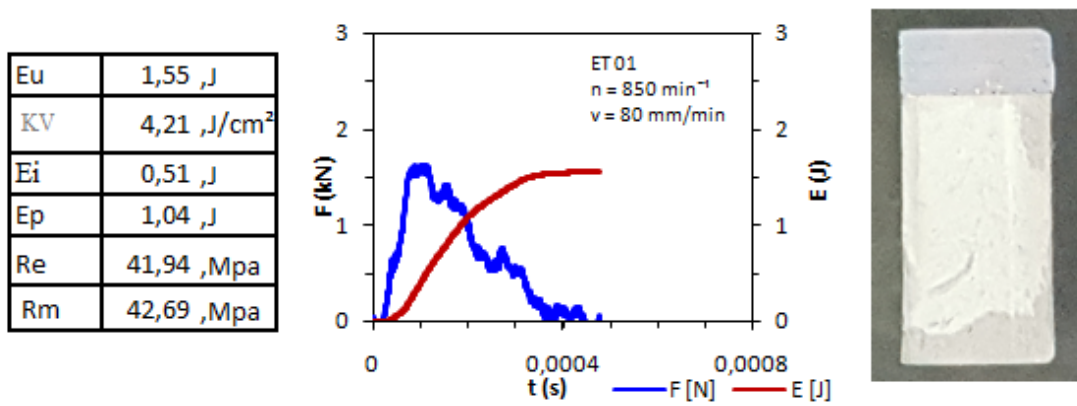
Eu	1,87 J
KV	3,9 J/cm ²
Ei	0,45 J
Ep	1,42 J
Re	47,29 ,MPa
Rm	51,32 ,MPa



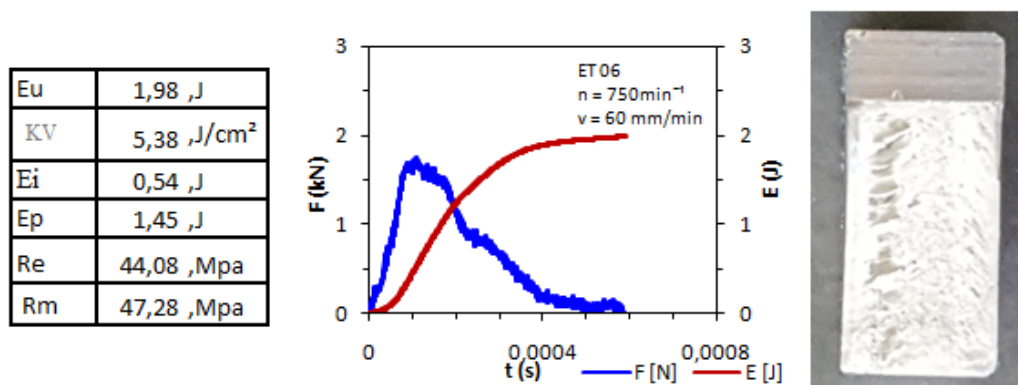
Slika 4.59 Grafički prikaz odnosa sila – vrijeme i energija – vrijeme sa izgledom epruvete iz osnovnog materijala poslije loma

Na slikama od 4.60 do 4.79 prikazani su dijagrami zavisnosti *sila-vrijeme* i *energija-vrijeme* za različite pozicije zarezu u zavarenom spoju u ET 01, ET 06, ET 11 i ET 16.

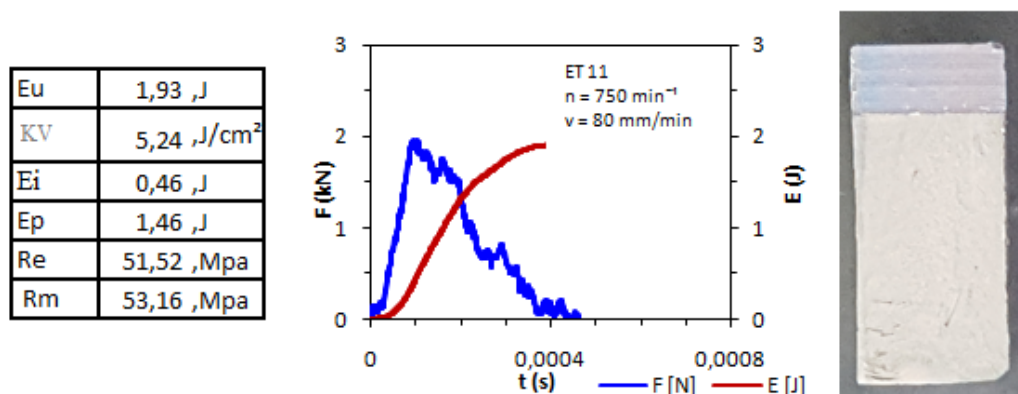
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.60 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom polomljene epruvete na zarezu u centru MŠ za ET 01 (alat A, v=80 mm/min, n= 850 min⁻¹)



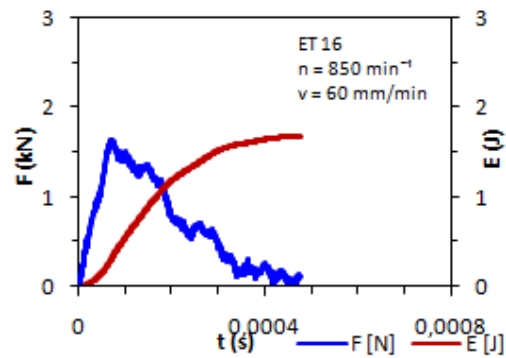
Slika 4.61 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu u centru MŠ za ET 06 (alat B, v =60 mm/min, n= 750 min⁻¹)



Slika 4.62 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu u centru MŠ za ET 11 (alat C, v=80 mm/min, n=750 min⁻¹)

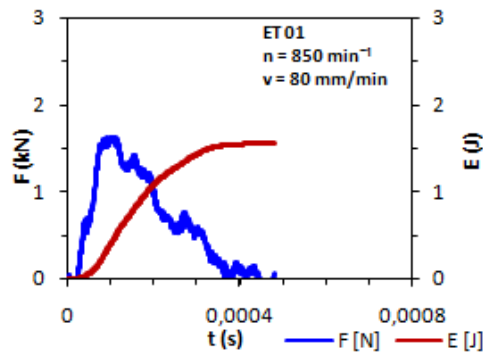
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Eu	1,82 ,J
KV	4,94 ,J/cm ²
Ei	0,44 ,J
Ep	1,38 ,J
Re	44,18 ,Mpa
Rm	45,85 ,Mpa



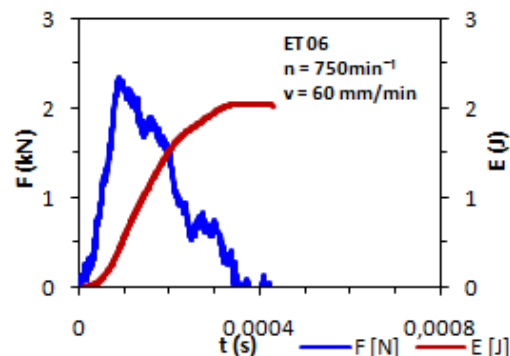
Slika 4.63 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu u centru MŠ za ET 16 (alat D, v=60 mm/min, n=850 min⁻¹)

Eu	1,93 ,J
KV	5,24 ,J/cm ²
Ei	0,58 ,J
Ep	1,35 ,J
Re	36,53 ,Mpa
Rm	46,61 ,Mpa



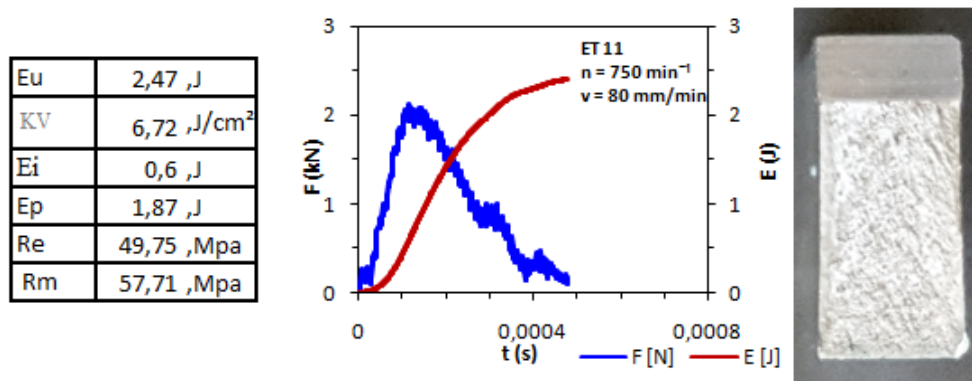
Slika 4.64 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm (IS) od centra MŠ za ET 01(alat A, v=80 mm/min, n= 850 min⁻¹)

Eu	2,04 ,J
KV	5,53 ,J/cm ²
Ei	0,44 ,J
Ep	1,59 ,J
Re	53,8 ,Mpa
Rm	63,89 ,Mpa

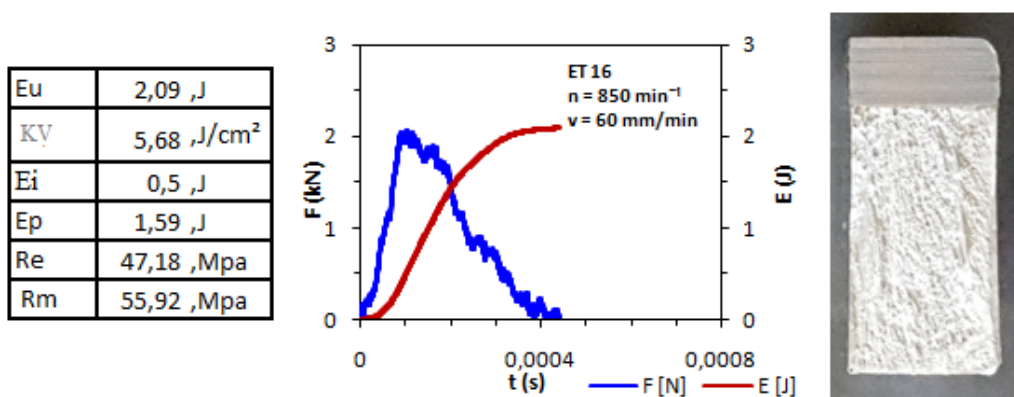


Slika 4.65 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija -vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm (IS) od centra MŠ za ET 06(alat B, v= 60 mm/min, n= 750 min⁻¹)

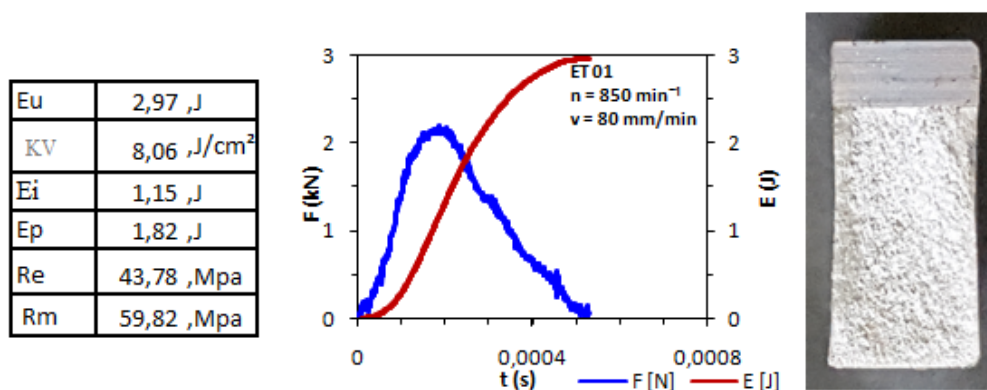
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.66 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm (IS) od centra MŠ za ET 11(alat C, v=80 mm/min, n= 750 min⁻¹)



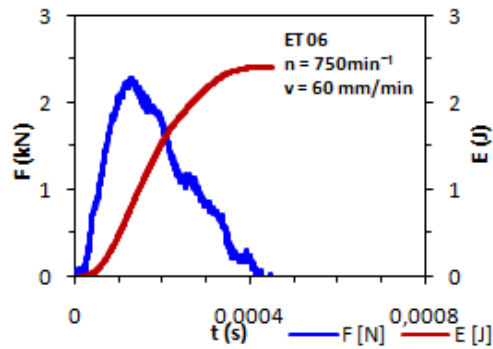
Slika 4.67 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm (IS) od centra MŠ za ET 16 (alat D, v=60 mm/min, n=850 min⁻¹)



Slika 4.68 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm (IS) od centra MŠ za ET 01(alat A, v= 80 mm/min, n= 850 min⁻¹)

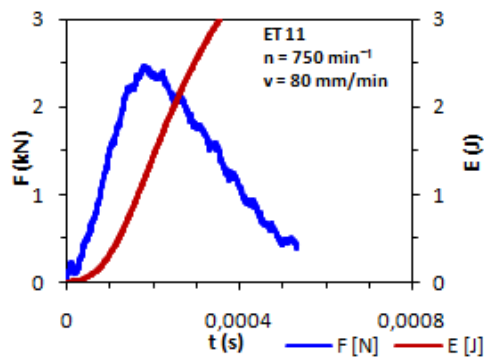
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Eu	2,42 ,J
KV	6,57 ,J/cm ²
Ei	0,83 ,J
Ep	1,59 ,J
Re	49,38 ,Mpa
Rm	61,72 ,Mpa



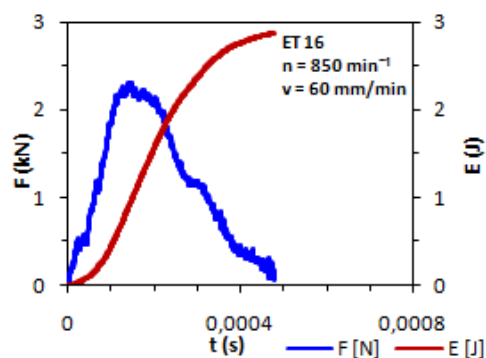
Slika 4.69 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm (IS) od centra MŠ za ET 06(alat B, v=60 mm/min, n=750 min⁻¹)

Eu	3,92 ,J
KV	10,64 ,J/cm ²
Ei	1,14 ,J
Ep	2,77 ,J
Re	58,15 ,Mpa
Rm	66,87 ,Mpa



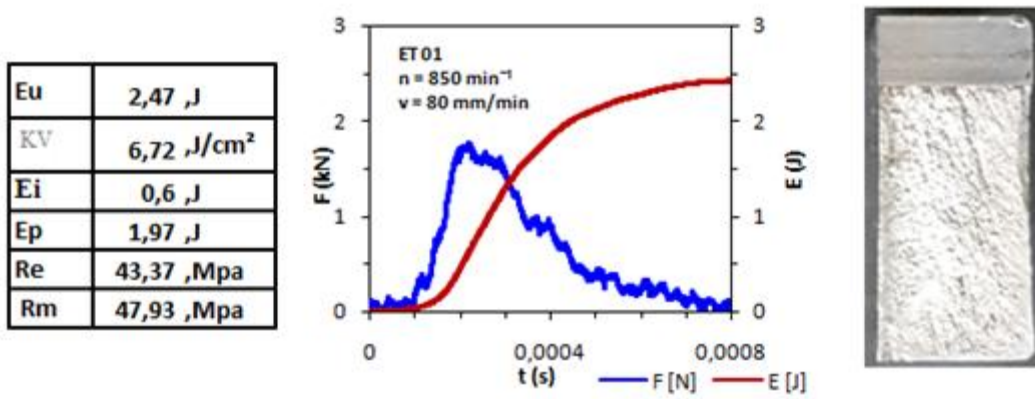
Slika 4.70 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm (IS) od centra MŠ za ET 11(alat C, v=80 mm/min, n= 750 min⁻¹)

Eu	2,91 ,J
KV	7,91 ,J/cm ²
Ei	0,96 ,J
Ep	1,95 ,J
Re	50,22 ,Mpa
Rm	62,24 ,Mpa

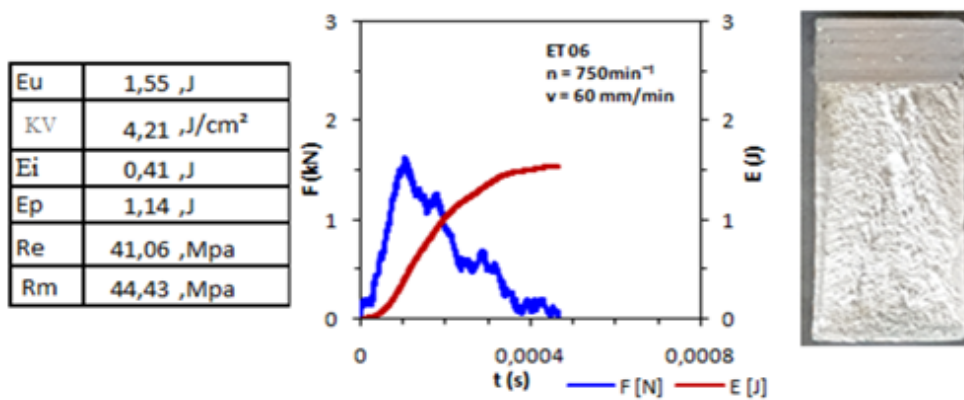


Slika 4.71 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija -vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm (IS) od centra MŠ za ET 16(alat D, v=60 mm/min, n= 850 min⁻¹)

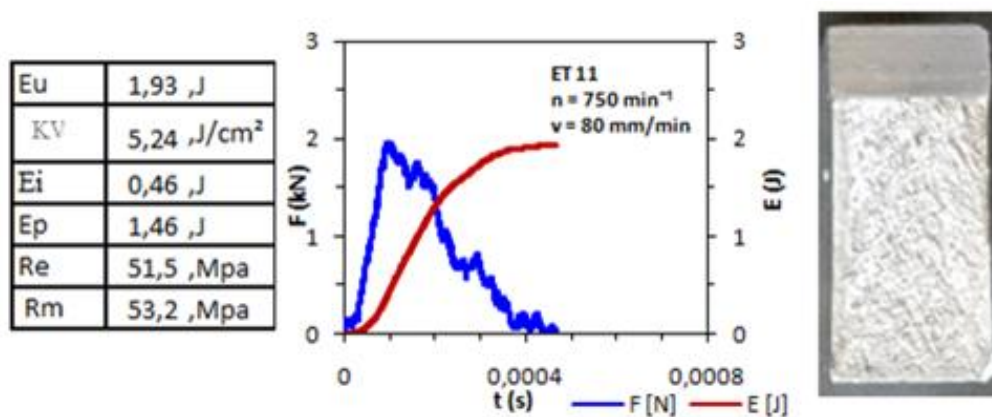
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.72 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm (SS) od centra MŠ za ET 01(alat A, $v = 80 \text{ mm/min}$, $n = 850 \text{ min}^{-1}$)

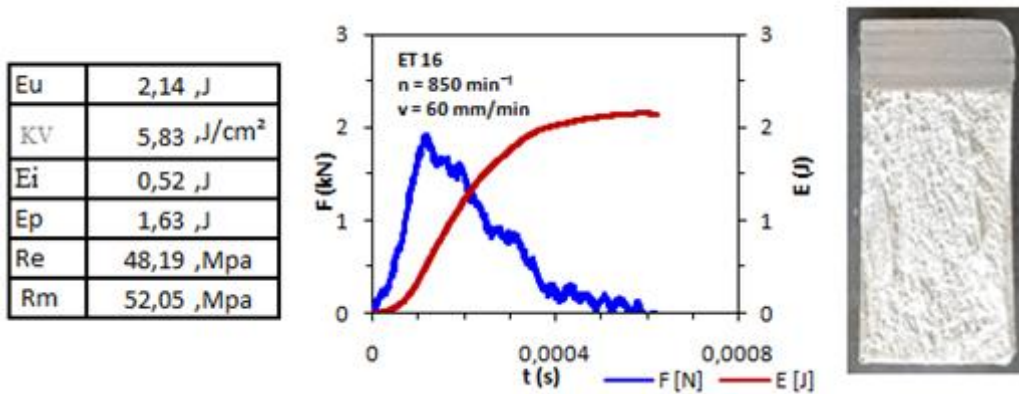


Slika 4.73 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm(SS) od centra MŠ za ET 06(alat B, $v = 60 \text{ mm/min}$, $n = 750 \text{ min}^{-1}$)

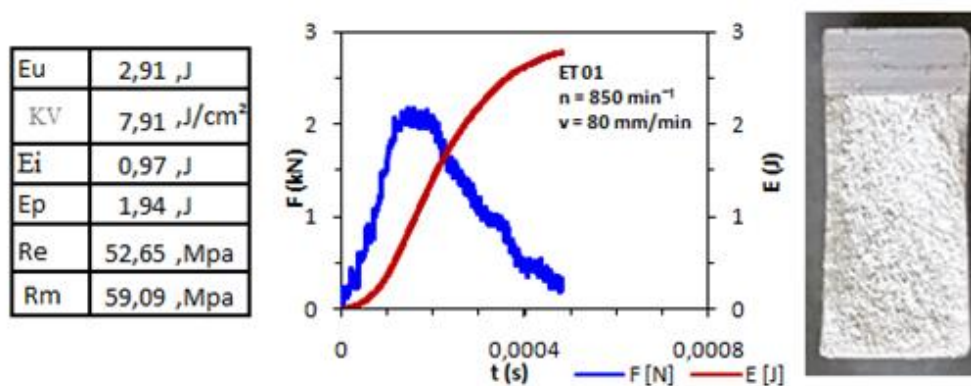


Slika 4.74 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm(SS) od centra MŠ za ET 11(alat C, $v = 80 \text{ mm/min}$, $n = 750 \text{ min}^{-1}$)

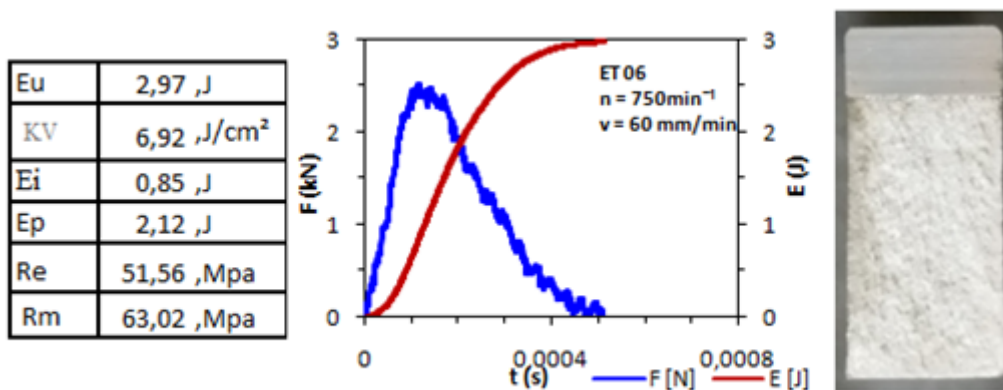
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.75 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 4mm(SS) od centra MŠ za ET 16(alat D, $v=60$ mm/min, $n=850$ min⁻¹)

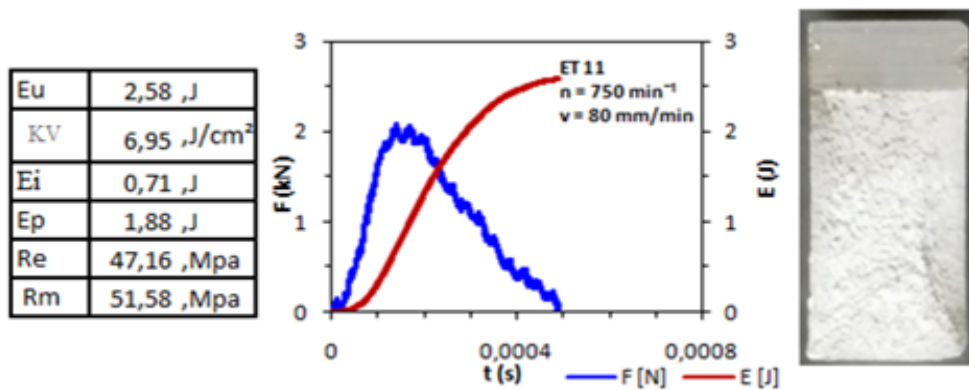


Slika 4.76 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm(SS) od centra MŠ za ET 01(alat A, $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹)

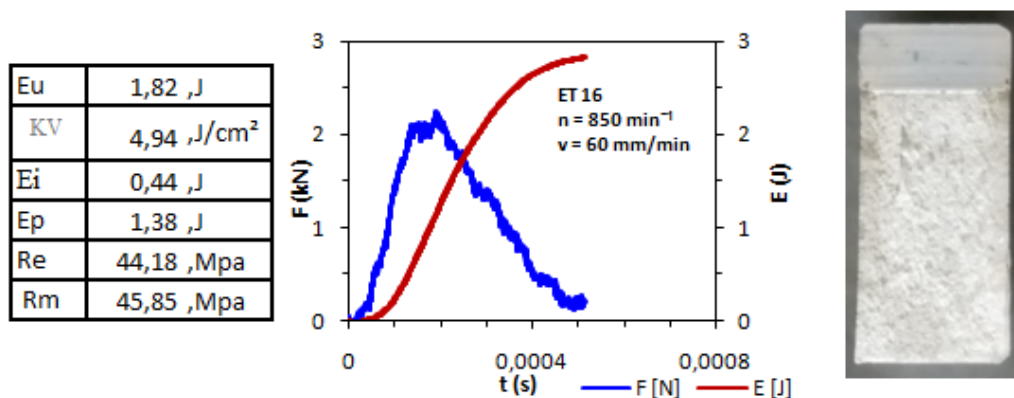


Slika 4.77 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm(SS) od centra MŠ za ET 06(alat B, $v=60$ mm/min, $n=750$ min⁻¹)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.78 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm(SS) od centra MŠ za ET 11(alat C, v= 80 mm/min, n=750 min⁻¹)

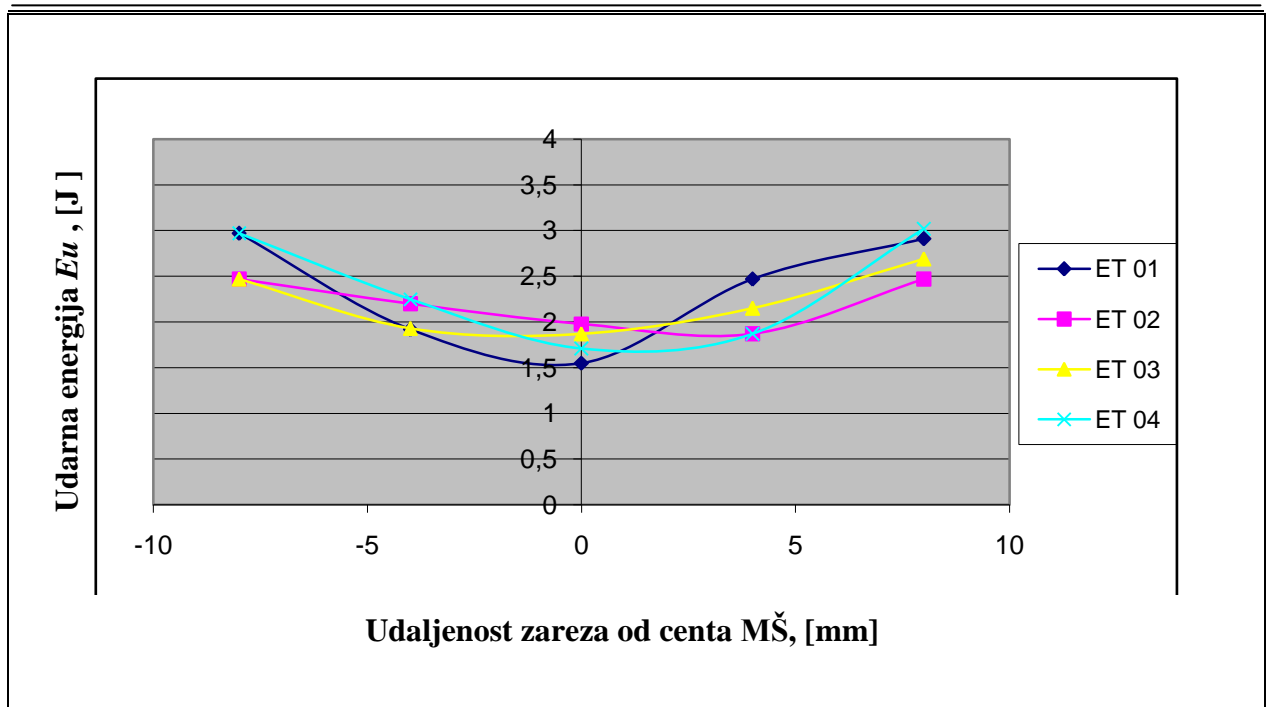


Slika 4.79 Grafički prikaz odnosa sila-vrijeme i energija-vrijeme sa izgledom prelomne površine na zarezu udaljenom 8mm(SS) od centra MŠ za ET 16 (alat D, v= 60 mm/min, n= 850 min⁻¹)

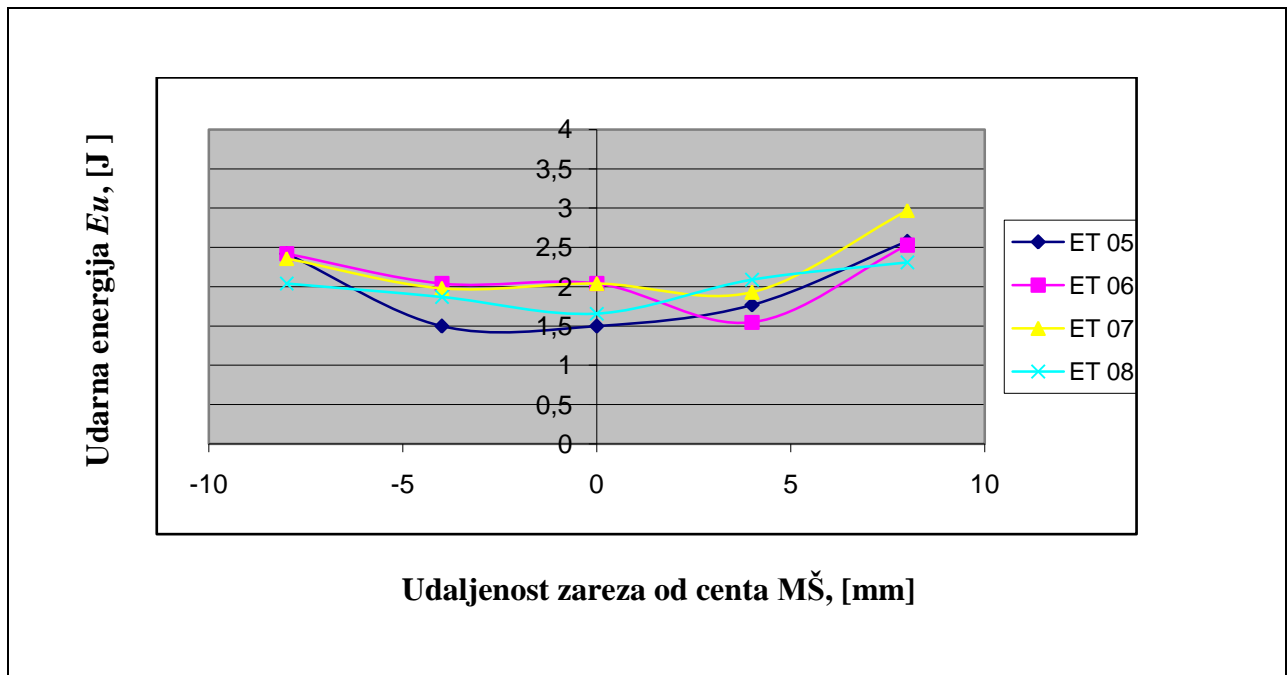
4.5.1 Zbirni grafički prikaz rezultata ispitivanja energije udara

Na grafikonu na slici 4.80 prikazane se krive odnosa ukupne energije udara Eu u zavisnosti od položaja zareza u ZTMU sa eksperimentalne tačke zavarene sa alatom tip A, na grafikonu na slici 4.81 za eksperimentalne tačke zavarene sa alatom tip B, na grafikonu na slici 4.82 za eksperimentalne tačke zavarene sa alatom tip C, a na grafikonu 4.83 za eksperimentalne tačke zavarene sa alatom tip D.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

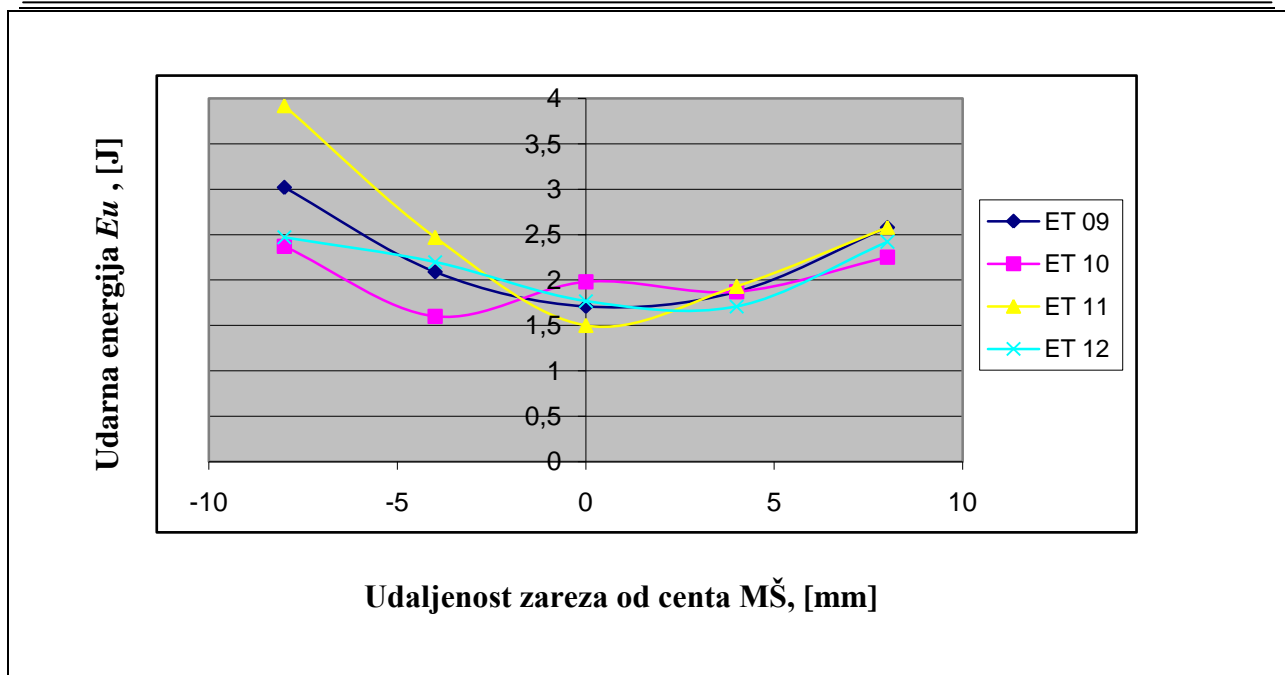


Slika 4.80 Dijagram vrijednosti udarne energije u eksperimentalnim tačkama zavarenim sa alatom tip A

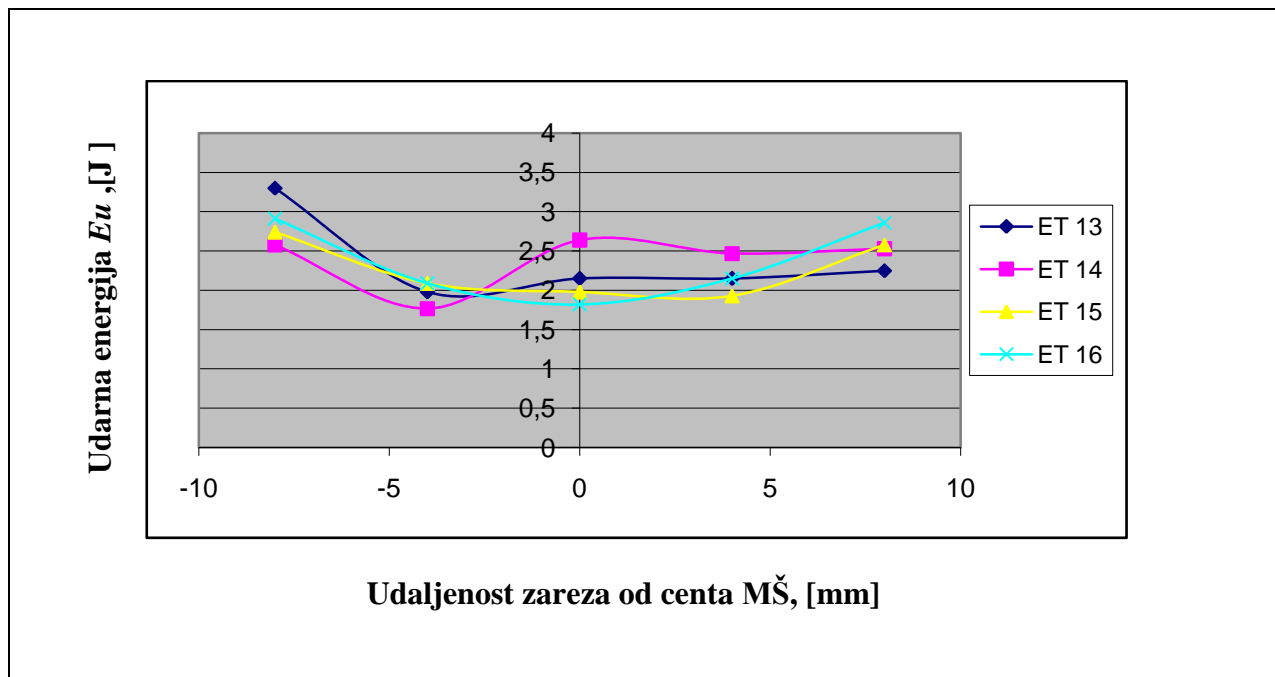


Slika 4.81 Dijagram vrijednosti udarne energije u eksperimentalnim tačkama zavarenim sa alatom tip B

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



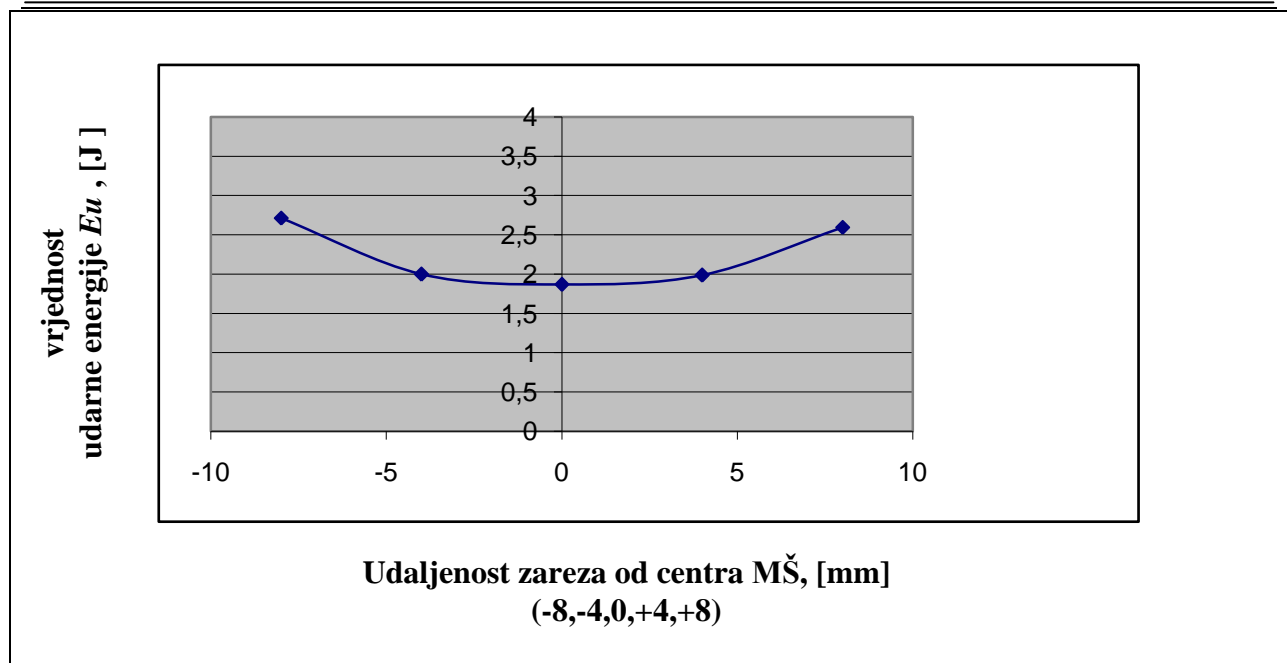
Slika 4.82 Dijagram vrijednosti udarne energije u eksperimentalnim tačkama zavarenim sa alatom tip C



Slika 4.83 Dijagram vrijednosti udarne energije u eksperimentalnim tačkama zavarenim sa alatom tip D

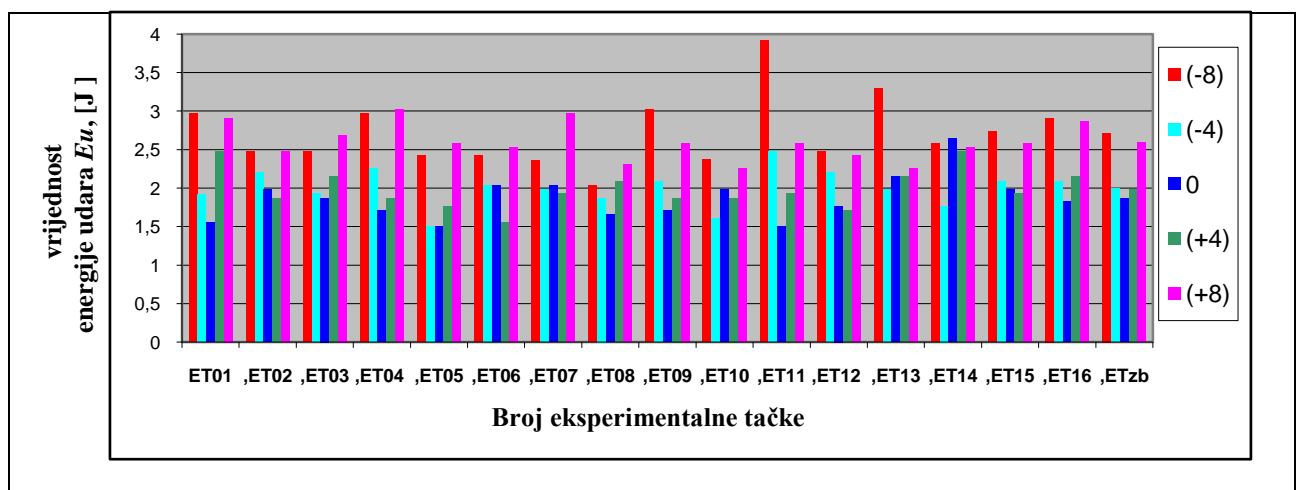
Na slici 4.84 prikazan je dijagram zavisnosti ekupne energije udara Eu od rastojanja zarez od centra MŠ za sve eksperimentalne tačke.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.84 Dijagram vrijednosti udarne energije u svih pet zarez u ZTMU

Grafički prikaz količine udarne energije E_u u 16 eksperimentalnih tačaka u pet zarez prikazan je na slici 4.85.



Slika 4.85 Grafikon nivoa vrijednosti ukupne energije udara E_u u svih 16 eksperimentalnih tačaka i pregled zbirne vrijednosti energije udara E_u u zavisnosti od mjesta zarez

U tabeli 4.5 prikazane su vrijednosti KV - udarne žilavosti, E_u - ukupne energije udara, E_i - energije utošene na iniciranje prsline i E_p - energije potrebne za njeno širenje za četiri eksperimentalne tačke ET 01, ET 06, ET 11 i ET 16.

Tabela 4.5 Prikaz rezultata udarnih ispitivanja na pet mjesta u četiri eksperimentalne tačke

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Broj eksp. tačke sa mjestom loma		Udarne žilavost KV, [J/cm ²]	Ukupna energija udara E _u , [J]	Energija inicijacije prsline E _i , [J]	Energija širenje prsline E _p , [J]
ET 01	ZG	4,21	1,55	0,51	1,04
	SN-IS4	5,24	1,93	0,58	1,35
	SN-IS8	8,06	2,97	1,15	1,82
	PS-SS4	6,72	2,47	0,6	1,97
	PS-SS8	5,91	2,91	0,97	1,94
ET 06	ZG	5,38	1,98	0,54	1,45
	SN-IS4	5,53	2,04	0,44	1,59
	SN-IS8	6,57	2,42	0,83	1,59
	PS-SS4	4,21	1,55	0,41	1,14
	PS-SS8	6,92	2,97	0,85	2,12
ET 11	ZG	5,24	1,93	0,46	1,46
	SN-IS4	6,72	2,47	0,60	1,87
	SN-IS8	10,64	3,92	1,14	2,77
	PS-SS4	5,26	1,93	0,46	1,46
	PS-SS8	6,95	2,58	0,71	1,88
ET 16	ZG	4,94	1,82	0,44	1,38
	SN-IS4	5,87	2,09	0,50	1,59
	SN-IS8	7,91	2,91	0,96	1,95
	PS-SS4	5,83	2,14	0,52	1,63
	PS-SS8	4,94	1,82	0,44	1,38

Legenda: ZG - zona „grumena“, SN-IS4 - strana napredovanja na 4mm udaljena od centra MŠ, SN-IS8 - strana napredovanja na 8 mm udaljena od centra MŠ, SN-SS4 - povratna strana na 4mm udaljena od centra MŠ, PS-SS8 - povratna strana na 8mm udaljena od centra MŠ

Očekivano velika disperzija rezultata udarne žilavosti i energije udara posledica je različite kombinacije geometrijskih parametara diktiranih izborom alata i kinematskih parametara određenih izborom mašine za zavarivanje. Kod OM udarna žilavost od $KV = 3,9 \text{ J/cm}^2$ znatno je manja od udarne žilavosti ET 11 kod koje je $KV = 10,64 \text{ J/cm}^2$. Energija inicijacije prsline E_i je u OM oko tri puta manja od energije utrošene za njenu propagaciju E_p . Ovaj podatak je značajan kod upoređivanja odnosa energija kod MŠ u različitim eksperimentalnim tačkama, iako je slično stanje sa odnosima energije u zoni „grumena“ MŠ, dok ima eksperimentalnih tačaka kod kojih je E_p i više od četiri puta veća od E_i prvenstveno na povratnoj strani MŠ od E_i u OM.

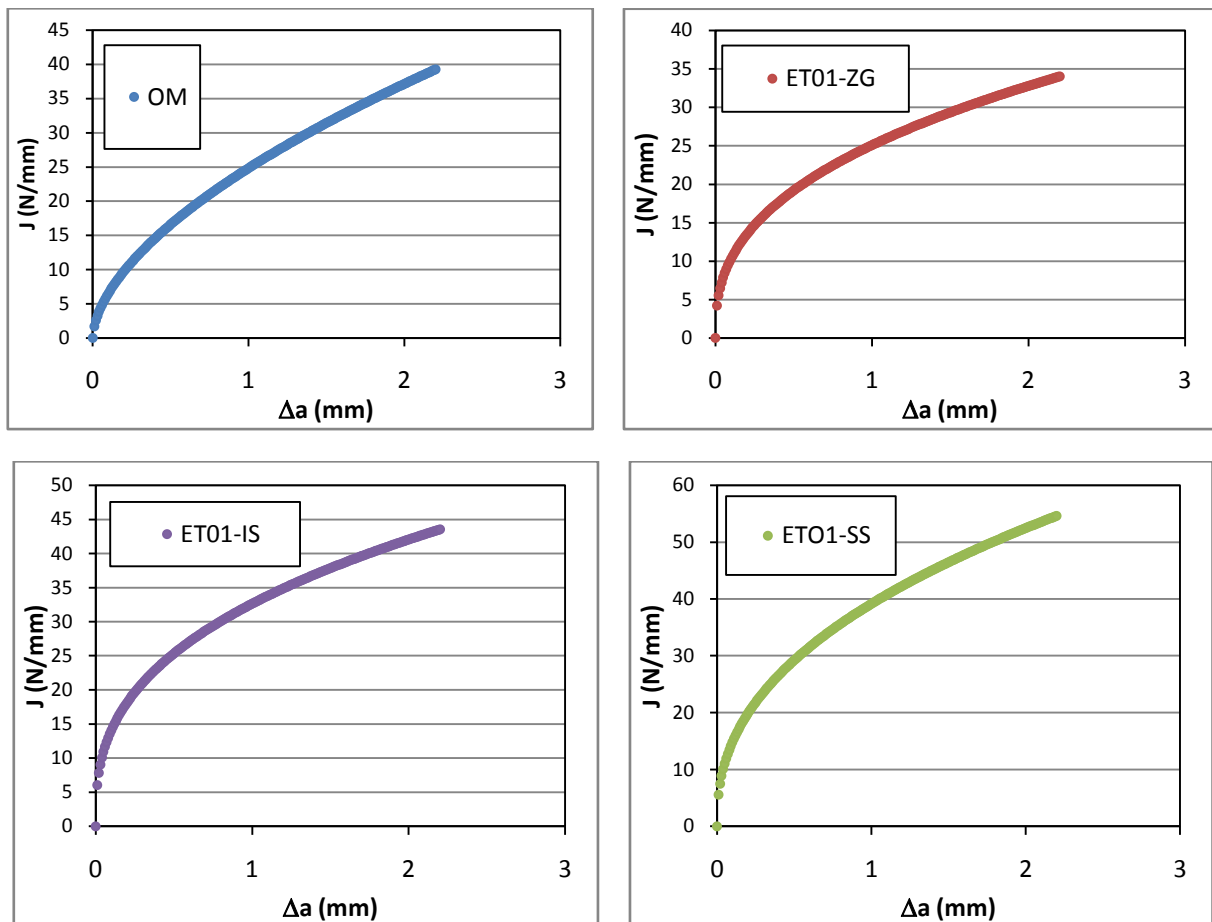
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

4.6 Rezultati ispitivanja parametara mehanike loma

Kod određivanja vrijednosti parametara elasto-plastične mehanike loma OM i MŠ cio postupak računskog vrednovanja eksperimentalnog istraživanja testnih proba višeparametarskim konceptom svodi na podatke iz *Excelovog* programa. To se prevashodno odnosi na izradu krivih otpornosti i utvrđivanje vrijednosti žilavosti loma K_{JIC} . Za svaku od reprezentivnih eksperimentalnih tačaka ET 01, ET 05, ET 09 i ET 13 prikazani su rezultati dobijeni grafičkom interpretacijom krivih otpornosti, otvaranja vrha prsline i žilavosti loma, kao i njihovi međusobni položaji u cilju komparativne analize dobijenih rezultata.

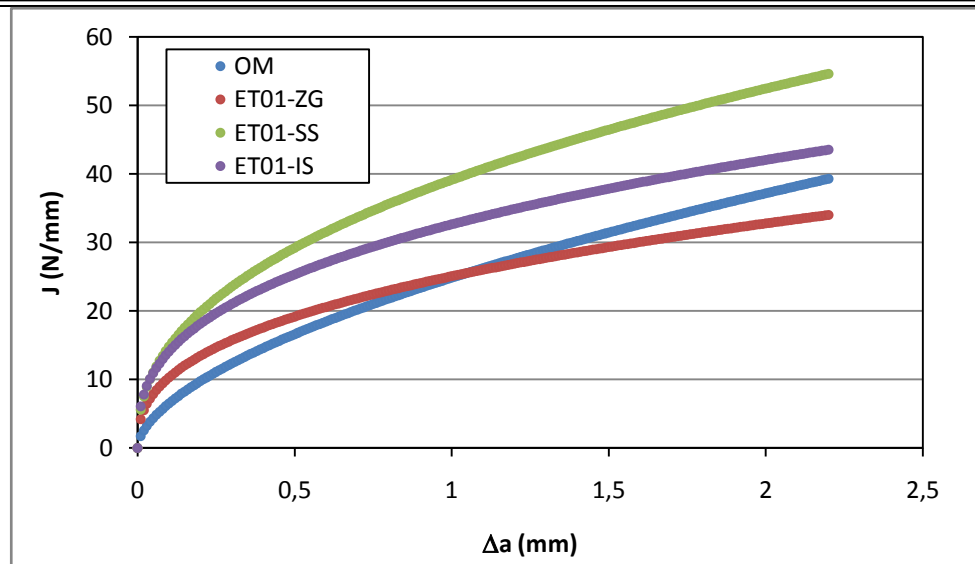
4.6.1 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 01

Na slikama od 4.86 do 4.92 dati su rezultati ispitivanja za ET 01 zavarenu sa alatom tip A.

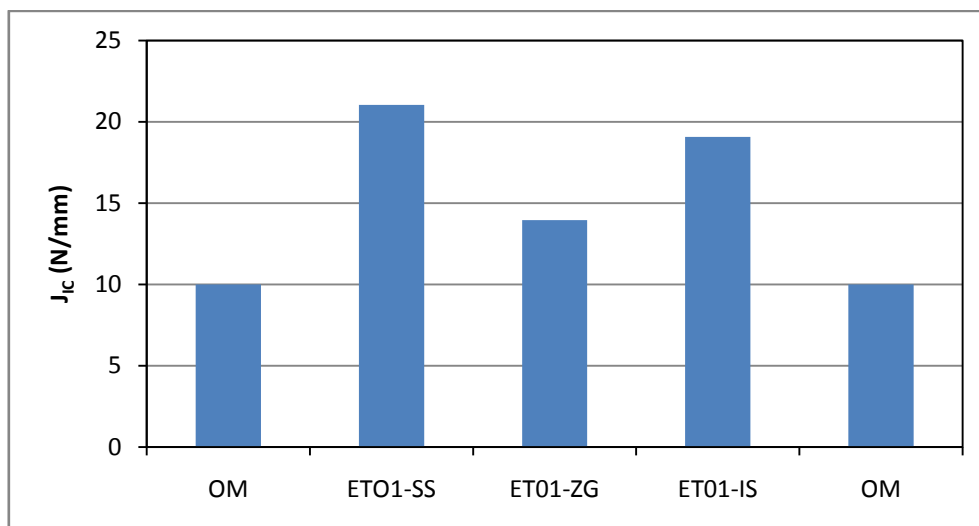


Slika 4.86 Krive otpornosti J - Δa za ET 01 zavarenu sa alatom tip A i kinematskim parametrima $v=80\text{mm/min}$, $n=850\text{ min}^{-1}$ (OM-osnovni materijal, ZG-centar MŠ, IS –istosmjena strana, SS-suprotnosmjena strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

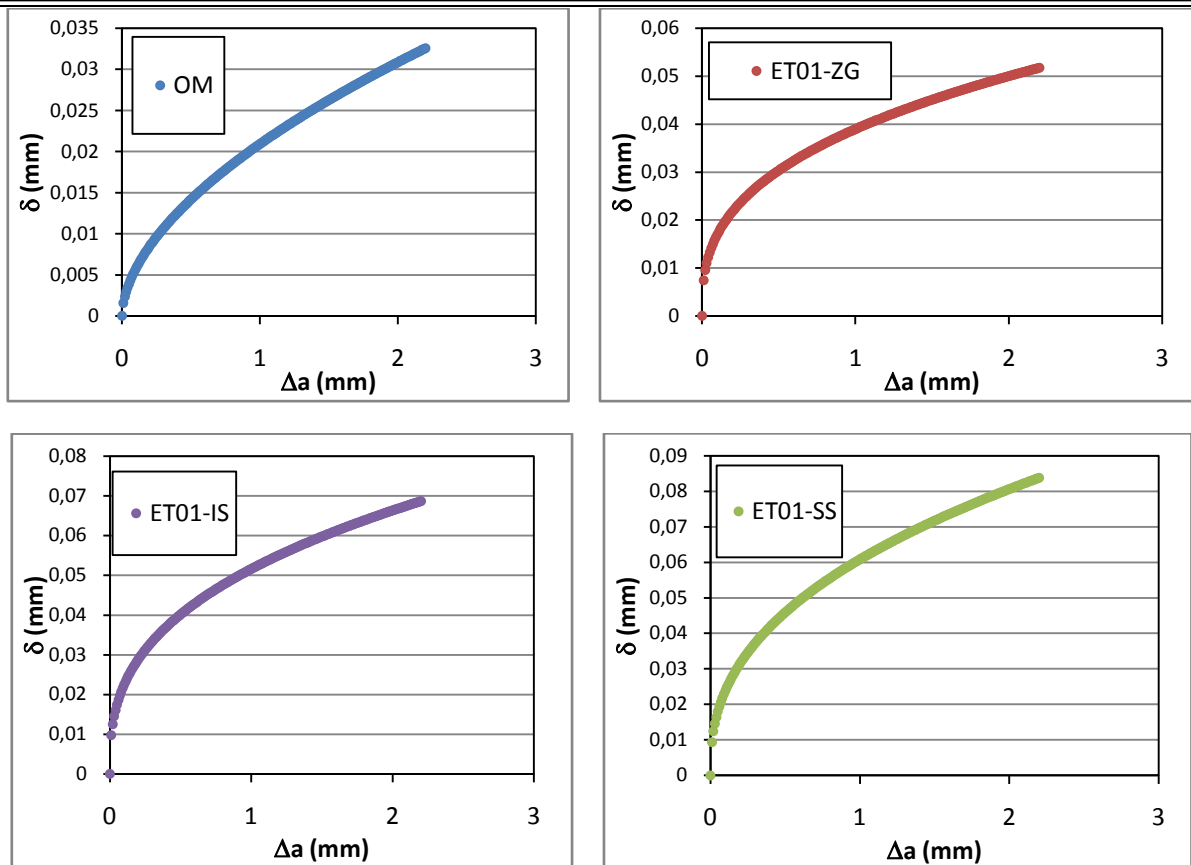


Slika 4.87 Pregled položaja krivih otpornosti J - Δa za OM i zavareni spoj za ET 01 zavarenu sa alatom tip A i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM – osnovni materijal, ZG-centar MŠ, IS-istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

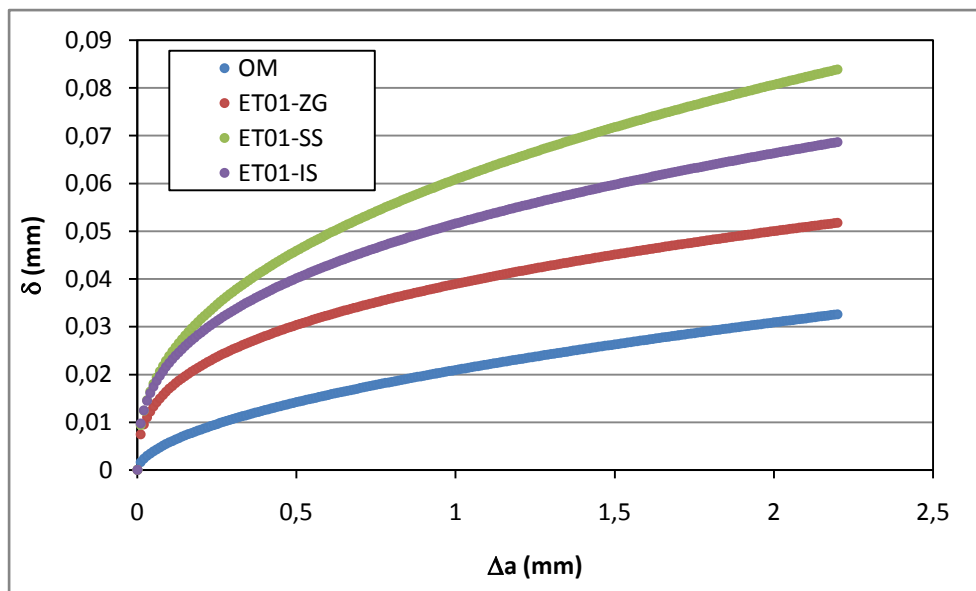


Slika 4.88 Vrijednost J -integrala OM i ZTMU spoja za ET 01 zavarenu sa alatom tip A i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

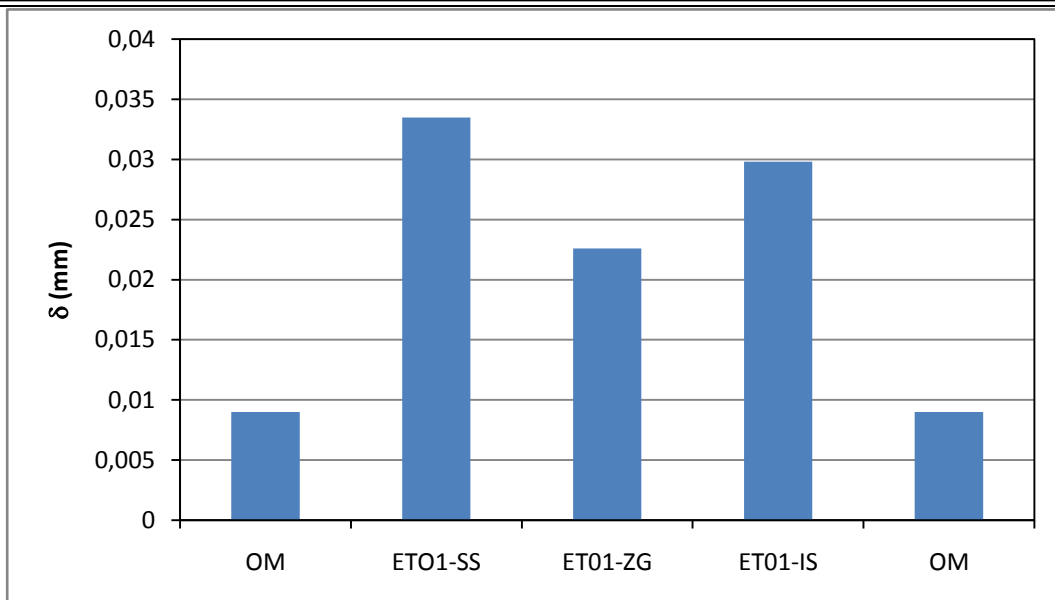


Slika 4.89 Krive otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 01 zavarenu sa alatom tip A i kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar metala zavara, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana MŠ)

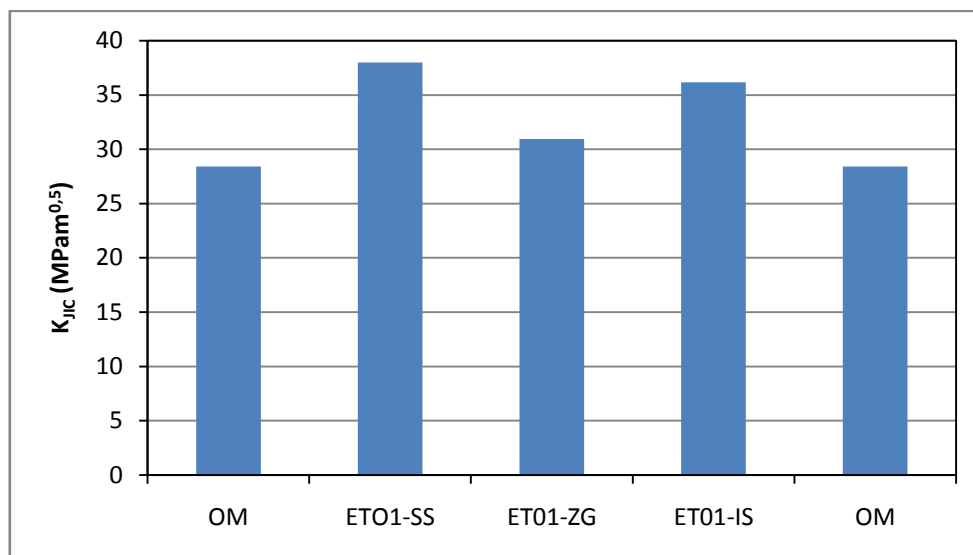


Slika 4.90 Pregled krivih otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 01 zavarenu sa alatom tip A i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.91 Vrijednost otvaranja vrha prsline δ za OM i ZTMU spoja u ET 01 zavarenu sa alatom tip A i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

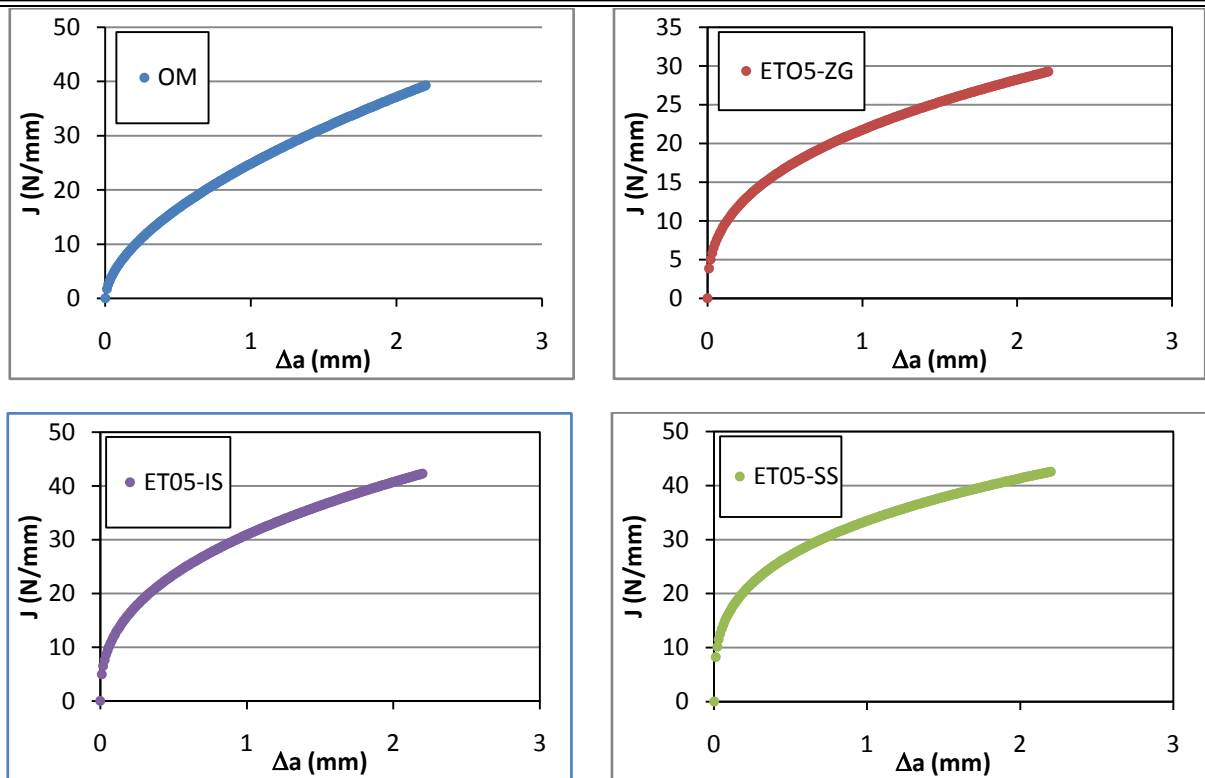


Slika 4.92 Žilavost loma OM i ZTMU u ET 01 zavarenu sa alatom tip A i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

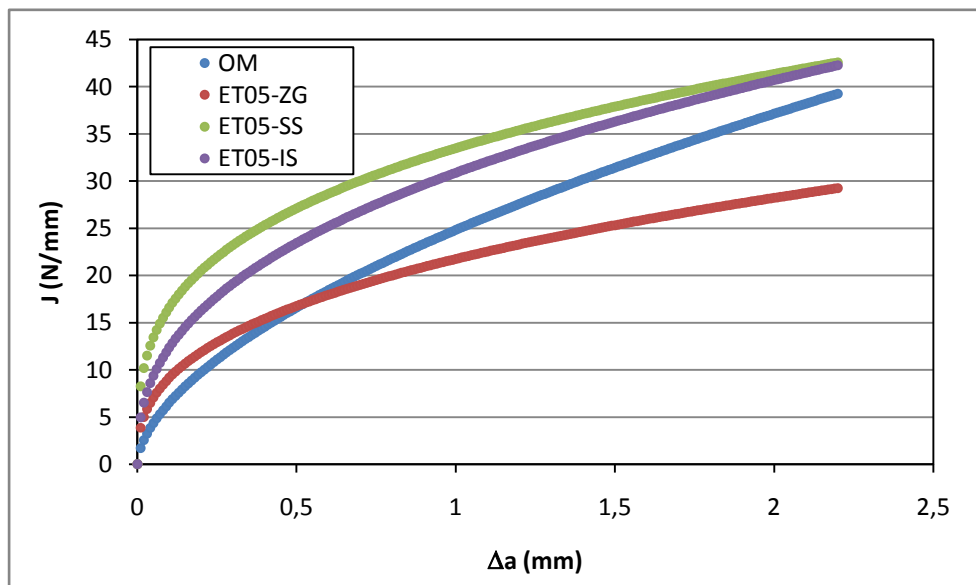
4.6.2 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 05

Na slikama od 4.93 do 4.99 dati su rezultati ispitivanja za ET 05 zavarenu sa alatom tip B.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

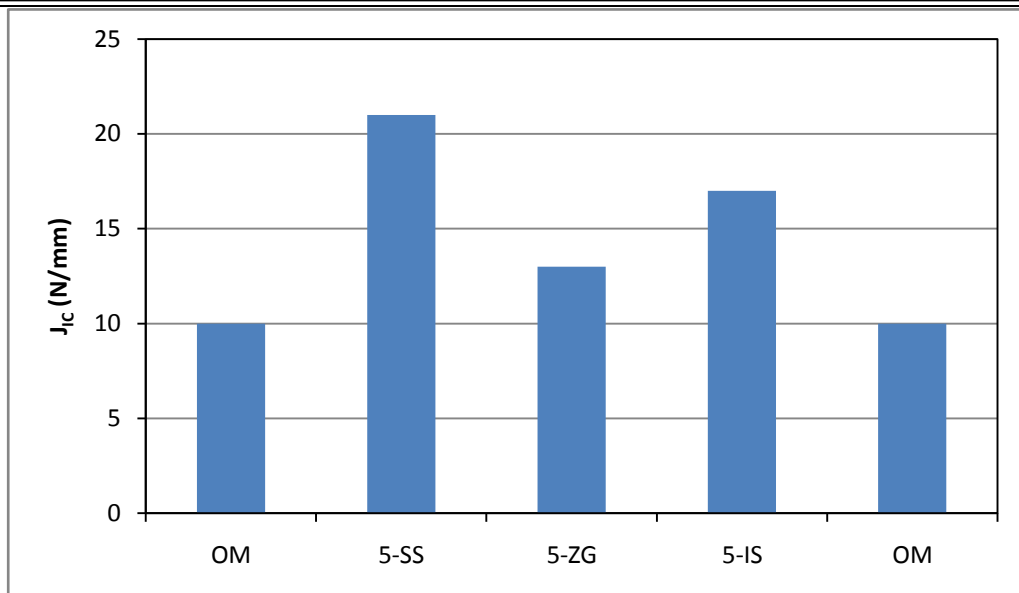


Slika 4.93 Krive otpornosti J - Δa za ET 05 zavarenu sa alatom tip B i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana MŠ)

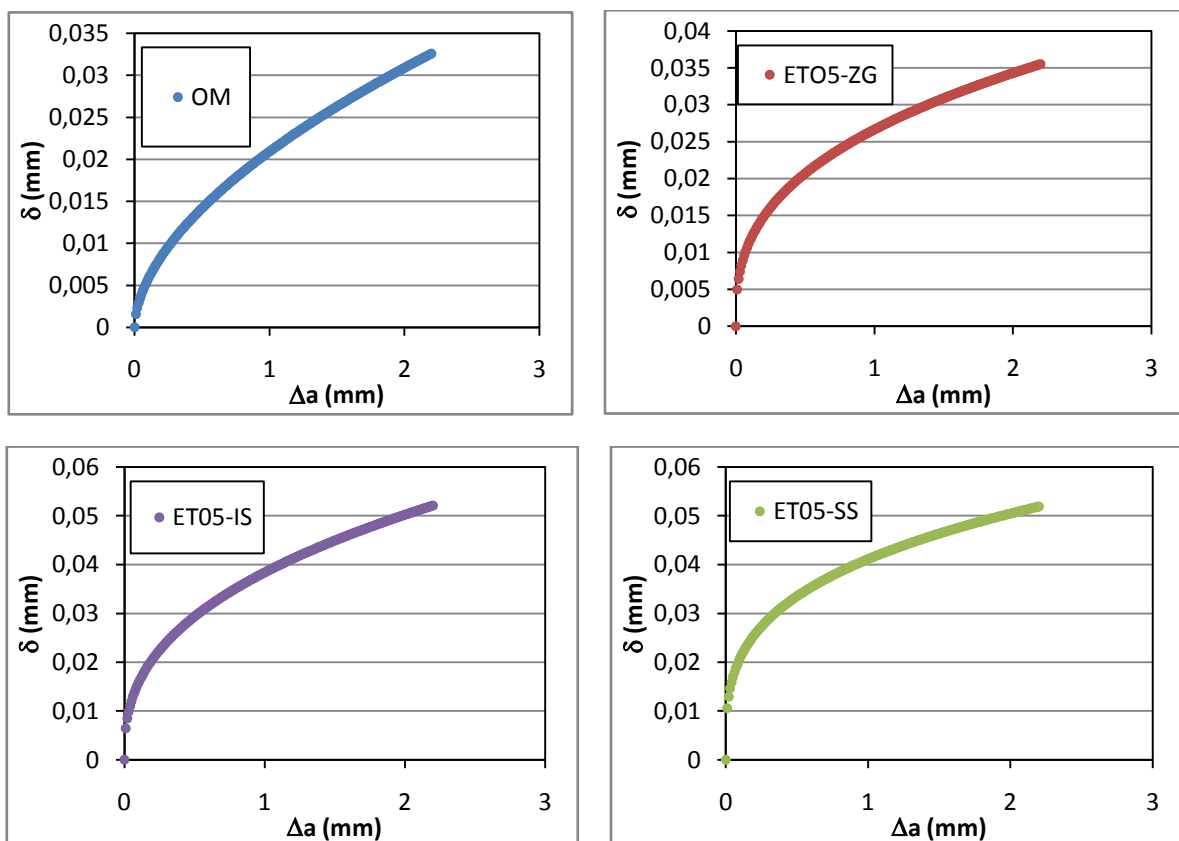


Slika 4.94 Pregled položaja krivih otpornosti J - Δa za OM i spoj za ET 05 zavarenu sa alatom tip B i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

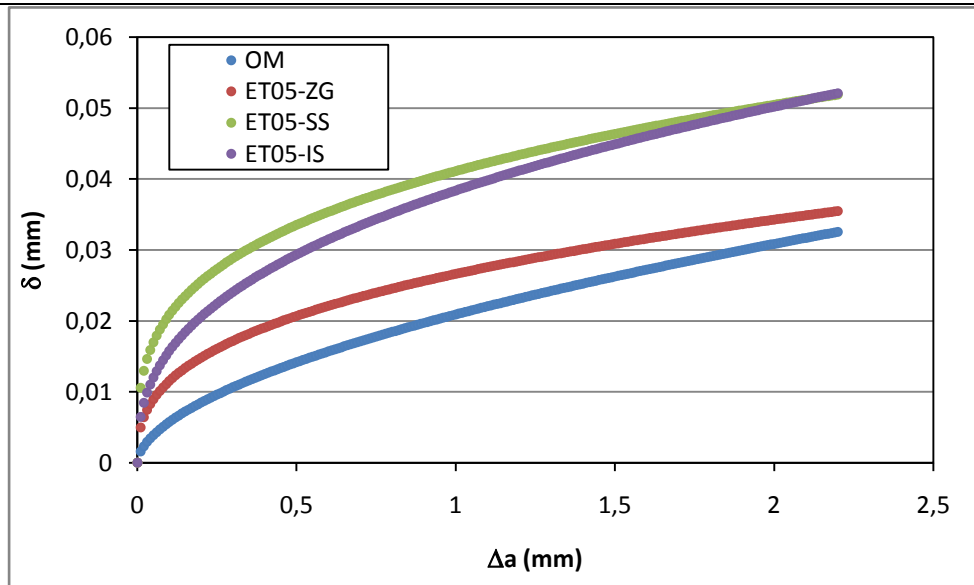


Slika 4.95 Vrijednost J -integrala OM i ZTMU spoja za ET 05 zavarenu sa alatom tip B i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min i $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG – centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

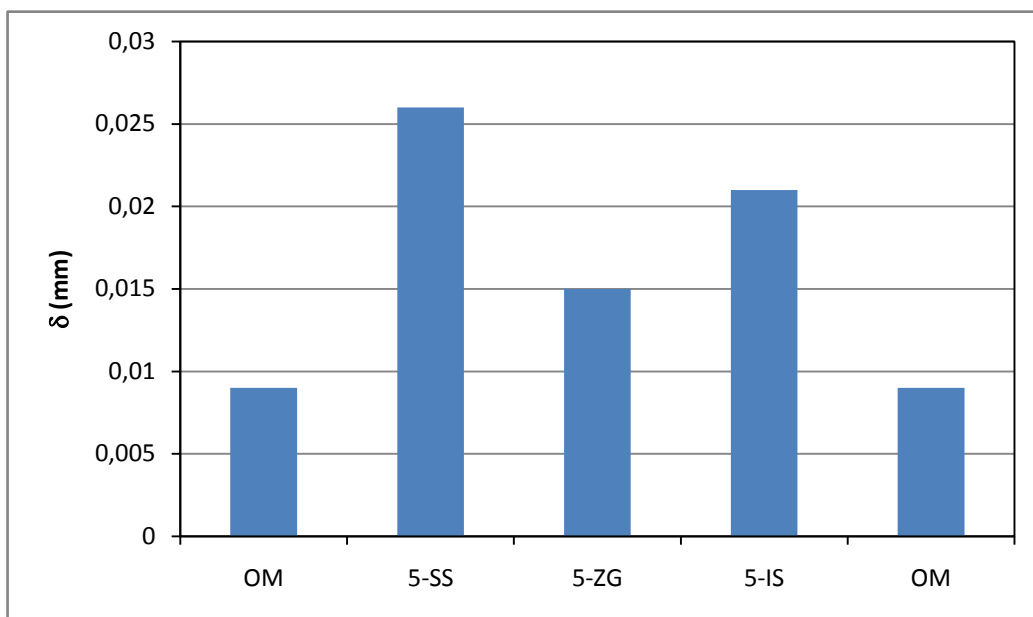


Slika 4.96 Krive otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 05 zavarenu sa alatom tip B i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

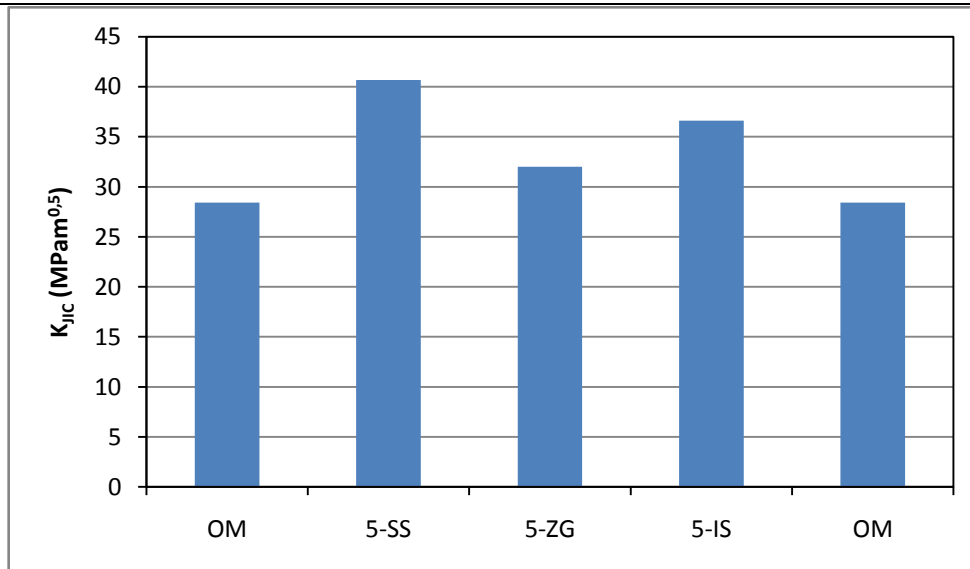


Slika 4.97 Pregled krivih otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 05 zavarenu sa alatom tip B i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG – centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)



Slika 4.98 Vrijednost otvaranja vrha prsline δ za OM i ZTMU spoja u ET 05 zavarenu sa alatom tip B i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG – centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

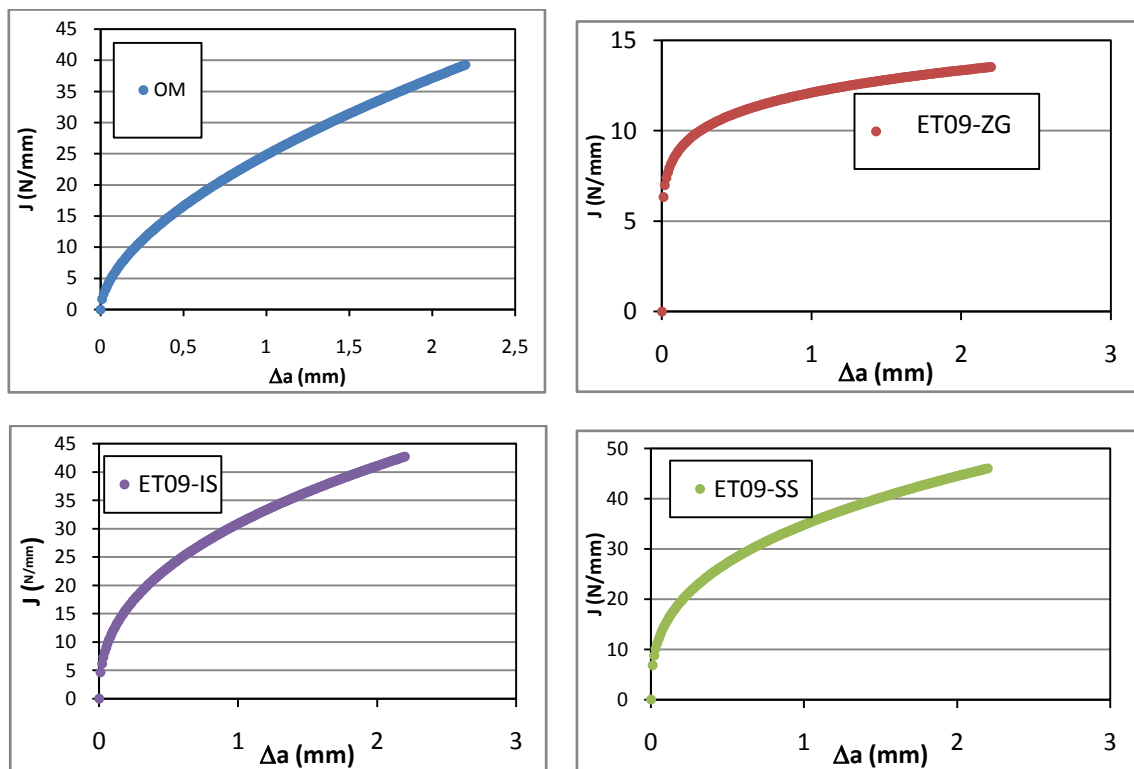
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.99 Žilavost loma OM i ZTMU spoja u ET O5 zavarenu sa alatom tip B i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

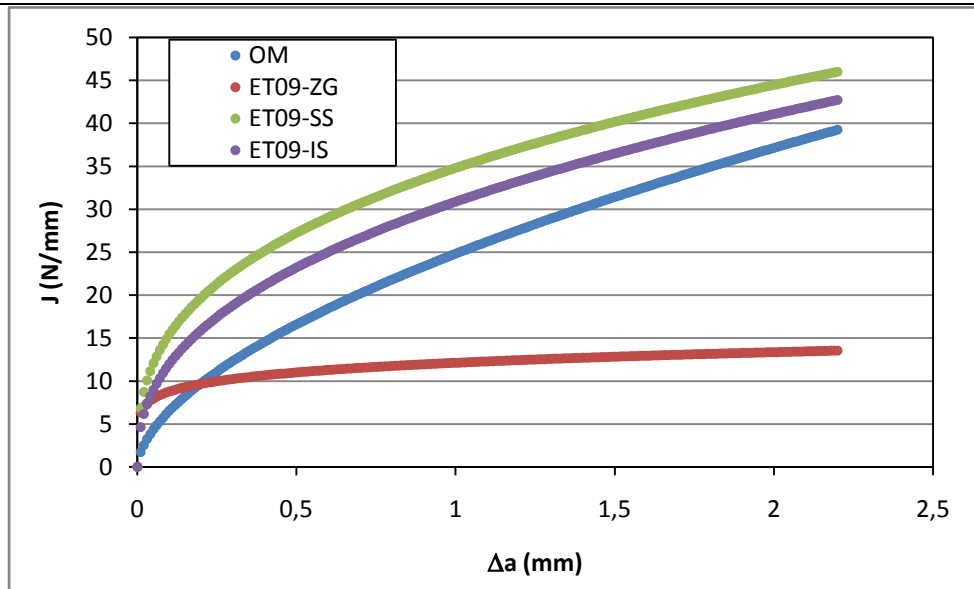
4.6.3 Rezultati ispitivanja SENB epruveta iz ET 09

Na slikama od 4.100 do 4.106 dati su rezultati ispitivanja za ET 09 zavarenu sa alatom tip C.

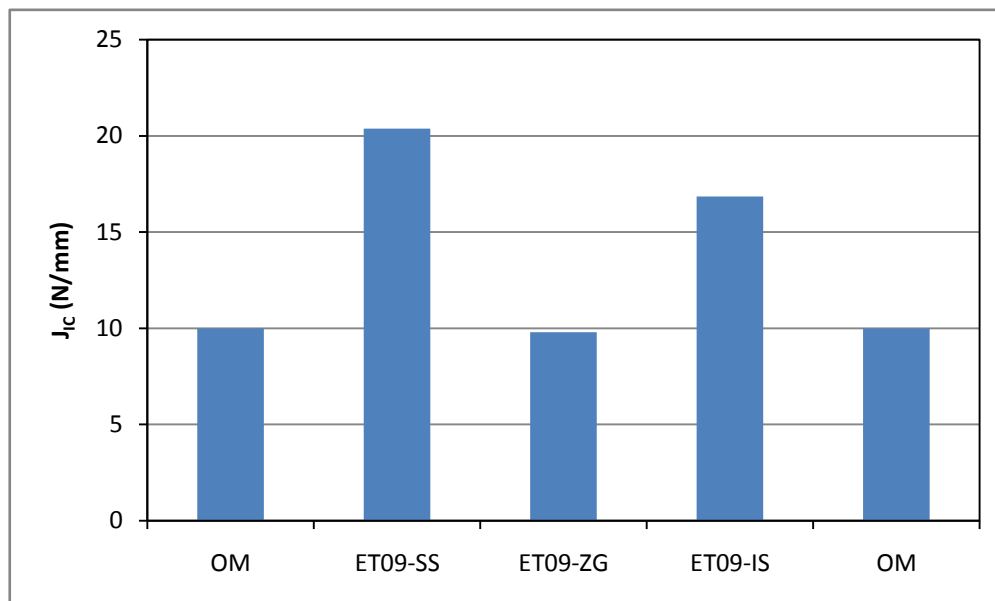


Slika 4.100 Krive otpornosti J - Δa za ET 09 zavarenu sa alatom tip C i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

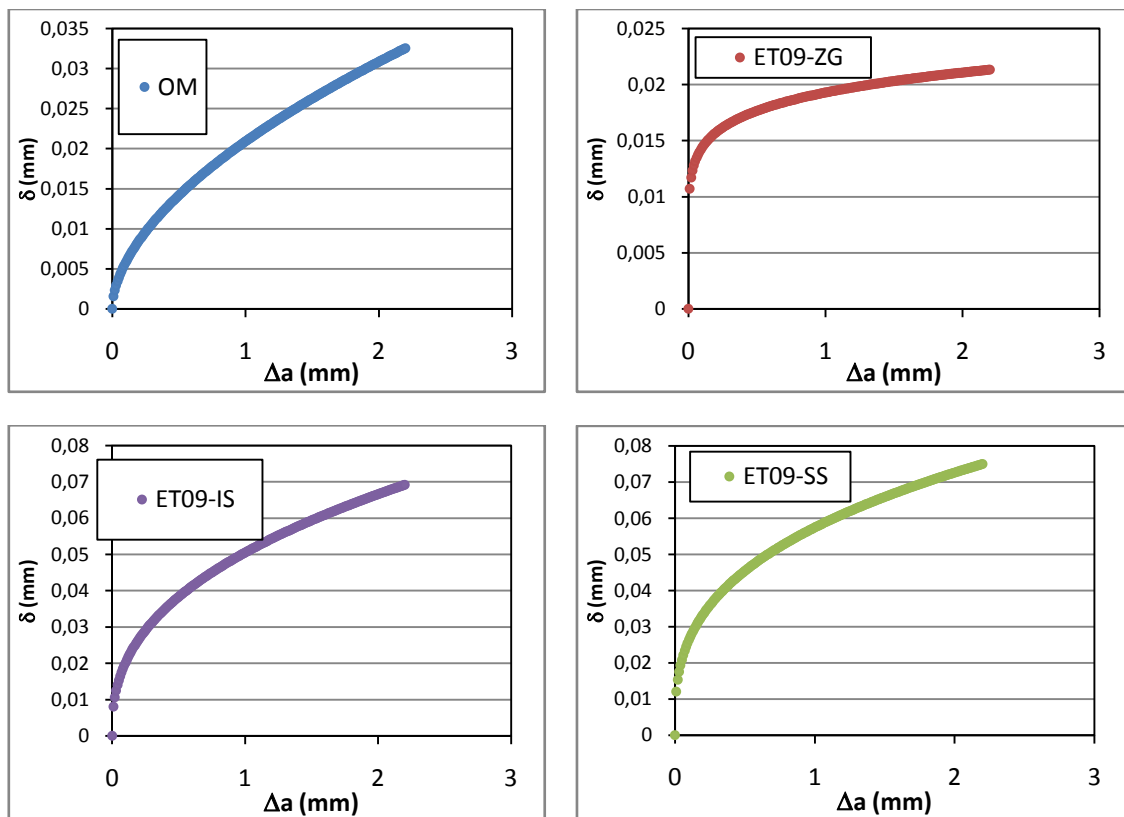


Slika 4.101 Pregled položaja krivih otpornosti J - Δa za OM i spoj za ET 09 zavarenu sa alatom tip C i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

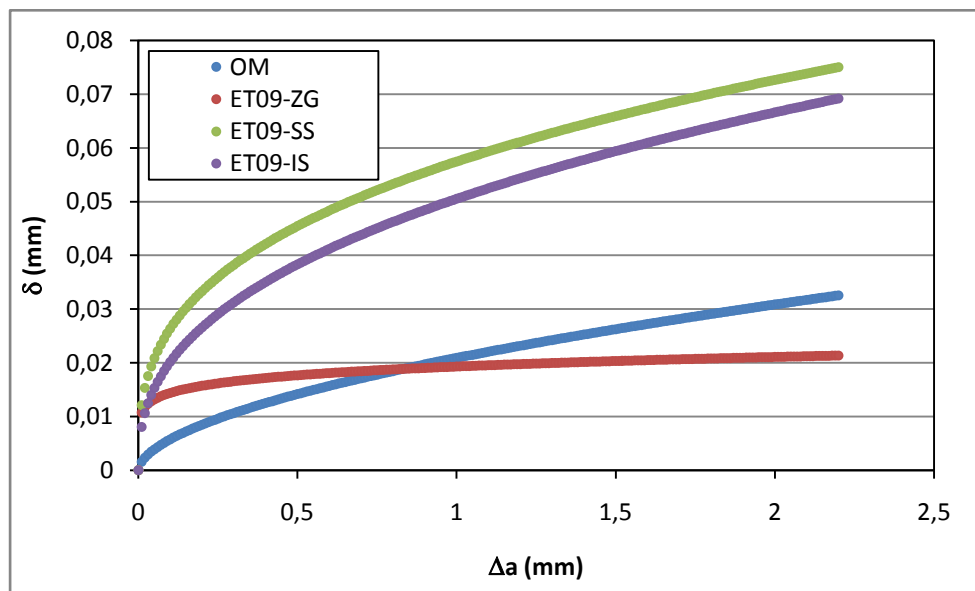


Slika 4.102 Vrijednost J -integrala OM i ZTMU spoja za ET 09 zavarenu sa alatom tip C i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min i $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

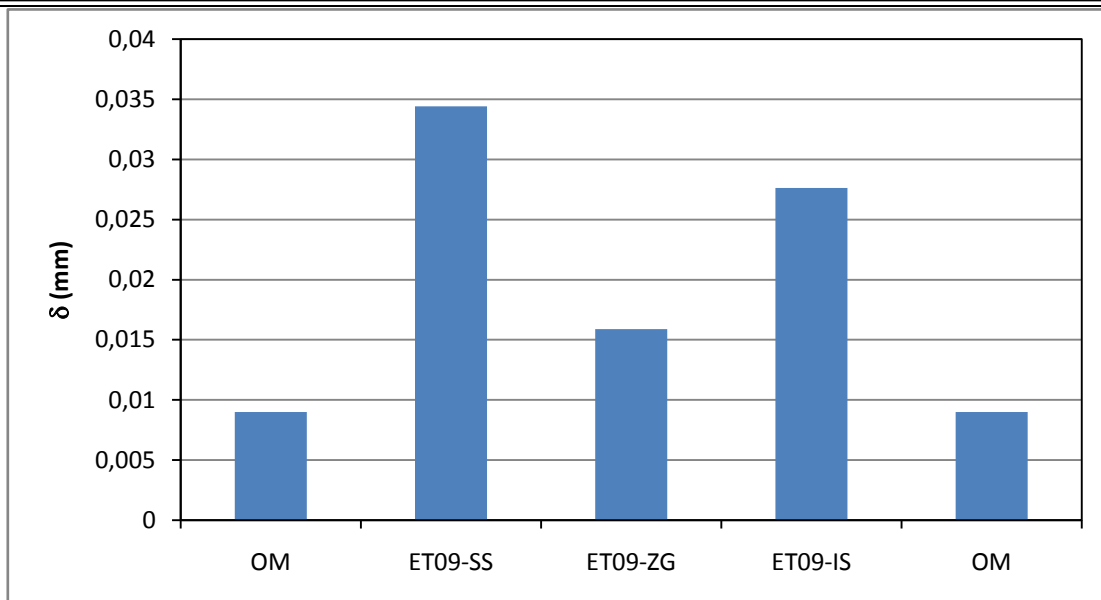


Slika 4.103 Krive otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 09 zavarenu sa alatom tip C i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

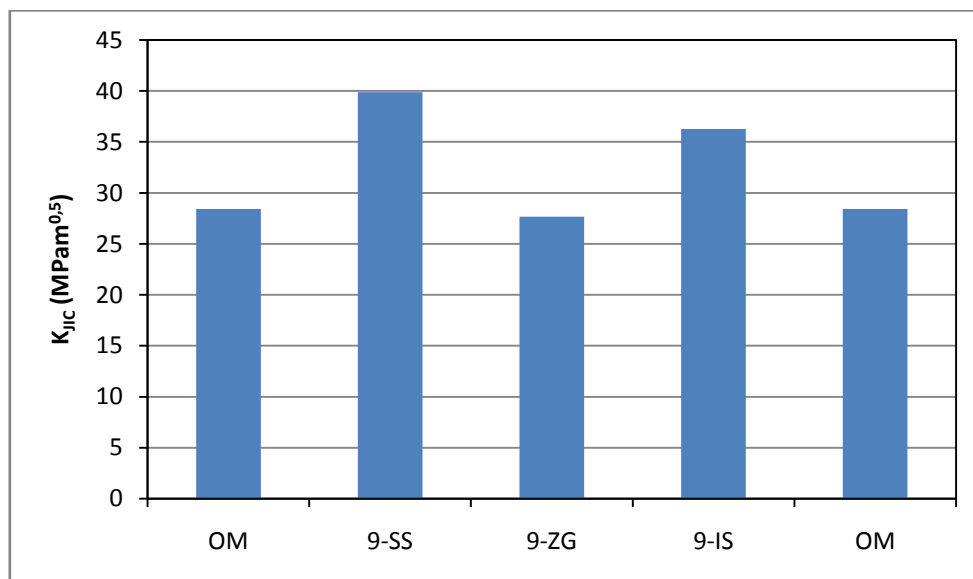


Slika 4.104 Pregled krivih otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 09 zavarenu sa alatom tip C i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.105 Vrijednost otvaranja vrha prsline δ za OM i ZTMU spoja u ET 09 zavarenu sa alatom tip C i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

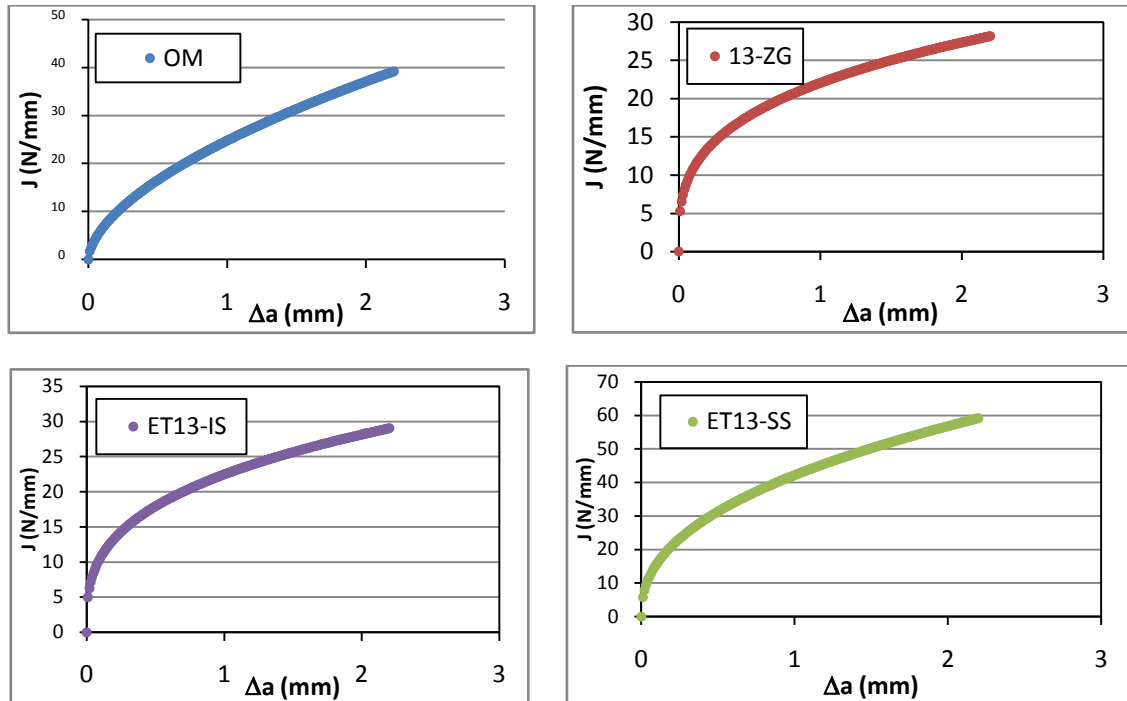


Slika 4.106 Žilavost loma OM i ZTMU spoja u ET 09 zavarenu sa alatom tip C i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

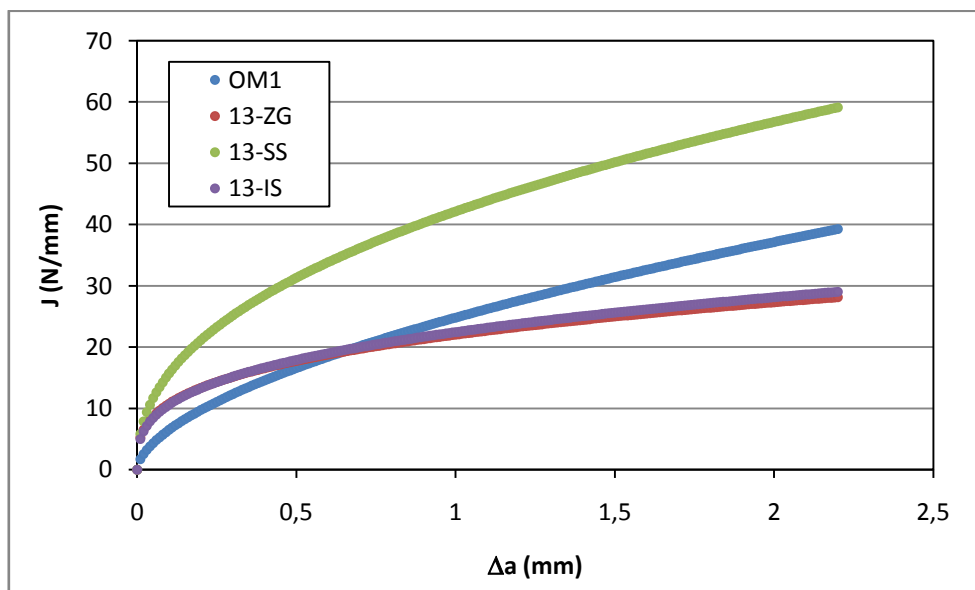
4.6.4 Rezultati ispitivanja SENB epruveta za ET 13

Na slikama 4.107 do 4.113 dati su rezultati ispitivanja za ET 13 zavarenu sa alatom tip D.

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

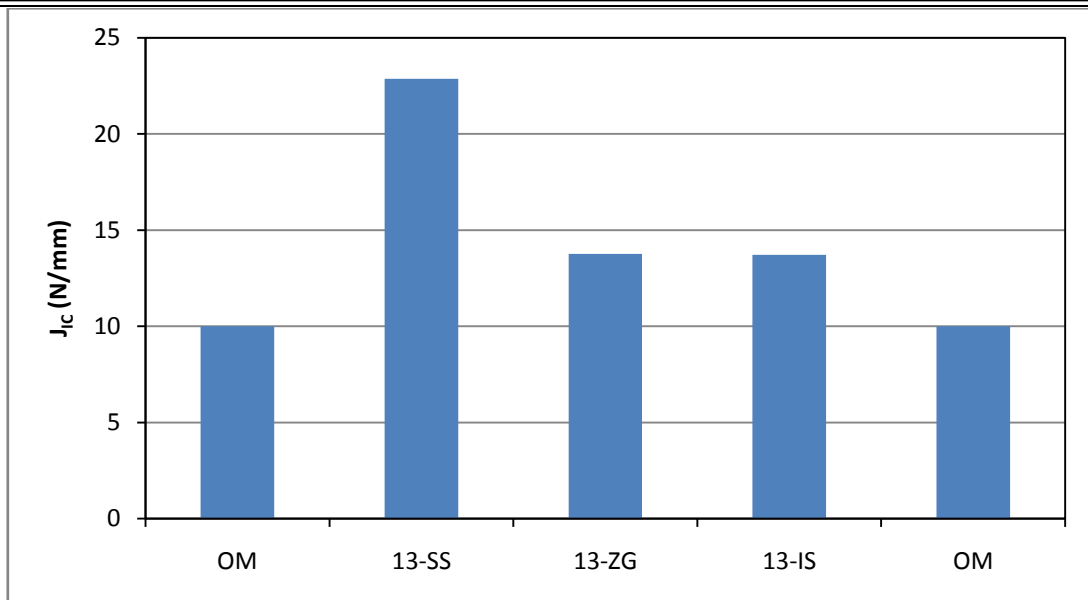


Slika 4.107 Krive otpornosti $J-\Delta a$ za ET 13 zavarenu sa alatom tip D i kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

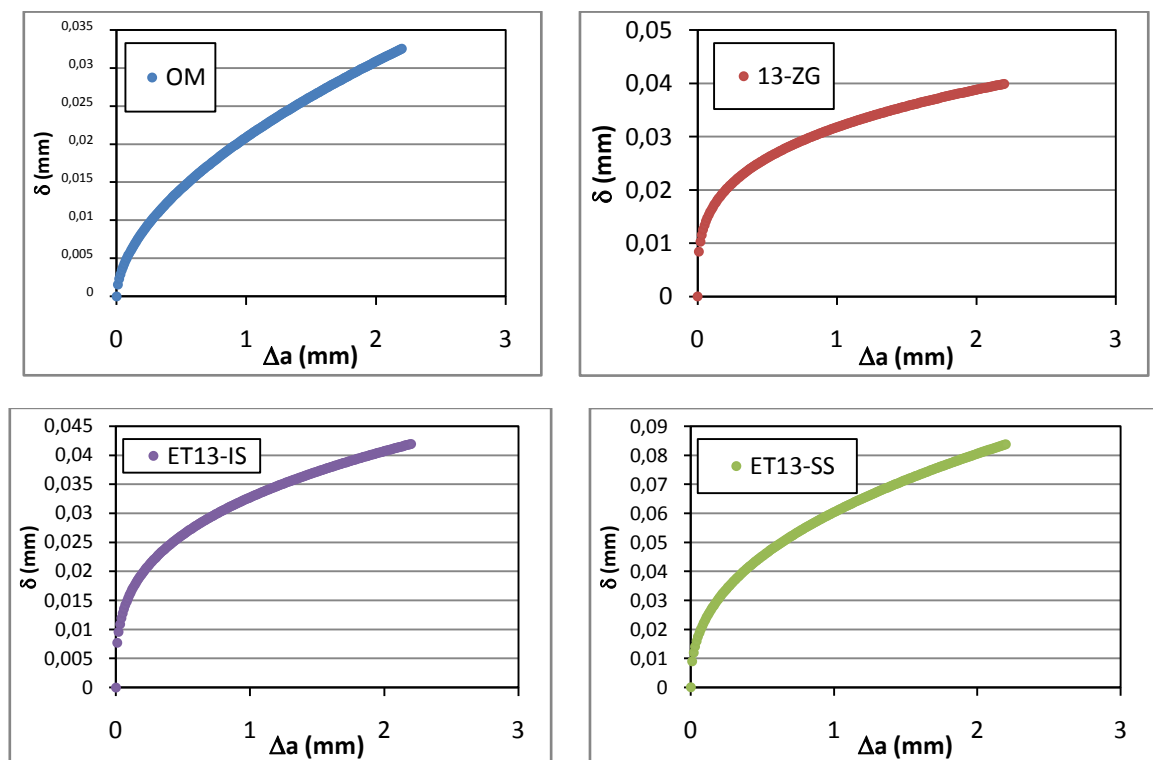


Slika 4.108 Pregled položaja krivih otpornosti $J-\Delta a$ za OM i spoj za ET 13 zavarenu sa alatom tip D i kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

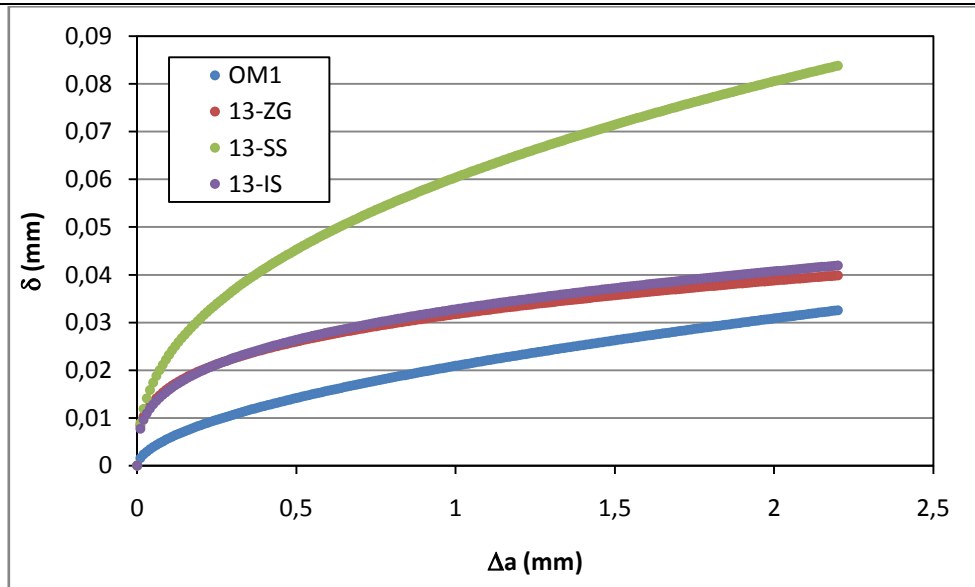


Slika 4.109 Vrijednost J -integrala OM i ZTMU spoja za ET 13 zavarenu sa alatom tip D i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min i $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

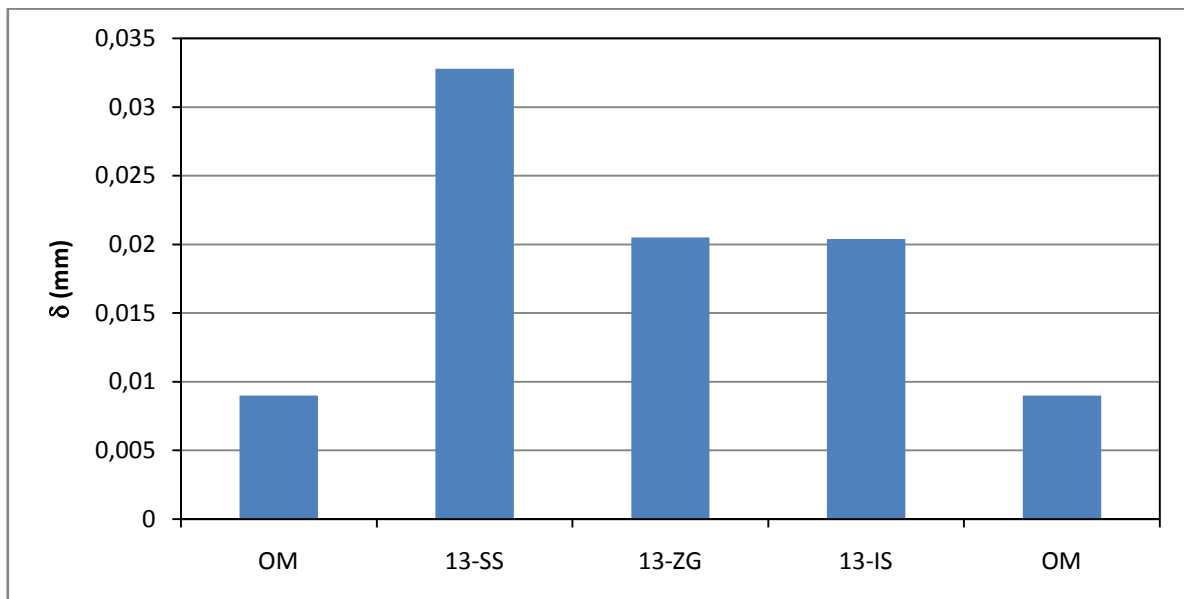


Slika 4.110 Krive otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 13 zavarenu sa alatom tip D i kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

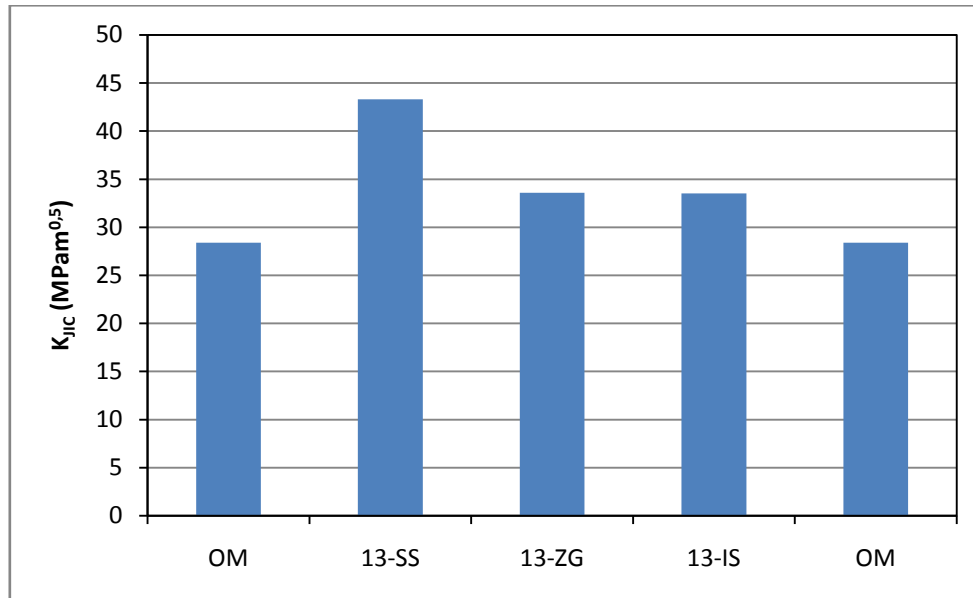


Slika 4.111 Pregled krivih otpornosti δ - Δa za OM i ZTMU za ET 13 zavarenu sa alatom tip D i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar metala zavara, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)



Slika 4.112 Vrijednost otvaranja vrha prsline δ za OM i ZTMU spoja u ET 13 zavarenu sa alatom tip D i sa kinematskim parametrima $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.113 Žilavost loma OM i ZTMU spoja u ET 13 zavarenu sa alatom tip D i sa kinematskim parametrima $v=80 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$ (OM - osnovni materijal, ZG - centar MŠ, IS - istosmjerna strana, SS - suprotnosmjerna strana)

U tabeli 4.6 daju se dobijene vrijednosti za integral J , N/mm i žilavost loma K_{JIC} , N/m^{3/2} sa testa određivanja parametara elasto-plastične mehanike loma OM i MŠ zavarenih spojeva ostvarenim tipovima alata A, B, C i D. Na ovaj način, između ostalih, sagledava se uticaj samo geometrijskih faktora postupka (ugao konusa i dužina trna alata) na otpornost prema širenju prsline u različitim strukturnim sadržajima zavarenih spojeva.

Tabela 4.6 Vrijednosti J integrala i žilavosti loma u funkciji parametara alata za zavarivanje

Broj uzorka	Parametri zavarivanja		Tip alata	J [N/mm]	K_{JIC} [N/m ^{3/2}]	
	Brzina zavar. [mm/min]	Broj obr. [min ⁻¹]	A,B,C,D			
OM				10	28	
ET 01	ZG	80	850	A($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	13	32
	SS	80	850	A($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	21	38
	IS	80	850	A($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	19	36
ET 05	ZG	80	850	B($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	13	32
	SS	80	850	B($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	22	41
	IS	80	850	B($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=10^0$)	17	37
ET 09	ZG	80	850	C($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	9	27
	SS	80	850	C($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	21	40
	IS	80	850	C($h=5,1\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	17	36
ET 13	ZG	80	850	D($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	13	37
	SS	80	850	D($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	23	43
	IS	80	850	D($h=5,4\text{mm}$, $\alpha=2,5^0$)	13	36

Legenda: ZG - zona „grumena”, SS - suprotnosmjerna strana adekvatna povratnoj strani, IS - istosmjerna strana adekvatna strani napredovanja

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

Pojedinačnim pregledom izgleda prikazanih krivih otpornosti za OM i MŠ (ZTMU), uvidom u grafičke prikaze veličine otvaranja vrha prsline $CTOD$ odnosno δ , integrala J i vrijednosti žilavosti loma K_{JIC} utvrđuje se:

- najmanju vrijednost žilavosti loma posjeduje OM i ona je 42 % manja od žilavosti loma na povratnoj strani MŠ uzorka ET 05,
- zona „grumena“ ima najmanju žilavost loma od preostalih sadržaja ZTMU na obje strane MŠ, izuzimajući ET 09 u kojoj je vrijednost udarne žilavosti zone „grumena“ identična strani napredovanja, i
- povratna strana posjeduje izraženiju otpornost prema širenju prsline od strane napredovanja kod svih ispitanih uzoraka.

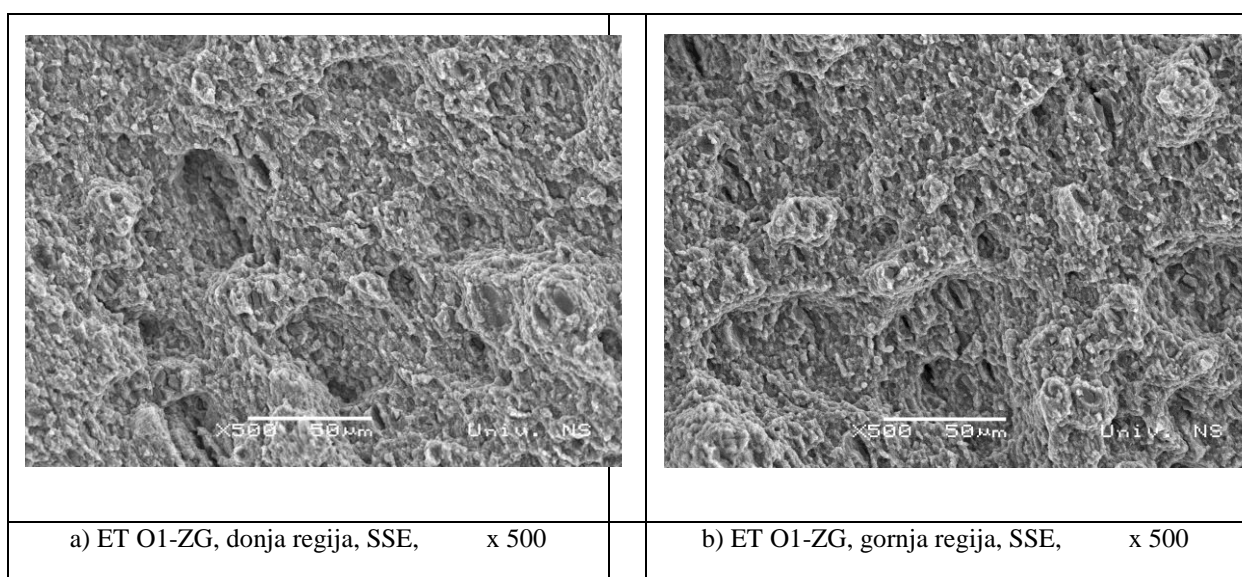
Veća otpornost prema širenju prsline MŠ u odnosu na OM može se objasniti korelacijom mikrostrukture, mehaničkih svojstava iskazanih na testu jednoosnim statičkim zatezanjem i savijanjem u tri tačke. Povećan broj obrtaja alata i brzine zavarivanja u kombinaciji sa optimalnom vrijednošću intenziteta sile zavarivanja daju dobru kombinaciju zatezne čvrstoće i otpornosti na nestabilan rast prsline. Različite forme trna alata mogu rezultirati razlikama u periodičnim strukturama MŠ do kojih dolazi naizmjeničnim varijacijama veličine zrna i distribucijom taloga.

4.7 SEM/EDS analiza površina preloma

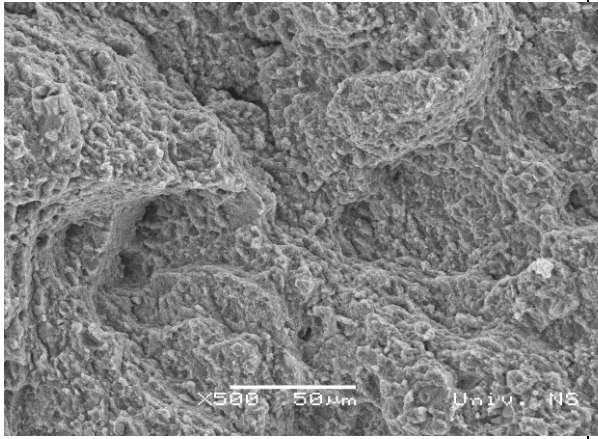
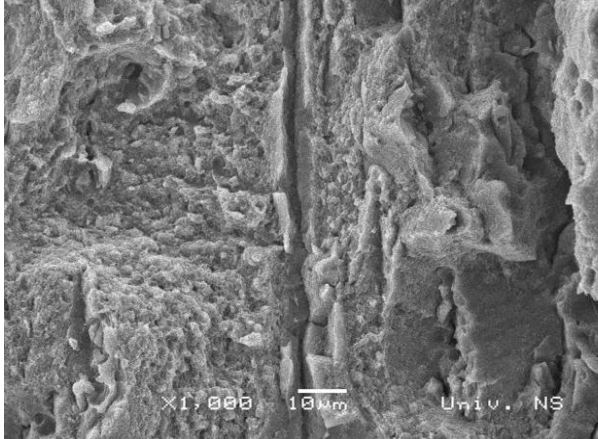
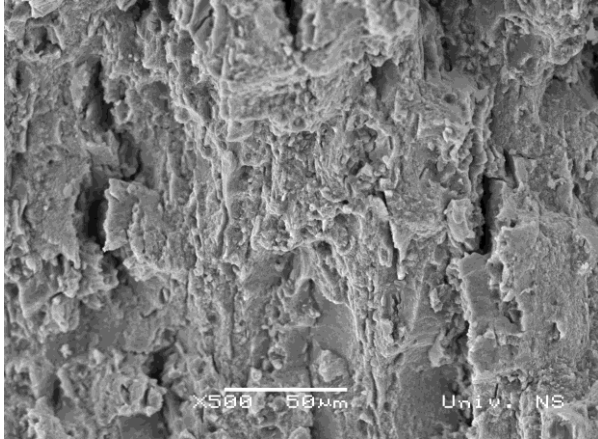
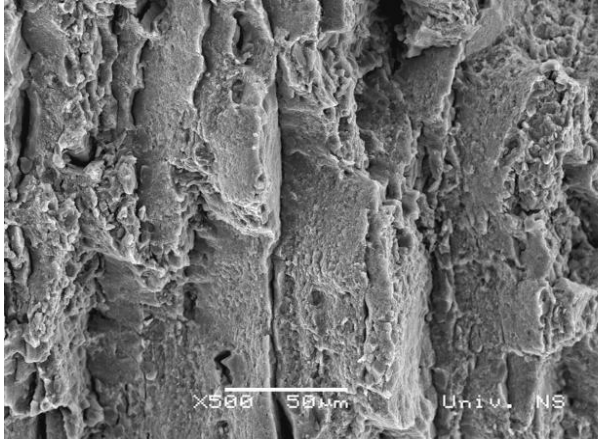
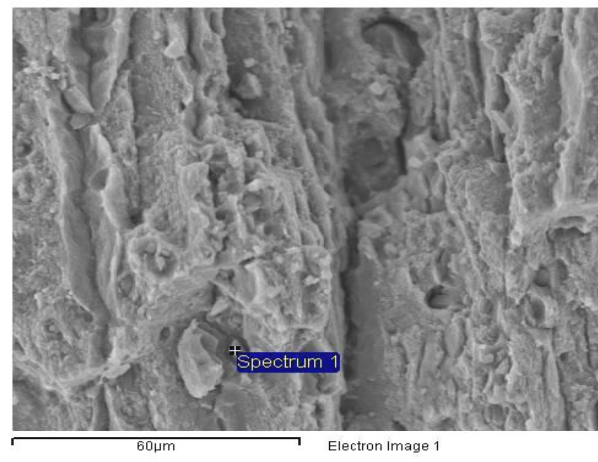
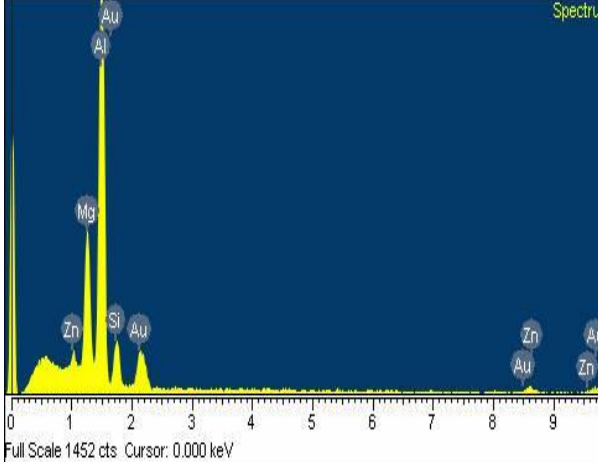
Na slikama 4.114 do 4. prikazani su mikrofraktografici površine preloma uzorka iz ET 01, ET 06, ET 11 i ET 16 zavarenih sa alatom tip A. Analizirana je ZTMU (zona „grumena“ (ZG) u donjoj i gornjoj regiji, na udaljenosti 4 mm i 8 mm na SN - strani napredovanja i PS - povratnoj strani) sa rezultatima hemijskog sastava mjesta inicijacije prsline primjenom EDS analizatora.

4.7.1 SEM/EDS analiza površine preloma uzorka iz ET 01

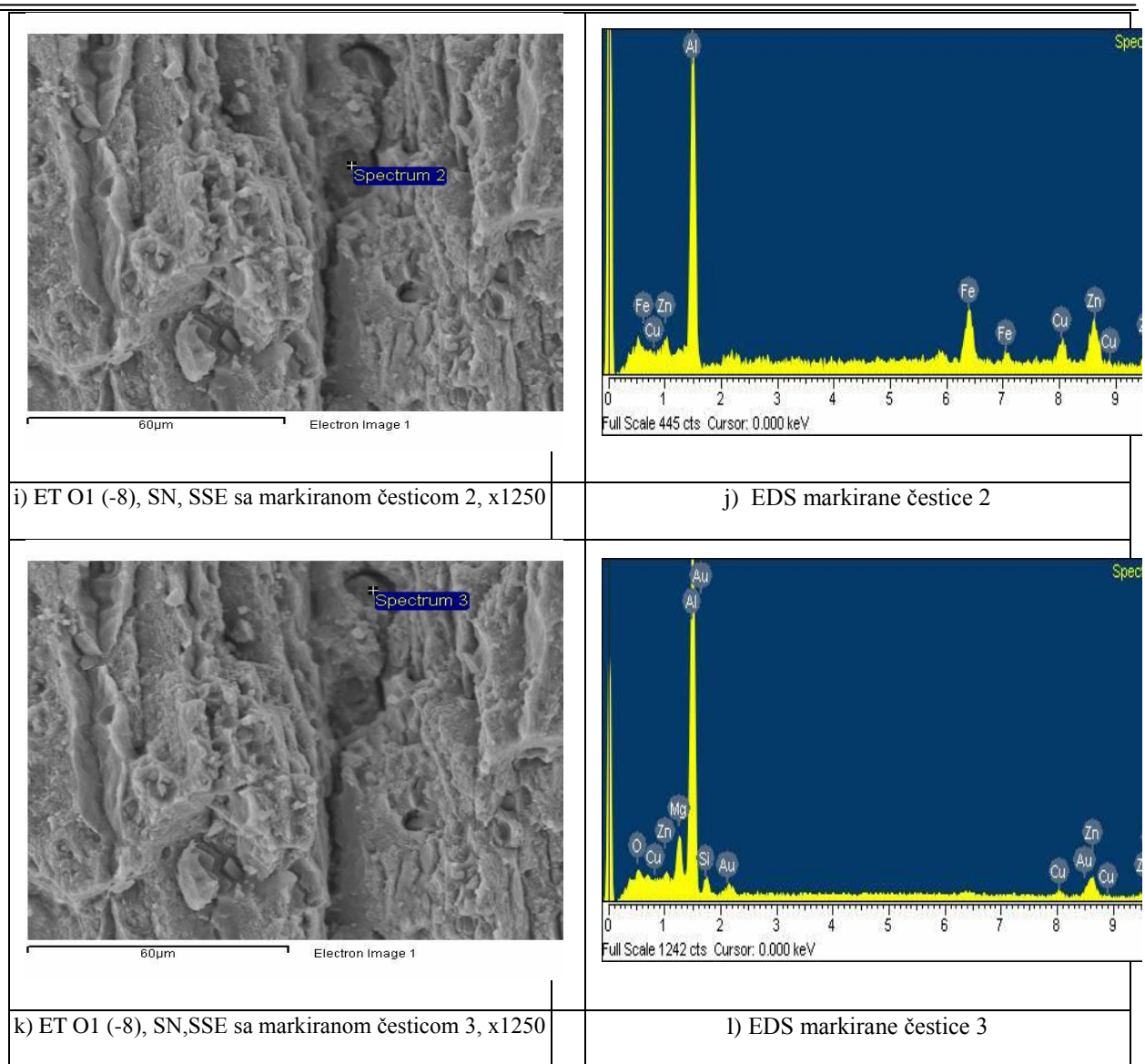
Na slici 4.114 prikazani su rezultati SEM/EDS analize uzorka ET 01 zavarenog sa alatom A.



4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

	
c) ET O1 (- 4) , SN, donja regija, SSE, x 500	d) ET O1(+4) , PS, donja regija, SSE, x 1.000
	
e) ET O1 (-8), SN, donja regija, SSE, x 500	f) ET O1 (+8), PS, donja regija, SSE, x 1000
	
g) ET O1 (-8), SN, SSE sa markiranom česticom 1, x1250	h) EDS markirane čestice 1

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.114 SEM/EDS mikrofotografije površine preloma uzorka u ET O1 sa hemijskom analizom karakterističnih spektara (alat A, $v=80$ mm/min, $n=850$ min⁻¹)

SEM analizom površine preloma uzorka ET O1 uočeno je da su u centralnom dijelu MŠ (zoni „grumena“) prisutne brojne veće i manje, dublje i pliće ravnoosne jamice, kao i zaobljenja i oivičene površine. Ovakav izgled preloma karakterističan je za duktilni lom. Na slici 4.114 a) i b) su mikrofraktografije prosječnog vidnog polja iz centra MŠ, pri povećanju od 500x.

Što se pri analizi preloma kretalo dalje od jezgra MŠ-centralne zone“ grumena“, mijenjao se izgled preloma da bi, na odstojanju od +4 mm, osim sitnih jamica smicanja, bile prisutne i jamice kidanja, kao i lokalne mikroprsrline, koje ukazuju na lom mehanizmom cijepanja, slika 4.114 d). U zoni udaljenoj 8 mm od centra MŠ prisutne su lokalne sekundarne prsrline, povećan broj nepravilnih jamica u kojima se nalaze polomljene sekundarne čestice ili nemetalni uključci, kao i površine smicanja i cijepanja na SN i na PS, slika 4.114 e) i f).

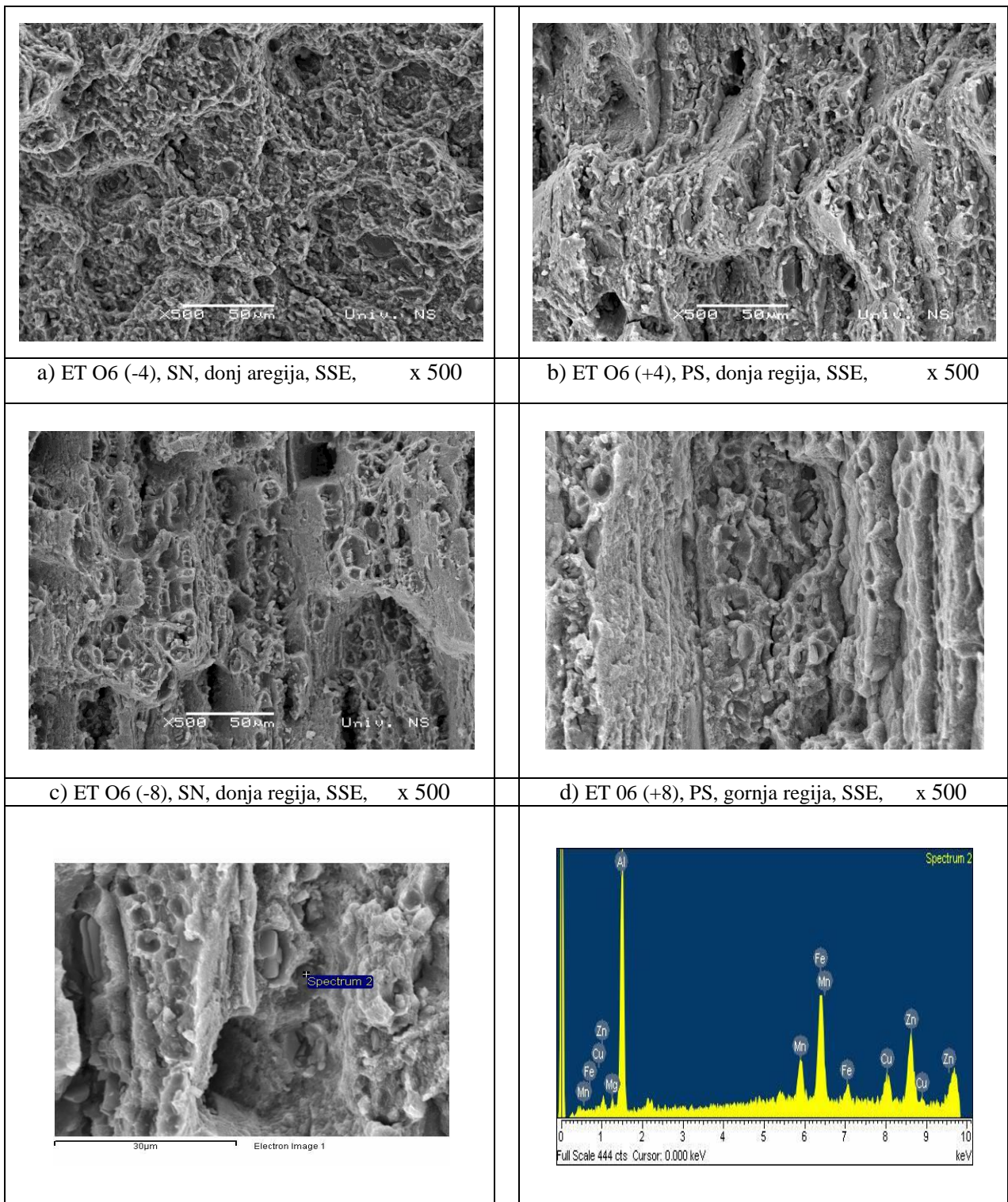
EDS analizom izvršena je identifikacija tih čestica. Na slici 4.114 g), i) i k) dati su EDS rendgenski spektri sekundarnih elektrona sa markiranih čestica (1,2 i 3). Na slici 4.114 h), j) i l) prikazani su EDS dijagrami elemenata prisutnih u markiranim česticima. Sa dijagrama se vidi da je čestica br.1 sekundarna faza na bazi AlMgZnSi, čestica 2 sekundarna faza na bazi AlFeZn, a

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

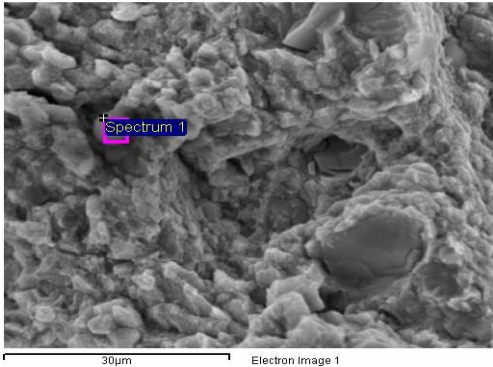
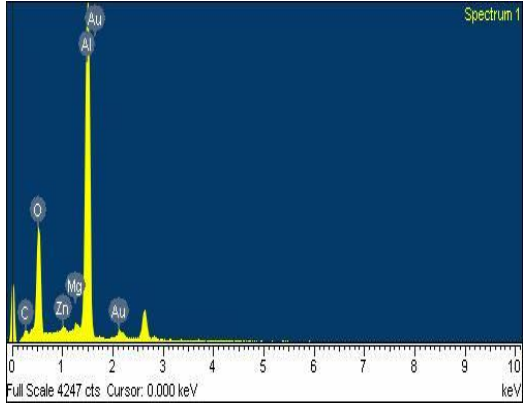
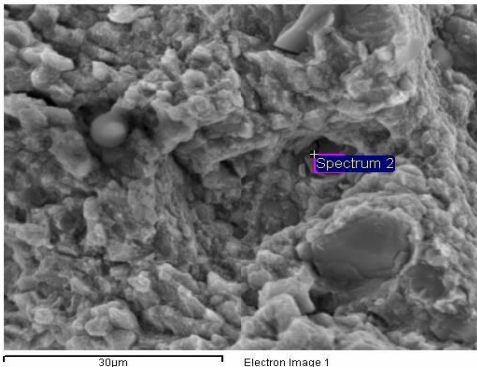
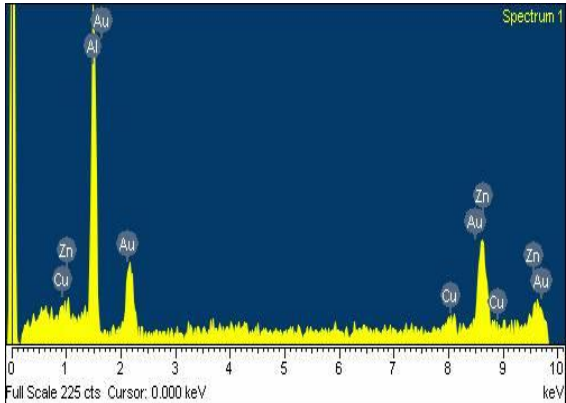
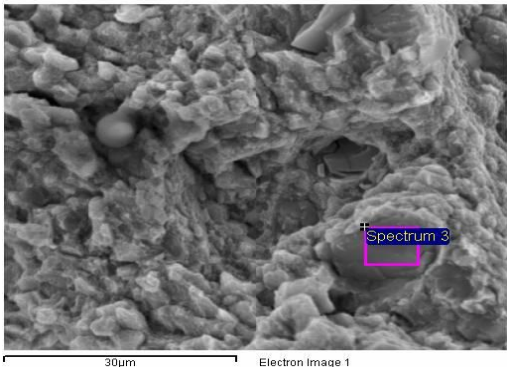
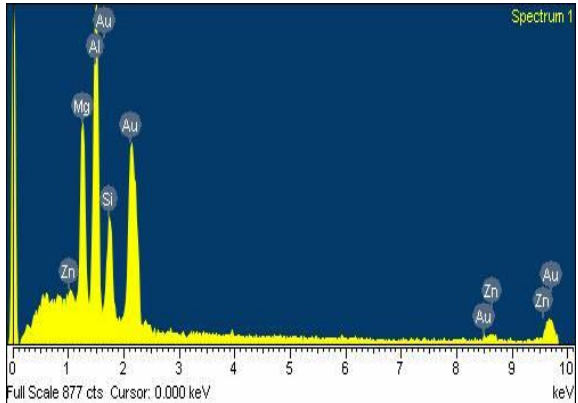
čestica 3 sekundarna faza na AlZn koja se istaložila na uključku MgO. Na istovjetan način izvršen je SEM/EDS pregled uzorka ET 06 zavarenog sa alatom tip B.

4.7.2 SEM/EDS analiza površine preloma uzorka iz ET 06

Na slici 4.115 prikazani su rezultati SEM/EDS analize površine preloma uzorka ET 06 zavarenog sa alatom tip B.



4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

e) ET6 (-4), SN, SSE sa markiranom česticom 2	f) EDS markirane čestice 2
	
g) ET O6 (-4), SN, SSE sa markiranom česticom 1, x 2500	h) EDS markirane čestice 1
	
i) ET O6 (-4), SN, SSE sa markiranom česticom 2, x 2500	j) EDS markirane čestice 2
	
k) ET O6 (-4), SN,SSE sa markiranom česticom 3, x2500	l) EDS markirane čestice 3

Slika 4.115 SEM/EDS mikrofotografije površine preloma uzorka u ET O6 sa hemijskom analizom karakterističnih spektara (alat B, $v=60 \text{ mm/min}$, $n=750 \text{ min}^{-1}$)

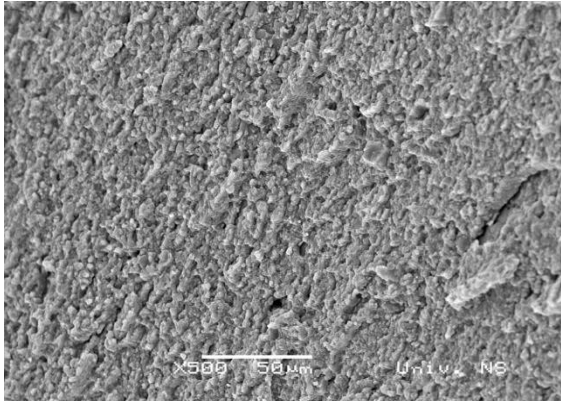
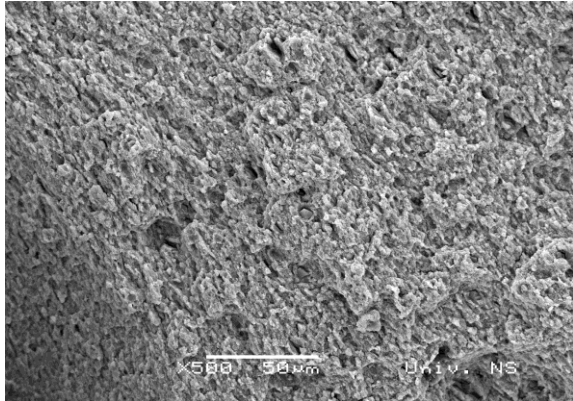
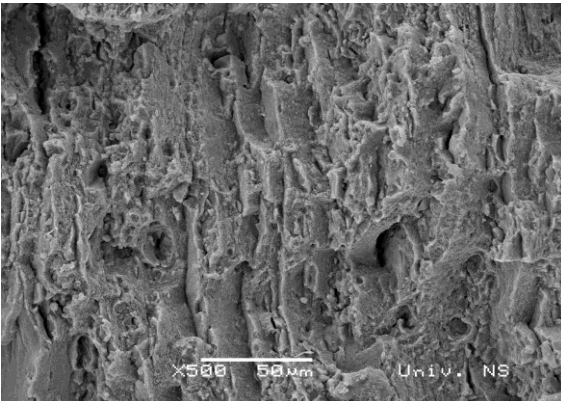
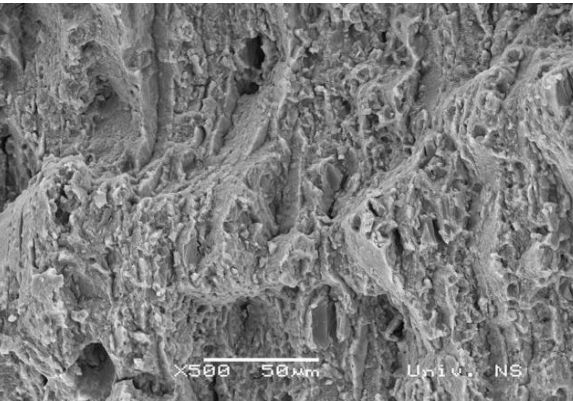
SEM analizom uzorka ET O6 vidljivo je da je morfologija preloma slična morfologiji preloma uzorka u ET O1. Dakle, centralni dio jezgra MŠ-zona "grumena" ima dominantno duktilni lom sa

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

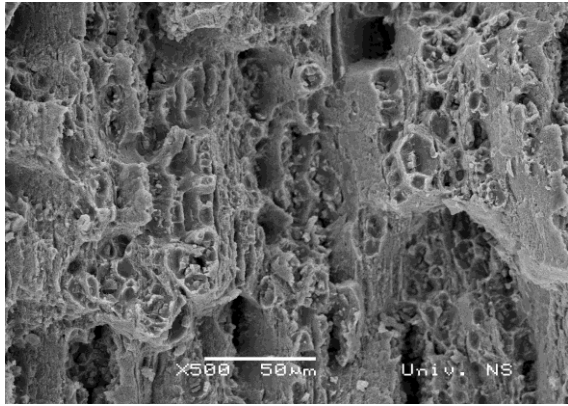
elementima plastične deformacije i razvlačenja matriksa oko sekundarnih čestica. U zonama udaljenim od centra MŠ, odnosno ZTMU uočen je veći broj sekundarnih čestica i lokalnih sekundarnih prslina, slika 4.115 a), b), c) i d) koje su nastale pri udaru na instrumentalizovanom Charpy klatnu. Ovakva morfologija preloma tipična je za lom udarom. Na slici 4.115 e), g), i) i k) prikazani su EDS spektri sekundarnih elektrona (SSE) uzorka ET 06 na kojima su markirane čestice (1,2 i 3), dok su na slikama pod f), h), j) i l) prikazani EDS dijagrami elemenata prisutnih u markiranim česticama. Sa dijagrama se vidi da su u pitanju najvjerovatnije intermetalna jedinjenja kao i kod ET 01.

4.7.3 SEM /EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 11

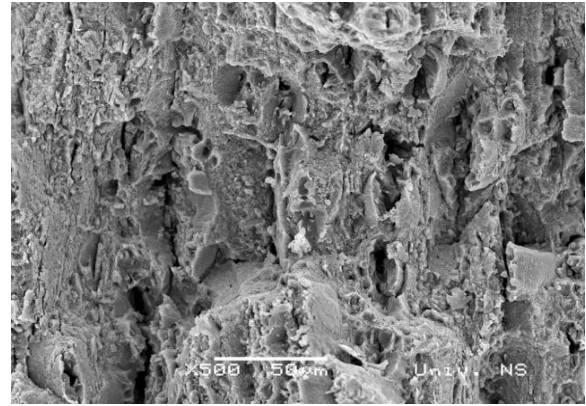
Mikrofotografije prelomnih površina u različitim mjestima ET 11 zavarene sa alatom tip C prikazane su na slici 4.116.

	
a) ET 11-ZG, donja regija, SSE, x 500	b) ET 11-ZG, gornja regija, SSE, x 500
	
c) ET 11(-4), SN, donja regija, SSE, x 500	d) ET 11(+4), PS, donja regija, SSE, X 500

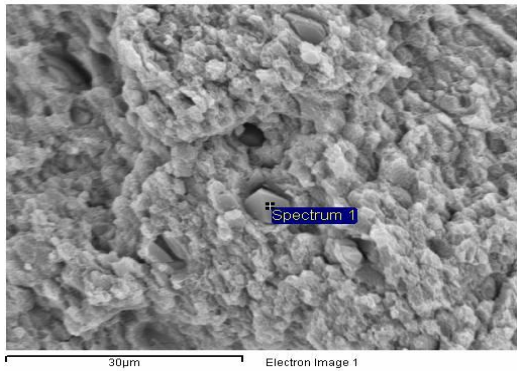
4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



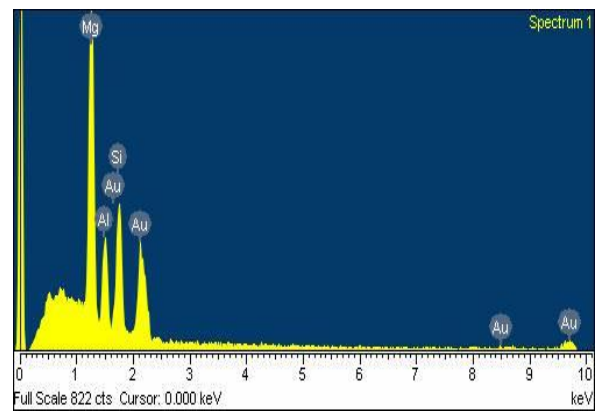
e) ET11 (-8) ,SN , donja regija, SSE, x 500



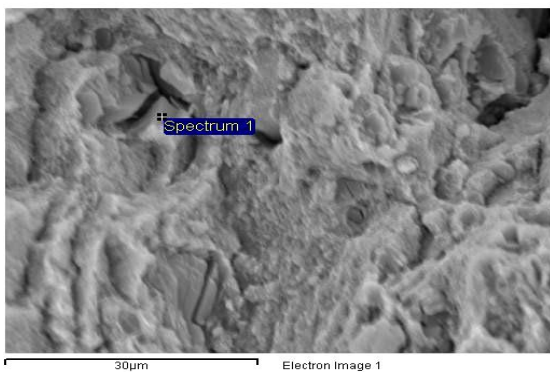
f) ET 11 (+8), PS, donja regija, SSE, x 1000



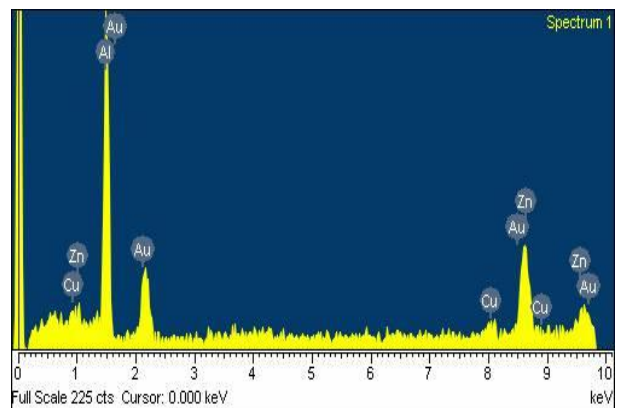
g) ET 11-ZG, SSE sa markiranom česticom, x 2500



h) EDS markirane čestice 1

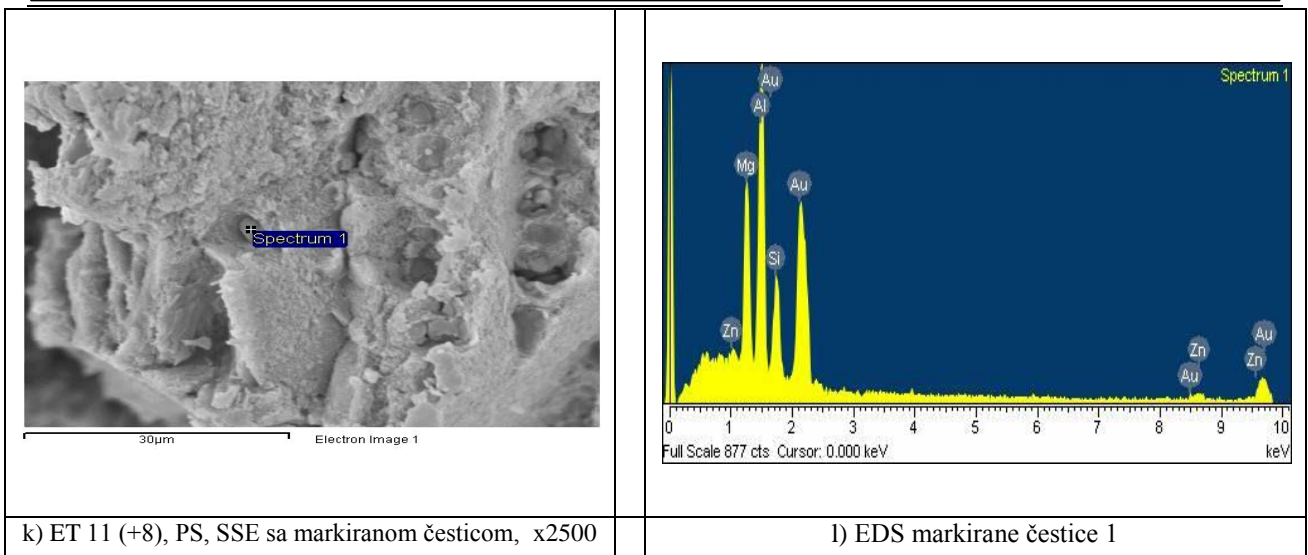


i) ET 11 (-4), SN, SSE sa markiranom česticom, x 2500



j) EDS markirane čestice 1

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



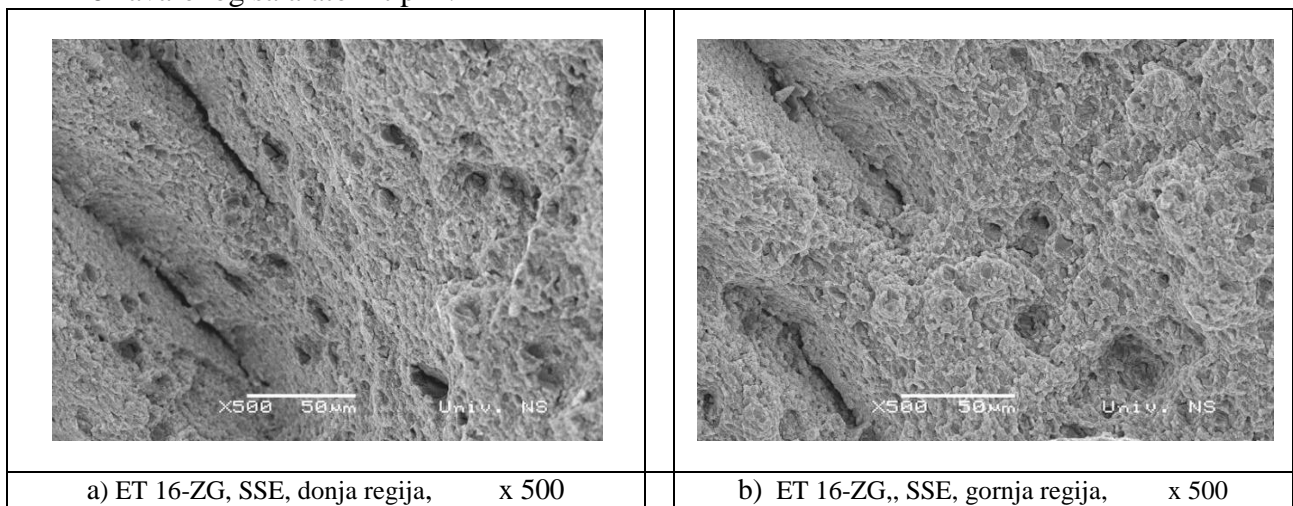
Slika 4.116 SEM/EDS mikrofotografije površine preloma uzorka u ET 11 sa hemijskim analizom karakterističnih spektara (alat C, $v=80 \text{ mm/min}$, $n=750 \text{ min}^{-1}$)

SEM analizom uzorka u ET 11, već pri malim povećanjima od 100x, uočena je nešto drugačija morfologija preloma. Naime, u centralnoj zoni jezgra MŠ-zoni „grumena“ prisutne su izdužene parabolične jamice nastale kidanjem i smicanjem matriksa, kao i pore i lokalne mikroprslina, slika 4.116 a) i b).

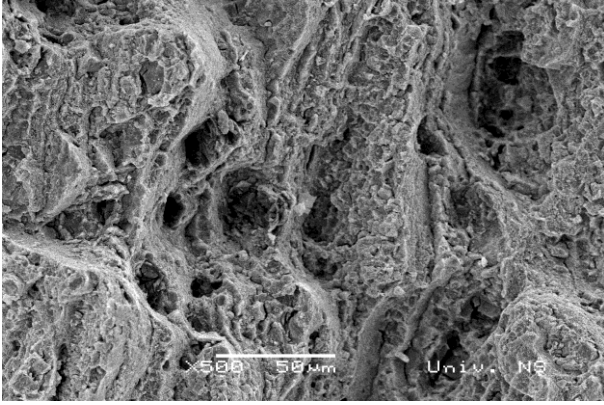
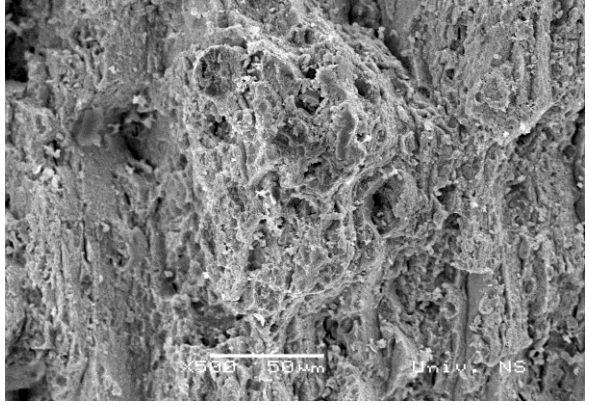
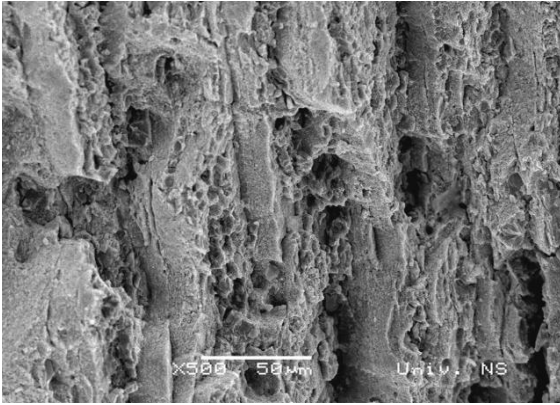
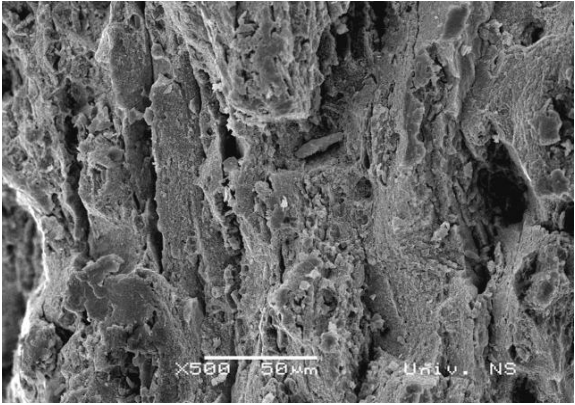
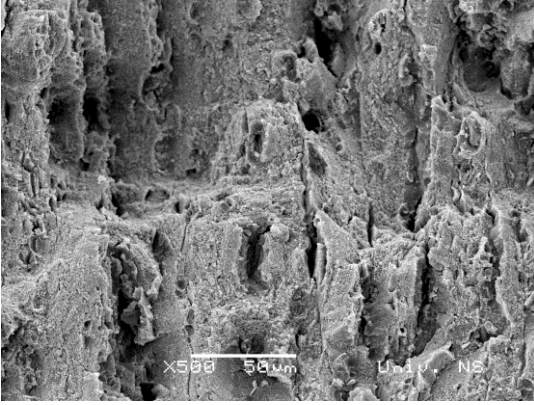
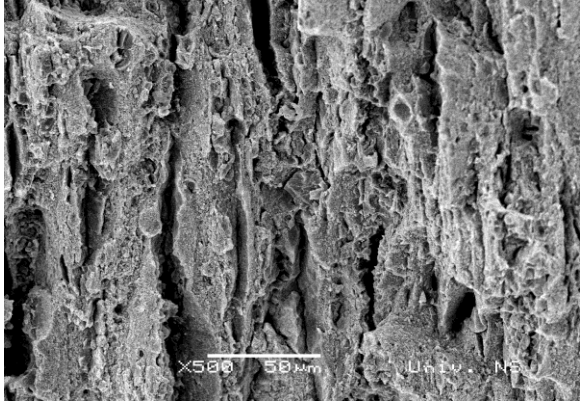
Pri analizi prelomne površine MŠ u pravcu ZUT, osim jamica u kojima se uglavnom nalaze sekundarne čestice, uočeni su i elementi smicanja i kidanja, pa čak i prslina po trojnim granicama, slika 4.116 c), koje su karakteristične za krti lom.

4.7.4 SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka iz ET 16

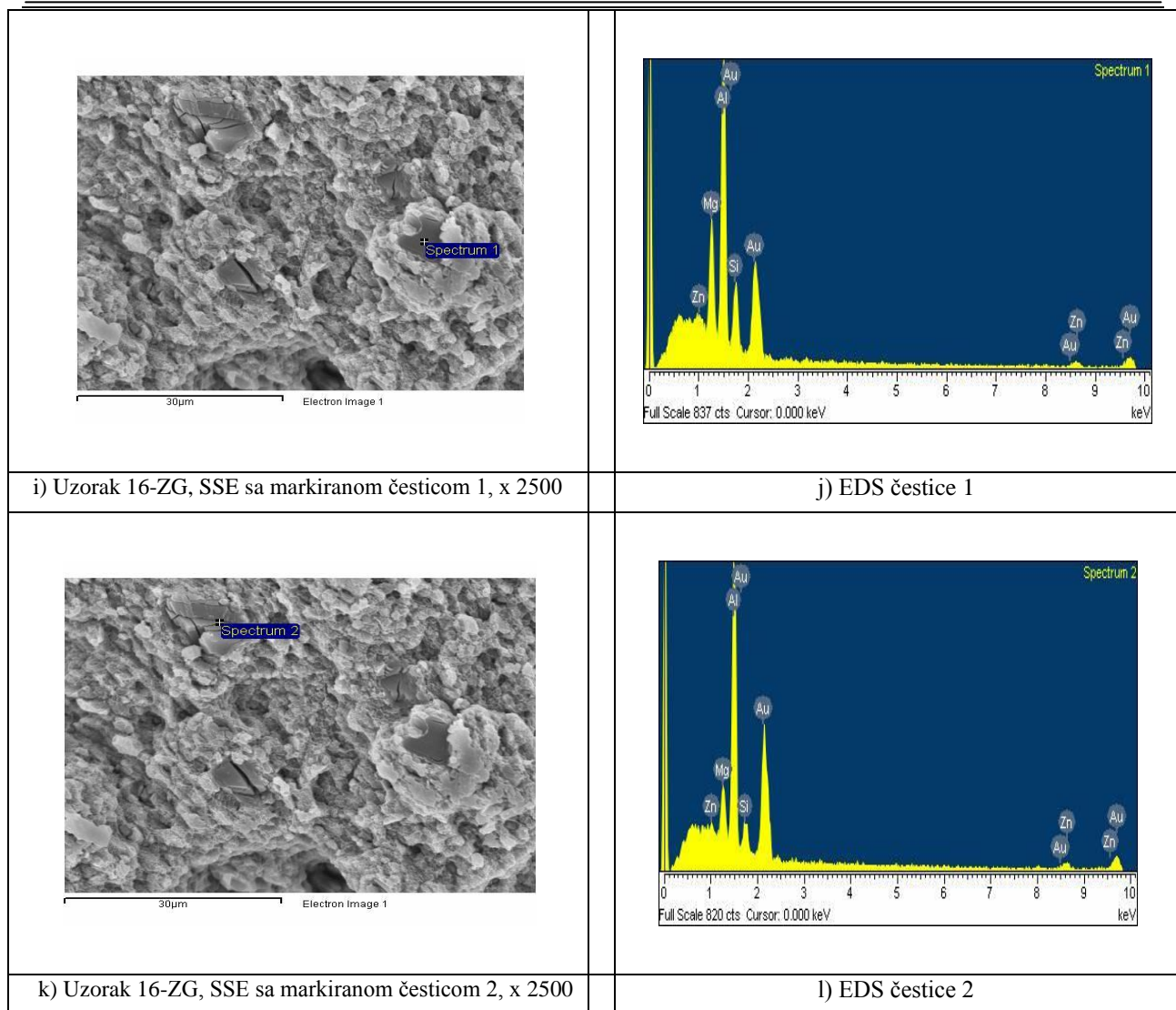
Na sledećoj slici prikazane su mikrofotografije SEM/EDS analize prelomne površine uzoraka iz ET 16 zavarenog sa alatom tip D.



4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

	
c) ET 16 (- 4), SN , donja regija, SSE, x 500	d) ET 16(-4), SN, gornja regija, SSE, x 500
	
e) ET 16 (+4), PS, donja regija, SSE, x 500	f) ET 16 (+4), PS, gornja regija, SSE, x 500
	
g) ET 16(+8), PS, donja regija, SSE, x 500	h) ET 16 (+8), PS , gornja regija, SSE, x 500

4.0 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA



Slika 4.117 SEM/EDS mikrofotografije površine preloma uzorka ET 16 sa hemijskom analizom karakterističnih spektara (alat D, $v=60 \text{ mm/min}$, $n=850 \text{ min}^{-1}$)

SEM analizom uzorka u ET 16, pri povećanju od 500 x, u centralnoj zoni MŠ–zoni „grumena“ prisutne su jamice nastale kidanjem i smicanjem matriksa, kao i mikropore i lokalne mikroprrline, slika 4.117 a) i b). Unutar tih jamica nalaze se čestice različitog oblika i veličine, koje su poslužile kao nukleus oko koga su formirane praznine na način što se matriks pri udaru plastično deformisao i odvojio od čestica, što znači da prelom ima duktilni karakter.

Pri analizi prelomne površine u ZTMU uočeno je da osim jamica u kojima se uglavnom nalaze sekundarne čestice, postoje i elementi smicanja i kidanja, prikazano pod c), d), e) i f), koje su karakteristične za krti lom. To je naročito izraženo kod uzorka ET 16±8 ZTMU, odnosno nezavisno od strane miješanja - SN ili PS, što se vidi na istoj slici 4.117) i b).

Uopšteno, rezultati SEM/EDS analize upućuju da je lom najčešće proizvod manje ili više prisutnih nečistoća, krupnijih i krtih čestica u slojevitim strukturama ZTMU, posebno zone „grumena“ sa prisutnim Fe zapaženim u spektrima analiziranih čestica.

5.0 DISKUSIJA

Analizom dobijenih rezultata ispitivanja metodama bez razaranja primijenjenim na 36 komada eksperimentalno zavarenih ploča metodama (VT, MT, RT), može se konstatovati da nema korišćene metode koja bi dovoljno pouzdano potvrdila postojanje grešaka izvan kriterijuma prihvatljivosti određenih standardom EN ISO 5817. Vizuelnim pregledom (VT) i ispitivanjem penetrantima (PT) na jednostavan način registruju se greške na licu, a naročito u korjenu MŠ kod nestabilnih parametara procesa na početku i na kraju ciklusa zavarivanja. Suština je da “skrivenne” greške tipa nedovoljne penetracije alata (nedostatka “provara”) ne mogu otkriti čak ni rendgenski zraci (RT). Bez obzira što će klasični postupci ispitivanja zavarenog spoja bez razaranja da pokažu zadovoljavajuće rezultate, prioritetno je i najznačajnije preliminarno ispitivanje sa razaranjem probnim savojnim testom u tri tačke preko valjka (trna) postavljenim oko lica MŠ tako da korjen bude konveksan i izložen postepenom ravnomjernom savijanju. Prosječne vrijednosti ugla savijanja najmanje su kod uzoraka zavarenih sa alatom tip A i iznose $6,25^\circ$, kod uzoraka zavarenih sa alatom tip B ugao savijanja do pojave prsline je najveći od svih proba i iznosi $19,25^\circ$. Ostali eksperimentalni uzorci zavareni sa alatom tip C i tip D imaju prosječnu vrijednost ugla savijanja do pojave loma od $12,75^\circ$ i $14,5^\circ$, respektivno. Najveći ugao savijanja do pojave prsline ima epruveta iz uzorka ET 05 od 35° , a najmanji ugao savijanja epruvete do pojave prsline je iz eksperimentalnih tačaka ET 06 i ET 13 i iznosi 2° , obje zavarene sa različitim tipovima alata. Indikativno je mjesto pojave prsline koje se kod svih uzoraka nalazi u zoni “grumena”- centru MŠ sa prevladavajućom propagacijom prema povratnoj strani. U tom dijelu zavarenog spoja (zoni “grumena”) vrijednosti tvrdoće su na nivou vrijednosti tvrdoće OM i sa određenim blagim padom na mjestima neposredno udaljenim od centra MŠ. Postoje tragovi “pregorijevanja” i taloga u materijalu koji se mikrograficima prepoznaju u obliku znatnog broja tamnih tufni. Sve ovo je više nego dovoljno za analizu u kojoj treba istaći da je test savijanjem oko lica MŠ najpouzdaniji indikator (ne)postojanja defekata u korjenu MŠ prvenstveno tipa nedostatka penetracije - “neprovarenog” korjena, a potom i drugih naslijeđenih i stečenih grešaka u slojevitoj strukturi zavarenog spoja. Ovi rezultati su u visokom stepenu saglasnosti sa rezultatima istraživača [261,262]. Od metoda ispitivanja sa razarenjem uzoraka, makrografik izbruska poprečnog presjeka zavarenog spoja sa pripadajućim prikazima mikrostrukture, najpouzdaniji je način raspoznavanja vrsta i lokacije svih potencijalno mogućih grešaka u strukturnim sadržajima zavarenog spoja. ***Dokazana je HIPOTEZA 1.***

Analizom dobijenih rezultata monitoringa dinamičkog odziva alata za pomenute faze i ciklus zavarivanja u svim tačkama eksperimenta, zapaža se dvostepeni skokovit porast sile zavarivanja F_z u početnom stadijumu procesa. Prvi manji porast sile zavarivanja F_z je tokom odvijanja I faze do okončanja I međufaze, a drugi porast počinje tokom odvijanja II faze i traje do okončanja II međufaze. Dakle, u samom početku koji odgovara kvazistacionarnom stanju, dok trn alata spuštajući se brzinom od $0,25 \text{ mm/s}$ duž Z -ose lagano prodire u osnovni materijal, sila zavarivanja F_z postepeno raste da bi tek poslije perioda od oko 20 s, njena vrijednost počela da opada zbog omekšane zone oko trna alata. Uticaj sekundarnog tečenja materijala je minimalan jer je dominantna uglavnom rotacija u zavojničkom (spiralnom)

5.0 DISKUSIJA

transferu mase. Ovaj period stagnacije sile zavarivanja F_z traje koliko i vrijeme koje protekne dok trn alata rotira "u mjestu", prije nego što nastavi da se u interfejsu aktivira sekundarno tečenje čelom alata dodirujući kontaktnu cilindrično-prstenastu površinu OM. Odmah nakon toga, aktivna površina čela alata indukuje značajno veće sile trenja i povećava otpor deformaciji koji raste usled brzine spuštanja alata od 0,01 mm/s. Nastaje nagli rast sile zavarivanja, a ubrzo i njen pad kao posledica velikog omekšanja materijala ispod čela alata, dok oplata koju čine stezma ploča i podmetač, ne dozvoljavaju njegovo istiskivanje sa suprotne strane. U narednim stadijumima procesa ZTM, sila zavarivanja F_z uglavnom je konstantna iz razloga što je otpor deformaciji minimalan. Jedino moguće objašnjenje ovog fenomena je odnos između komponenti primarnog i sekundarnog tečenja materijala čije je kretanje haotično. Ovo stanje se najuvjerljivije ogleda kroz:

a) najniže prosječne vrijednosti sile zavarivanja $F_{z_{trna}}$ nakon faze prodiranja trna alata u zavarivane ploče u dubini oko 5 mm, registrovane su ET 09, ET 10, ET 11 i ET 12 (odnos dva ključna kinematska parametra $v_{zav} / n_{alata} = 9,375 -14,16$), odnosno sa alatom tip C kod kojeg je najmanji ugao nagiba ugla trna i najmanja dužina konusa trna. Ovo je evidentno bez obzira na naizmjeničnu varijaciju brzine zavarivanja u rasponu od $v = 60$ mm/min do $v = 80$ mm/min i broja obrtaja alata od $n = 750 \text{ min}^{-1}$ do $n = 850 \text{ min}^{-1}$. Kod alata ovog tipa presudan uticaj imala je najmanja dužina trna od $h = 5,1$ mm i najmanji ugao nagiba konusa trna alata $\alpha = 2,5^\circ$. Prosječna vrijednost sile zavarivanja iznosi $F_{z_{trna}} = 8,7$ kN na kraju faze koju označava dodir čelone površine alata i gornjih površina ploča,

b) najmanji skok porasta sile zavarivanja F_z u fazi uranjanja čela alata $F_{z_{čela}}$ pri nepromijenjenim kinematskim parametrima, takođe se registruju kod ovog tipa alata, jer sila zavarivanja F_z ima maksimalnu vrijednost $F_{z_{čela}} = 15,2$ kN, što je najmanji intenzitet ove sile kod svih eksperimentalnih tačaka pri korišćenju svih tipova alata,

c) najveći porast intenziteta sile zavarivanja F_z na kraju završetka kretanja trna alata duž Z-ose od $F_{z_{trna}} = 11,8$ kN zabilježen je kod ET 01, ET 02, ET 03 i ET 04 koje su zavarene sa alatom tip A ($h=5,1$ mm, $\alpha = 10^\circ$), dok je najveća srednja vrijednost maksimalne sile zavarivanja od $F_z = 24,5$ kN kod uzoraka ET 13, ET 14, ET 15 i ET 16 zavarenih sa alatom tip D kod kojeg je najmanji ugao nagiba trna $\alpha = 2,5^\circ$ i najveća dužina trna $h = 5,4$ mm,

d) kod ploča zavarenih sa alatom E (ET 17, ET 18, ET 19 i ET 20), u poređenju sa rezultatima vrijednosti aksijalne sile $F_{z_{trna}}$ kod ploča zavarenih sa drugim tipovima alatima, registruju se osrednjene vrijednosti $F_{z_{trna}} = 10,7$ kN, dok sila zavarivanja $F_{z_{čela}}$ ima izraženo visok intenzitet od $F_{z_{čela}} = 23,9$ kN, za nepromijenjen odnos kinematskih parametara $n_{alata} / v_{zav} = 11,42$,

e) komparativna analiza vrijednosti sile zavarivanja $F_{z_{trna}}$ i $F_{z_{čela}}$ dobijenih praćenjem toka dijagrama F_z-t (sila-vrijeme) kod uzoraka zavarenih sa alatom tip B (ET 05, ET 06, ET 07 i ET 08), upućuje na komentar da je očigledno relativno nizak međusobni odnos nivoa intenziteta sile zavarivanja $F_{z_{trna}} = 11,4$ kN i sile $F_{z_{čela}} = 16,7$ kN povoljniji za konsolidaciju zavarenog spoja. To ide u prilog tvrdnji koja će se pokazati tačnom u toku mehaničke karakterizacije zavarenih spojeva,

5.0 DISKUSIJA

Dakle, poželjna niža vrijednost sile zavarivanja F_z za ostvarivanje solidnog kvaliteta zavarenog spoja, opravdanija je ako je manja razlika u poređenju intenziteta krajnje sile zavarivanja $F_z = F_{z\check{c}ela}$ (kraj II faze) sa intenzitetom sile zavarivanja ostvarenim u prvom stadijumu (kraj I faze) prodora alata F_{ztrna} . Primjera radi, kod eksperimentalnih proba zavarenih sa alatom tip B ($h = 5,4$ mm, ugao $\alpha = 10^\circ$, $v = 60$ mm/min do $v = 80$ mm/min, $n = 750$ min⁻¹ do $n = 850$ min⁻¹) postignuti su takvi rezultati vrijednosti sila, pri čemu je vrijeme prvog zastoja i vrijeme drugog zastoja za svaku eksperimentalnu tačku bilo jednako. Ovakva tumačenja eksperimentalnog toka i praćenja intenziteta sile zavarivanja korespondiraju u značajnoj mjeri sa istraživanjima [263].

S druge strane, numerički i grafički interpretirana analiza intenziteta dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} u frekventnom domenu od 0 Hz do 100 Hz i od 0 Hz do 1000Hz kod svih tačaka eksperimenta, najizraženija je oko domena od 10Hz do 30Hz, odnosno u samoj fazi prodiranja alata u osnovni materijal (I faza i II faza). Uočljivo je da porastom broja obrtaja alata raste frekvencija dinamičke komponente F_{zd} , dok se kod niskog broja obrtaja alata od $n = 750$ min⁻¹, vrijednost učestanosti kreće oko $F_{zd} = 11,69$ Hz. Kod zavarivanja sa osrednjenim vrijednostima broja obrtaja $n = 800$ min⁻¹ (ET 17, ET 18, ET 19 i ET 20), učestanost F_{zd} je oko 12,51 Hz.

Najveću vrijednosti ubrzanja u X, Y i Z – smjeru (više od 2 mm/s²) imaju alati kojima su zavarivani uzorci ET 02, ET 03, ET 04, ET 08, ET 10, ET 12, ET 13 i ET 16, dok su ispod naznačene vrijednosti ubrzanja alata u tačkama eksperimenta ET 01, ET 05, ET 06, ET 07, ET 09, ET 11, ET 14, ET 15, ET 17, ET 18, ET 19 i ET 20. Nije rijedak slučaj da dijagnostički parametar ubrzanja samo u jednom pravcu dosegne povišenu vrijednost, dok u istom frekventnom i vremenskom spektru u preostale dva smjera, njihove vrijednosti budu veoma bliske. U poređenju sa vremenskim domenom, troosne komponente ubrzanja izrazito su “nemirne” samo u prvim sekundama trajanja procesa (Z –osa), jer se tada početak plastičnosti materijala odvija na relativno maloj zapremini materijala. To je posledica istovremenog dejstva aksijalnog opterećenja od strane alata i toplote generisane trenjem čela alata o radne komade koje dovodi do mikrokovanja u smjeru od zadnje ivice alata prema oplati radnih komada. Kasnija “kolebanja” vrijednosti ubrzanja (Y –pravac) nastaju kao rezultat premještanja nedovoljno zagrijanog materijala ispred prednje ivice prema dodatno zagrijanom materijalu iza zadnje ivice alata. Na primjerima iz eksperimenta ovaj neprekidan transfer materijala u frikcionom paru alat-osnovni materijal dešava se pri povećanju okolne temperature, što se neminovno odražava na nivo vibracija, tim prije što su sva tri davača ubrzanja, zbog nemogućnosti direktnog kontakta sa alatom, postavljeni na dio oplata-steznu ploču na radnom stolu mašine. Ovo dodatno verifikuje objašnjenje da se, osim miješanja u fazi zavarivanja, odvija naizmjenično periodično iskivanje (mikrokovanje) i ekstruzija (istiskivanje) malih količina materijala. Usled izrazite nelinearnosti fenomena ZTM, numeričko modeliranje i simulacija procesa jedini je način da se do određene mjere objasni fizička suština vibracionog ponašanja alata u svakoj od pojedinačnih faza i ciklusa procesa zavarivanja. [261,262]

Grafički zapis odnosa T_z-t_z (temperature zavarivanja-vrijeme zavarivanja) u formi dijagrama u prilog je tvrdnje istraživača da je za vjerodostojnu sliku i analizu termalne istorije procesa,

5.0 DISKUSIJA

od presudne važnosti mjesto i način mjerenja [263]. U odnosu na ovdje primijenjenu tehniku (mjerenje temperature oboda alata IC kamerom), odnosno vremenski diskontinualnog zapisa i na bazi toga grafičkog prikaza, mnogo je bolje primijeniti termoparove sa mogućnošću analogno-digitalne konekcije sa informacionim sistemom. Ovo iz razloga što zraci IC kamere sa bilo kojom rezolucijom slike daju samo signal temperature sa dodirne površine oboda čela alata i gornje površine limova, a u toj regiji ona je manja nego u centru miješanja oko trna alata ZTMU, odnosno u jezgru MŠ. Istina je da je i pri nižim temperaturama (ispod 150°C) na početku II faze, kod gotovo svih uzoraka ET 01 do ET 20, moguće konsolidovanje zavarenog spoja. Ta tvrdnja u značajnoj mjeri opovrgava tezu da je trenje dominantno kod ZTM, već je nesumnjivo da temperaturni profil koji je predstavljen u istraživanju, upućuje na komentar da kod adijabatskog zagrijavanja, plastične deformacije koje potiču od alata generišu dovoljnu količinu energije koja inicira dinamičku rekristalizaciju ultrafinih zrna jezgra MŠ. Ovakva diskusija prilog je više tezama iz radova *S. Benavidesa* koji je uspio da na leguri aluminijuma EN AW 2024 u kriogenim ulovima dobije zavareni spoj zadovoljavajućih osobina [264, 265]. Očigledno je da postoji velika praznina ne samo u teorijskoj ravni već i u sferi praktičnih istraživanja, naročito o odnosu energetskog učešća koje potiče od trenja i od mehaničke deformacije od alata u formiranju zavarenog spoja.

Metalografske analize su na makrografskom nivou jasno diferencirale postojanje asimetričnosti zavarenog spoja sa naglašeno izraženim postojanjem rukavca na strani napredovanja kao i razlike u nagibima zrnaste strukture sredine poprečnog presjeka u kretanju materijala prema povratnoj strani MŠ. Jezgro MŠ, na mikrograficima identifikovano kao oblast sa plastično deformisanim pojasevima oblika spirale, ima tipično kružni oblik sa koncentričnim slojevima nalik prerezanoj glavici “crnog luka” u kome preovladavaju mali ekviosni kristali pri poređenju sa savijenim i izduženim kristalima u ZTMU. Do ove strukture dopiru više diskretne granice na strani napredovanja i manje diskretne granice na povratnoj strani MŠ. U ZUT preovladaju povećani nivoi taloga duž granica zrna u najvećoj mjeri sa IM fazama grubozrnaste građe naslijeđenih prethodnim postupkom obrade legure za vrijeme njene proizvodnje u pogonskim uslovima. Racionalno je objašnjenje da je pretpostavljena temperatura od 400°C do 480°C razvijena oko trna alata bila dovoljno visoka da se rastvore veći talozi i da se obnove tokom hlađenja, što je u skladu sa rezultatima istraživanja [266].

Analiza rezultata mjerenja tvrdoće poprečnog presjeka MŠ i OM u svim tačkama eksperimentera, bez obzira na korišćeni tip alata, pokazala je da je u zoni na liniji 1 ispod čela alata duž MŠ, od strane napredovanja prema povratnoj strani, njen profil prilično ravnomjeran i bez značajnijih odstupanja u izmjerenim vrijednostima HV1. Ovakva tvrdnja važi i za liniju 3 koja je normalna na ravan zavarivanja u centru MŠ-kroz “grumen” zonu u kojoj dolazi do rastvaranja taloga, ali ne i za ravan po liniji 2 u podnožju MŠ bliskoj korjenu zavara. Profil tvrdoće u obliku slova “W” u ZTMU na strani bližoj čelu alata, upućuje na komentar da je upravo u ovom regionu zavarenog spoja dolazilo do superplastične deformacije kojom se oslobađala dovoljna količina energije za inicijalno stvaranje dinamičke rekristalizacije, što je u saglasju sa istraživanjima publikovanim u radovima [267, 268]. U tom području zavarenog spoja na maloj udaljenosti od direktnog izvora toplote, moguće je minimiziranje efekata statičkog rasta kristala i stvaranje velikih količina ultrafinih zrna. To

5.0 DISKUSIJA

pokazuje i komparacija osrednjenih vrijednosti tvrdoće kod uzoraka zavarenih sa različitim tipovima alata, pri kojoj je vidljivo da su gotovo izjednačene vrijednosti tvrdoće kod eksperimentalnih tačaka zavarenih sa alatom tip A i tip B na strani napredovanja i na povratnoj strani u MŠ u zoni “grumena”, preostalom dijelu ZTMU i ZUT (od 180 HV1 do čak 120 HV1), dok kod eksperimentalnih tačaka zavarenih sa alatima tip C i tip D postoji izvjestan blagi porast tvrdoće u zoni “grumena” i na povratnoj strani MŠ (od 160 HV1 do 175 HV1). U podnožju MŠ u svim tačkama eksperimenta evidentan je lokalni porast tvrdoće na prelazu “grumen”zone kroz ZTMU, a potom pad tvrdoće prema ZUT. Ovo se tumači različitim procesima sazrijevanja kroz koje je materijal prolazio dok se nalazio na udaljenostima od +12,5 mm i -12,5 mm od centra alata posmatrano u smjeru kretanja kazaljke na časovniku koja se smatraju granicom geometrijske podijeljenosti ZTMU i ZUT.

Dokazana je HIPOTEZA 2.

U Prilogu 1 uporednim pregledom moguće je ostvariti uvid u promjenu intenziteta sile zavarivanja, njene dinamičke komponente i raspodjelu tvrdoće u svim eksperimentalno zavarenim uzorcima.

Stavljanje u kontekst odnosa vrijednosti zatezne čvrstoće R_m OM i R_m MŠ tokom statičkog ispitivanja jednoosnim zatezanjem u pravcu normalnom na pravac zavarivanja, utvrđena je zatezna efikasnost spoja kao procentualni odnos zatezne čvrstoće $R_{m_{MŠ}}$ i zatezne čvrstoće $R_{m_{OM}}$. Ovo je mjera uspješnosti i kvaliteta spoja. Sa stanovišta korišćenih alata najveću vrijednost $\varepsilon_{MŠ/OM}$ imaju eksperimentalne tačke ET 05 u iznosu 75,41% (ugao savijanja do pojave prsline 35°) i ET 07 od 74,78% (ugao savijanja do pojave prsline 20°), zavarene sa alatom tip B, ET 03 u iznosu 74,72% (ugao savijanja do pojave prsline 3°) zavarenoj sa alatom tip A i ET 12 od 72,58 % (ugao savijanja do pojave prsline 17°) zavarenoj sa alatom tip C. Uočene razlike tumače se različitošću velikog broja utucaja na veličinu i oblik zrna prije svih termalnim ciklusom tokom zavarivanja iz razloga što dinamički rekristalizovani zrna statički rastu tokom hlađenja. U pomenutim eksperimentalnim tačkama različite su vrijednosti varijacija broja obrtaja alata i brzine zavarivanja. Od eksperimentalnih tačaka zavarenih sa alatom tip D najveća zatezna efikasnost spoja je u tački ET 14 i iznosi 65,6% (ugao savijanja do pojave prsline 27°). Lokacije preloma kod statičkog opterećenja zatezanjem evidentirana je u ZTMU na liniji prelaska “grumen” zone prema najbližim susjednim strukturama prema povratnoj strani MŠ, što u najvećoj mjeri odgovara profilu raspodjele tvrdoće po poprečnom presjeku. Kod ostalih tačaka eksperimenta nijesu dostignute ovako visoke vrijednosti zatezne efikasnosti zavarenog spoja. Postavljenom polaznom hipotezom očekivano je da je moguće ZTM legure EN AW 7049A u stanju T652 ostvariti efikasnost zavarenog spoja na nivou rezultata koji se postižu u zavarenim spojevima topljenjem zavarljivih legura faznog sastava Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Si [269]. Potvrdom ove hipoteze ostvaren je najveći naučni i stručni doprinos cjelokupnog rada i istraživanja.

Dokazana je HIPOTEZA 3.

Pregled statičkih karakteristika OM i MŠ sa zateznom efikasnošću zavarenog spoja, uglu savijanja oko lica MŠ i mjestom loma epruveta dat je u Prilogu 2.

5.0 DISKUSIJA

Rezultati ispitivanja savijanjem udarnim dejstvom sile (određivanje udarne žilavosti KV i ukupne energije udara Eu), kao i odnosa između energije potrebne za inicijaciju prsline Ei i njenu propagaciju Ep u osnovnom materijalu, kao i u zoni “grumena” na rastojanjima 4 mm i 8 mm od centra alata na strani napredovanja i na povratnoj strani MŠ kod zavarenih epruveta, pokazuju značajne razlike u korist zavarenih spojeva. Mnogo je povoljniji odnos energija Ei i Ep kod zavarenih epruveta nego kod epruveta iz OM. Na primjer, Ep kod OM je oko tri puta veća nego Ei , dok kod zavarenih spojeva taj odnos doseže i do četiri puta (ET 16 na povratnoj strani). Najmanje prosječne vrijednosti KV su u “grumen” zoni MŠ u kojoj je vrijednost $KV = 4,88 \text{ J/cm}^2$, potom na strani napredovanja $KV = 5,97 \text{ J/cm}^2$ i na kraju najveća je na povratnoj strani $KV = 6,32 \text{ J/cm}^2$. Najveća udarna žilavost KV je u ET 11 zavarenoj sa alatom tip C, kod odnosa $n_{alata} / v_{zav} = 9,37$ i iznosi $KV = 8,68 \text{ J/cm}^2$ na strani napredovanja, odnosno $KV = 7,17 \text{ J/cm}^2$ u “grumen” zoni MŠ kod odnosa kinematskih parametara $n_{alata} / v_{zav} = 10,62$. Najmanja vrijednost udarne žilavosti KV je u eksperimentalnoj tački ET 01 i ima vrijednost od $4,21 \text{ J/cm}^2$ pri $n = 850 \text{ min}^{-1}$ i $v = 80 \text{ mm/min}$. Ispitivanjem odnosa *sila-vrijeme* moguće je odrediti da li je lom posledica djelovanja sile većeg intenziteta u kratkom vremenu ili male sile u dužem vremenskom trajanju. Ovako neočekivana disperzija rezultata u različitim strukturnim sadržajima zavarenih spojeva u odnosu na OM prisutna je kod određivanja ukupne energije udara Eu kod zavarenih spojeva, bez obzira što je pozitivno za konstruktivnu strukturu da je u pojedinim tačkama eksperimenta energija potrebna za širenje prsline Ep preko četiri puta veća od energije potrebne da se prsline inicira Ei . Najočiglednije su ET 4-ZG kod koga su $Ei = 0,33 \text{ J}$ i $Ep = 1,39 \text{ J}$, odnosno ET 08 na 4 mm na SN kod koga je $Ei = 0,33 \text{ J}$ i $Ep = 1,54 \text{ J}$. Ukupna energija udara Eu ima najmanju vrijednost od svega 1,06 J u “grumen” zoni MŠ u ET 01 zavarenoj sa alatom tip A, a najveću u ET 11, zavarenoj sa alatom tip C, na udaljenosti 8 mm od centra MŠ na strani napredovanja i iznosi 3,93 J. Najveću ukupnu udarnu energiju $Eu = 2,64 \text{ J}$ u centru MŠ-zoni “grumena” ima ET 14 zavarena sa alatom tip D. U svim tačkama eksperimenta udarna žilavost veća je na povratnoj strani i na strani napredovanja, od udarne žilavosti u jezgru MŠ-zoni “grumena. Nehomogen profil udarne žilavosti u ZTMU posledica je razvoja mikrostrukture zavisne od udaljenosti od centra MŠ.

Na sličan način mogu se tretirati i rezultati eksperimentalnog istraživanja parametara elasto-plastične mehanike loma do kojih se došlo ispitivanjem SENB epruveta uzetih iz svih 16 eksperimentalnih tačaka njihovim sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno popustljivošću prema standardu *ASTM E 1820-15a*. Žilavost loma K_{Jc} kao svojstvo zavarenog spoja i materijala uopšte, najbolje određuje njegovu otpornost da se suprostavi nestabilnom rastu prsline. Interesantno je da je OM manje otporan na lom izazvan zamorom od bilo kog konstituenta zavarenog spoja u svim tačkama eksperimenta. U njima su oštrom zamornom prsline izložene “grumen” zona, strana napredovanja i povratna strana MŠ. Dobijeni rezultati nedvosmisleno pokazuju da su značajno povećane otpornosti prema širenju prsline i lomu rezultat metalurških procesa koji se intenzivnije odvijaju na povratnoj strani metala zavara nego u drugim oblastima zavarenog spoja. Pojava “višekratnog” miješanja materijala na povratnoj strani primarno je odredilo otpor prema nestabilnom širenju prsline, odnosno njen stabilniji rast prije nastanka loma epruveta, iako se ne mogu zanemariti pojedinačne greške u fazi proizvodnje zabilježene u strukturi OM [270].

5.0 DISKUSIJA

Ovo je naročito izraženo kod eksperimentalnih uzoraka sa brojem obrtaja $n = 850 \text{ min}^{-1}$ i sa većim uticajem brzine zavarivanja $v = 80 \text{ mm/min}$, ali sa većom dužinom trna $h = 5,4 \text{ mm}$ i većim uglom konusa trna 10° prosječne vrijednosti žilavosti loma K_{JIC} za oko 5% do 8% veće nego kod alata sa manjom dužinom trna i manjim uglom konusa trna alata. Činjenica da je najmanja žilavost loma zavarenog spoja, iako u centru MŠ, veća od žilavosti loma OM fenomenološkog je karaktera i prirode.

U Prilogu 3 prikazane su vrijednosti udarne žilavosti KV , ukupne energije udara E_u , energije potrebne za inicijaciju prsline E_i , energije koja se utroši na njenoj propagaciji E_p i žilavosti loma K_{JIC} OM i različitih oblasti MŠ i OM u cilju bolje preglednosti dobijenih rezultata.

Jedino racionalno objašnjenje jeste da se zapravo zona kuda se kombinovano kretao alat procesirala tenjem miješanjem (*FSP-Friction Stir Processing*), koje je poslednjih desetak godina prepoznato kao generički alat za mikrostrukturnu modifikaciju zasnovanu na *ZTM*. Tehnikom *FSP* postižu se visoka svojstva superplastičnosti u legurama iz serije EN AW 7xxx, oplemenjavanje površina livenih aluminijumskih legura i mikrostrukturna modifikacija kompozitnih materijala sa metalnom matricom. Suština ovog postupka poboljšanja mehaničkih osobina zasniva se na termomehaničkom procesiranju strukture upotrebom alata za *ZTM* sa znatno manjom dužinom trna i većim prečnikom čela alata.

U konkretnim slučajevima, riječ je o mikrostrukturnim transformacijama koje se bitno razlikuju ne samo od pojedinačnog uticaja oba kinematska parametra procesa, već na osnovu položaja zamorne prsline u odnosu na centar ose alata, budući da na povranoj strani (usled lijeve zavojnice alata) dolazi do potiskivanja materijala prema korjenu MŠ, a time intenzivnijeg miješanja materijala. To je zapravo rezultat promjenjivog odnosa položaja primarne i sekundarne komponente faze tečenja materijala po granicama zrna, odnosno vrtloženja materijala tokom cijelog tajanja procesa zavarivanja. **Dokazana je HIPOTEZA 4.**

Uporednom analizom mikrofraktografika površine preloma nastalog nakon udara savojnim opterećenjem, dobijenih skenirajućom elektronskom mikroskopijom sa energetsko-disperzivnim detektorom X-zraka (SEM/EDS), u *ZTMU* i pri različitim tipovima alata sa varijabilnim odnosom kinematskih parametara ($n_{alata}/v_{zav} = 9,3 - 14,1$), jasno se uočava da u zoni "grumena" kod tri od četiri eksperimentalne tačke (ET 01, ET 06, i ET 16), dominira duktilni lom sa elementima manje ili više izraženom plastičnom deformacijom. Na većim udaljenostima od centra MŠ, odnosno u *ZTMU* na strani napredovanja i na povratnoj strani, raspoznaju se lomovi nastali mehanizmom cijepanja sa prisustvom oksida na 4 mm od centra MŠ, odnosno krtog loma na 8 mm od centra MŠ, kao i prsline sa intermetalnim sekundarnim fazama tipa AlMgZnSi, AlFeZn ili samo AlZn nataloženim na uključcima MgO potvrđenih EDS dijagramima. Kako nije izvršena SEM/EDS analiza poslije preloma OM nije moguće uspostaviti paralelnu sliku frakturne morfologije, već samo komentarisati da se na manjim povećanjima može sagledati morfologija MŠ a na većim povećanjima karakteristike na malom nivou na kome se pokazuje konzistentnost sa lokalnim mehanizmom prsline [271]. **Dokazana je HIPOTEZA 5.**

5.0 DISKUSIJA

Prilog 1

Broj eksper. tačke	Parametri zavarivanja				Zatezna čvrstoća OM, Rm_{OM} [MPa]	Zatezna čvrstoća MŠ, $Rm_{MŠ}$ [MPa]	Zatezna efikasnost spoja, ε [%]	Ugao savijanja do pojave prsline MŠ, [°]	Lokacija prsline, MŠ
	n [min ⁻¹]	v [mm/min]	h [mm]	α [°]					
ET 01	850	80	5,1	10	643	331	58	3	ZG/ZTMU,PS
ET 02	750	60	5,1	10	643	287	69	11	ZG/ZTMU,PS
ET 03	750	80	5,1	10	643	355	75	5	ZG/ZTMU,PS
ET 04	850	60	5,1	10	643	343	65	6	ZG/ZTMU,PS
ET 05	850	80	5,4	10	643	359	76	35	ZG/ZTMU,PS
ET 06	750	60	5,4	10	643	284	51	2	ZG/ZTMU,PS
ET 07	750	80	5,4	10	643	361	75	20	ZG/ZTMU,PS
ET 08	850	60	5,4	10	643	318	61	20	ZG/ZTMU,PS
ET 09	850	80	5,1	2,5	643	325	56	6	ZG/ZTMU,PS
ET 10	750	60	5,1	2,5	643	292	45	15	ZG/ZTMU,PS
ET 11	750	80	5,1	2,5	643	324	51	13	ZG/ZTMU,PS
ET 12	850	60	5,1	2,5	643	330	63	17	ZG/ZTMU,PS
ET 13	850	80	5,4	2,5	643	334	73	2	ZG/ZTMU,PS
ET 14	750	60	5,4	2,5	643	338	65	27	ZG/ZTMU,PS
ET 15	750	80	5,4	2,5	643	296	57	16	ZG/ZTMU,PS
ET 16	850	60	5,4	2,5	643	370	56	13	ZG/ZTMU,PS

Legenda: Oznaka ZG/ZTMU/PS odnosi se na lokaciju prsline u ZG prema ZTMU na povratnoj strani MŠ

5.0 DISKUSIJA

Prilog 2

Eksper. tačka	Mjesto u MŠ	Parametri zavarivanja				Sila zavarivanja F_z , [kN]	Dinamička komponenta sile zavarivanja F_{zd} , [kN]	Tvrdoća, [HV1]		
		n [min ⁻¹]	v [mm/min]	h [mm]	α [°]			Linija 1	Linija 2	Linija 3
ET 01	SN	850	80	5,1	10	17,5	0,19	164,6	158,8	160,8
	MŠ-ZG	850	80	5,1	10	17,5	0,19	171,4	155,2	162,2
	PS	850	80	5,1	10	17,5	0,19	165,8	157,5	161,4
ET 02	SN	750	60	5,1	10	23,1	0,16	160,3	154,2	151,2
	MŠ-ZG	750	60	5,1	10	23,1	0,16	159,6	152,2	150,1
	PS	750	60	5,1	10	23,1	0,16	163,4	150,8	150,3
ET 03	SN	750	80	5,1	10	17,3	0,27	161,6	151,3	146,8
	MŠ-ZG	750	80	5,1	10	17,3	0,27	158,9	157,6	147,6
	PS	750	80	5,1	10	17,3	0,27	157,2	158,4	151,5
ET 04	SN	850	60	5,1	10	25,1	0,40	156,9	150,1	148,6
	MŠ-ZG	850	60	5,1	10	25,1	0,40	157,2	156,3	156,4
	PS	850	60	5,1	10	25,1	0,40	159,1	158,2	157,2
ET 05	SN	850	80	5,4	10	25,0	0,50	173,1	161,2	161,4
	MŠ-ZG	850	80	5,4	10	25,0	0,50	170,2	157,3	162,1
	PS	850	80	5,4	10	25,0	0,50	168,4	155,1	158,2
ET 06	SN	750	60	5,4	10	16,8	0,37	164,1	158,9	162,1
	MŠ-ZG	750	60	5,4	10	16,8	0,37	165,3	160,4	161,9
	PS	750	60	5,4	10	16,8	0,37	162,2	160,9	160,3
ET 07	SN	750	80	5,4	10	16,2	0,30	159,9	158,5	154,9
	MŠ-ZG	750	80	5,4	10	16,2	0,30	158,9	154,7	153,1
	PS	750	80	5,4	10	16,2	0,30	160,3	155,1	155,8
ET 08	SN	850	60	5,4	10	15,6	0,25	151,8	157,2	155,9
	MŠ-ZG	850	60	5,4	10	15,6	0,25	154,2	159,2	157,8
	PS	850	60	5,4	10	15,6	0,25	159,2	158,1	156,6

5.0 DISKUSIJA

ET 09	SN	850	80	5,1	2,5	17,8	0,32	158,2	142,1	144,4
	MŠ-ZG	850	80	5,1	2,5	17,8	0,32	157,9	144,3	150,2
	PS	850	80	5,1	2,5	17,8	0,32	155,2	143,6	151,5
ET 10	SN	750	60	5,1	2,5	15,8	0,19	156,2	146,2	146,6
	MŠ-ZG	750	60	5,1	2,5	15,8	0,19	158,2	148,1	145,6
	PS	750	60	5,1	2,5	15,8	0,19	157,8	147,1	146,7
ET 11	SN	750	80	5,1	2,5	15,2	0,21	156,9	146,9	145,2
	MŠ-ZG	750	80	5,1	2,5	15,2	0,21	157,8	159,6	146,9
	PS	750	80	5,1	2,5	15,2	0,21	164,1	158,7	148,6
ET 12	SN	850	60	5,1	2,5	27,6	0,22	161,2	160,3	155,5
	MŠ-ZG	850	60	5,1	2,5	27,6	0,22	162,1	162,1	156,5
	PS	850	60	5,1	2,5	27,6	0,22	160,1	164,1	155,8
ET 13	SN	850	80	5,4	2,5	22,7	0,42	163,3	164,2	162,2
	MŠ-ZG	850	80	5,4	2,5	22,7	0,42	162,8	163,2	161,8
	PS	850	80	5,4	2,5	22,7	0,42	161,9	160,1	160,7
ET 14	SN	750	60	5,4	2,5	23,9	0,44	147,8	149,5	157,8
	MŠ-ZG	750	60	5,4	2,5	23,9	0,44	146,7	136,6	156,9
	PS	750	60	5,4	2,5	23,9	0,44	145,6	138,5	157,7
ET 15	SN	750	80	5,4	2,5	22,8	0,36	144,5	141,1	158,8
	MŠ-ZG	750	80	5,4	2,5	22,8	0,36	143,1	140,1	156,9
	PS	750	80	5,4	2,5	22,8	0,36	141,8	139,2	150,1
ET 16	SN	850	60	5,4	2,5	24,6	0,41	144,9	138,1	156,2
	MŠ-ZG	850	60	5,4	2,5	24,6	0,41	143,4	139,7	157,9
	PS	850	60	5,4	2,5	24,6	0,41	142,1	140,1	158,7

Legenda: SN – strana napredovanja adekvatna istosmjernoj strani, ZG – zona “grumena”, PS – povratna strana adekvatna suprotnosmjernoj strani

5.0 DISKUSIJA

Prilog 3

Mjesto loma na eksper. tački		Parametri zavarivanja				Udarna žilavost KV , [J/cm ²]	Energija udara E_u , [J]	Energija inicijacije prsline E_i , [J]	Energija propagacije prsline E_p , [J]	Žilavost loma K_{JIC} , [N/m ^{3/2}]
		n [min ⁻¹]	v [mm/min]	h [mm]	α [°]					
ET 01	SN (8)	850	80	5,1	10	8,06	2,97	1,15	1,82	36
	SN (4)					5,24	1,93	0,58	1,35	
	ZG					4,21	1,55	0,51	1,04	32
	PS (4)					6,72	2,47	0,6	1,97	
	PS (8)					7,91	2,91	0,97	1,94	38
ET 02	SN (8)	750	60	5,1	10	7,46	2,75	0,87	1,88	33
	SN (4)					5,98	2,20	0,60	1,60	
	ZG					5,38	1,98	0,54	1,45	33
	PS (4)					5,92	1,96	0	1,96	
	PS (8)					6,88	2,08	0,84	1,24	36
ET 03	SN (8)	750	80	5,1	10	6,66	2,36	0,88	1,48	36
	SN (4)					5,26	1,91	0,37	1,54	
	ZG					5,09	1,87	0,55	1,33	29
	PS (4)					5,83	2,14	0,66	1,49	
	PS (8)					6,1	2,26	0,76	1,50	38
ET 04	SN (8)	850	60	5,1	10	7,96	2,64	1,24	1,40	32
	SN (4)					6,12	2,25	0,47	1,79	
	ZG					4,65	1,71	0,32	1,39	39
	PS (4)					5,88	2,18	0,48	1,80	
	PS (8)					7,32	2,69	0,96	1,73	35

5.0 DISKUSIJA

ET 05	SN (8)	850	80	5,4	10	6,36	2,48	0,78	1,70	37
	SN (4)					4,18	1,39	0,38	1,01	
	ZG					4,06	1,49	0,34	1,16	32
	PS (4)					4,79	1,76	0,54	1,23	
	PS (8)					8,21	3,02	0,92	2,10	41
ET 06	SN (8)	850	60	5,4	10	6,57	2,42	0,83	1,59	40
	SN (4)					5,53	2,04	0,44	1,59	
	ZG					5,38	1,98	0,54	1,45	28
	PS (4)					4,21	1,55	0,41	1,14	
	PS (8)					6,92	2,97	0,85	2,12	41
ET 07	SN (8)	750	80	5,4	10	6,42	2,36	0,57	1,80	37
	SN (4)					5,64	2,06	0,55	1,51	
	ZG					5,53	2,04	0,45	1,58	35
	PS (4)					5,24	1,93	0,52	1,41	
	PS (8)					7,74	2,85	0,82	2,03	39
ET 08	SN (8)	850	60	5,4	10	5,60	2,12	0,48	1,74	32
	SN (4)					5,09	1,87	0,33	1,54	
	ZG					4,5	1,66	0,32	1,33	35
	PS (4)					5,68	2,09	0,68	1,41	
	PS (8)					6,38	2,31	0,71	1,6	41

5.0 DISKUSIJA

ET 09	SN (8)	850	80	5,1	2,5	8,21	3,02	1,19	1,83	36
	SN (4)					5,68	2,09	0,5	1,59	
	ZG					4,65	1,71	0,45	1,26	28
	PS (4)					5,09	1,87	0,47	1,41	
	PS (8)					6,82	2,58	0,89	1,69	40
ET 10	SN (8)	750	60	5,1	2,5	6,42	2,36	0,77	1,59	37
	SN (4)					4,35	1,60	0,45	1,15	
	ZG					5,38	1,98	0,42	1,56	29
	PS (4)					5,16	2,14	0,68	1,96	
	PS (8)					5,42	2,25	0,56	1,70	34
ET 11	SN (8)	750	80	5,1	2,5	10,64	3,92	1,14	2,77	38
	SN (4)					6,72	2,47	0,6	1,87	
	ZG					5,24	1,93	0,46	1,46	32
	PS (4)					6,44	2,73	0,86	1,87	
	PS (8)					6,95	2,58	0,71	1,88	39
ET 12	SN (8)	850	60	5,1	2,5	6,72	2,47	0,61	1,86	31
	SN (4)					5,98	2,20	0,53	1,67	
	ZG					4,79	1,76	0,54	1,23	34
	PS (4)					4,68	1,94	0,86	1,08	
	PS (8)					6,18	2,36	0,76	1,60	36

5.0 DISKUSIJA

ET 13	SN (8)	850	80	5,4	2,5	8,97	3,3	0,95	2,35	36
	SN (4)					5,29	1,96	0,59	1,77	
	ZG					5,83	2,14	0,49	1,65	37
	PS (4)					6,36	2,56	0,74	1,72	
	PS (8)					6,62	2,25	0,79	1,46	43
ET 14	SN (8)	750	60	5,4	2,5	4,92	1,88	0,86	1,02	36
	SN (4)					4,79	1,76	0,46	1,31	
	ZG					7,17	2,64	1,04	1,6	31
	PS (4)					6,42	2,36	1,12	1,24	
	PS (8)					7,12	2,53	0,91	1,62	36
ET 15	SN (8)	750	80	5,4	2,5	7,02	1,58	0,61	1,97	31
	SN (4)					5,68	2,09	0,54	1,55	
	ZG					5,38	1,98	0,43	1,55	36
	PS (4)					5,24	1,93	0,52	1,41	
	PS (8)					7,32	2,18	0,82	1,26	36
ET 16	SN (8)	850	60	5,4	2,5	7,91	2,91	0,96	1,95	34
	SN (4)					5,88	2,12	0,54	1,58	
	ZG					4,94	1,82	0,44	1,38	32
	PS (4)					5,83	2,14	0,52	1,63	
	PS (8)					4,94	1,82	0,44	1,38	38

Legenda: SN – strana napredovanja adekvatna istosmjernoj strani, ZG – zona “grumena”, PS – povratna strana adekvatna suprotnosmjernoj strani

6.0 ZAKLJUČCI

Postignut je prvi osnovni cilj eksperimentalnih istraživanja započetih sa idejom da se ZTM uspješno zavari topljenjem nezavarljiva legura aluminijuma EN AW 7049A T652. Dostignut je i drugi osnovni cilj istraživanja, to jest da tako ostvaren zavareni spoj posjeduje zateznu efikasnost od 70% do 80% , koliko iznosi efikasnost topljenjem formiranog zavarenog spoja aluminijuma ili neke od njegovih lako zavarljivih legura.

Na bazi polaznih teorijskih razmatranja, očekivanog prethodno saopštenog naučnog doprinosa disertacije, preliminarno izvršenih ZTM uzoraka hladnovaljanih limova i ekstrudiranih profila mekših legura (EN AW 5086, EN AW 6082 T6), kao i uvidom u rezultate preliminarnih istraživanja zavarljivosti ZTM legura od toplovaljanih ploča povišene čvrstoće (EN AW 2024 T351), posebno probnih i glavnih eksperimentalnih zavarivanja otkovaka od legure aluminijuma visoke čvrstoće EN AW 7049A T652, uprkos brojnim ograničenjima u pogledu obimnosti akademskih radova ovog nivoa, moguće je izvesti uopštene zaključke na makro i specifične zaključke na mikro nivou.

Od uopštenih zaključaka na makro nivou izdvajaju se:

I. ZTM predstavlja krajnje zahtjevan nelinearan proces spajanja materijala čiji je rezultat spoj koji je uzročno-posledično zavisao od prirode i dejstva velikog broja međusobno uslovljenih parametara procesa (u prvom redu, odnosa parametara postupka, zatim fizičko–hemijskih osobina materijala koji se spajaju i na kraju, ali ne i manje važno, od karakteristika materijala alata kojima se vrši spajanje),

II. Aktivni (podešavajući) kinematski parametri postupka, determinisani i kontrolisani proizvodnim mogućnostima i ograničenjima adaptirane CNC glodalice ili specijalne mašine za ZTM, preko ugaone brzine alata (broja obrtaja alata) odnosno vretena glavnog pogona i brzine zavarivanja (brzine posmaka radnog stola mašine), utiču na kvalitet i svojstva zavarenih spojeva,

III. Aktivni (odabirajući) geometrijski parametri alata, definisani izborom odnosa dimenzija prečnika čela i trna alata, oblikom čela i trna alata, visinom trna alata i dubinom penetracije alata, odrćavaju se na mehaničko-tribološke i termodinamičke odzive alata, karakteristiku viskoplastičnog tečenja materijala i razvoj mikrostrukture u svim strukturnim sadržajima zavarenog spoja,

IV. Reaktivni (odzivajući) parametri procesa zavarivanja neposredno proističu iz međusobnog odnosa obje vrste aktivnih parametara i rezultat su njihove individualne i grupne korelacije čiji se rang uticaja na kvalitet zavarenog spoja može odrediti analitičkim i numeričkim putem, matematičkim modeliranjem i simulacijama, što bi predstavljalo osnovu za kreiranje tehnološkog procesora sa bazom za upravljanje parametrima postupka čijom se kombinacijom dobija visok kvalitet zavarenih spojeva,

V. Optimizacija parametara zavarivanja omogućila bi da programska aplikacija predvidi nivo ulaznih faktora postupka posredstvom kojih se dostiže zatezna efikasnost spoja znatno više od 80%.

6.0 ZAKLJUČCI

Iz pomenutih generalizovanih makro zaključaka, pažljivom analizom dobijenih eksperimentalnih rezultata prezentovanih u prethodnim eksperimentalnim potpoglavljima i poređenjem sa oskudnim literaturnim izvorima iz domena mehanike loma zavarenih spojeva visokočvrstih aluminijumskih legura serije EN AW 7xxx, izvode se sledeći konkretni zaključci na mikro nivou:

1. Povećanjem brzine obrtanja alata pri konstantnoj brzini zavarivanja, sila zavarivanja F_z je manja i njena najveća vrijednost postigne se ranije iz razloga što se materijal oko alata brže zagrijava usled čega opada njegov otpor deformisanju.
2. Iz istih razloga u početnoj fazi manje su dinamička komponenta sile zavarivanja F_{zd} i frekvencija alata u Z-pravcu, dok u bočnom pravcu vibracijska ubzanja alata na niskim i visokim frekvencijama ne pokazuju velike promjene.
3. Trajanjem II ciklusa odnosno zavarivanja povećava se intenzitet dinamičke komponente sile zavarivanja F_{zd} , što se objašnjava uglom ose alata koja je nagnuta u suprotnom smjeru od smjera zavarivanja, usled čega se javlja efekat mikrokovanja od zadnje ivice alata prema oplati radnih komada koju čine stezna ploča i podmetač ispod uzoraka.
4. Najveće brzine klizanja pojavljaju u obodnom regionu kontakta čela alata i materijala u fazi prodiranja iz razloga uske zone predgrijanosti materijala legure u smjeru zavarivanja.
5. Plastične deformacije najveće su kada aktivna površina čela alata ostvari potpuni kontakt sa zavarivanim materijalom u fazi prodiranja alata (počertak II faze), usled čega nastane nagli skok intenziteta sile zavarivanja F_z kao i njene dinamičke komponente F_{zd} .
6. Povećanjem broja obrtaja alata dolazi do povećanja generisane količine toplote nastale trenjem, dok je za manje brojeve obrtaja alata manja i generisana toplota zbog manjih otpora koji potiču od plastičnih deformacija.
7. Nakon faze prodiranja alata sila zavarivanja F_z naglo opada, a profil distribucije toplote, determinisan simetričnošću u odnosu na Z-aksijalnu osu alata, poprima koncentrične krugove.
8. Njihova geometrijska forma ne mijenja oblik, a razilka u početnim temperaturama rezultat je ostatka količine toplote zaostale na oplati (steznoj ploči i podmetaču) uzoraka od zavarivanja prethodnog eksperimentalnog uzorka.
9. Tokom faze zavarivanja dolazi do stabilizacije procesa i pojave samoregulišućeg fenomena generisanja toplote proizvedene trenjem, manji je otpor prodiranju alata, a vibracije alata u sva tri međusobno upravna pravca ne pokazuju odstupanja do kraja procesa zavarivanja na niskim i visokim frekvencijama.
10. Temperaturna polja simetrično su raspoređena u odnosu na liniju spoja pri svakoj od mogućih kombinacija odnosa broja obrtaja alata i brzine zavarivanja n_{alata} / v_{zav} , nezavisno od tipova izabranih alata (A, B, C, D i E) definisanih plan matricom četvorofaktornog eksperimenta.

6.0 ZAKLJUČCI

11. Temperatura ispod samog čela alata dostignuta na kraju prodiranja alata (II faza) bez većih je promjena do kraja procesa zavarivanja (II ciklusa) i za oko 100°C veća je od temperature po obodu alata T_z izvan zone zavarivanja na zavarivanim uzorcima.
12. Odnos između temperatura smatra se rezultatom uspostavljene toplotne ravnoteže i energetskog bilansa od dvojakog generisanja toplote (plastična deformacija od alata i trenje od kontakta alata sa radnim komadima) i njenog odvođenja preko stezne ploče i podmetača, to jest oplate.
13. Promjena odnosa kinematskih parametara ($n_{alata} / v_{zav} = 9,37 - 14,16$) znatno više utiče na toplotni gradijent izvan aksijalne ose alata, odnosno bliže periferiji čela alata nego u centru alata.
14. Kod ciklusa zavarivanja, na prednjoj ivici čela alata gdje se potiskuje predgrijani materijal u smjeru zavarivanja, temperature su manjih vrijednosti od temperatura na prednjoj ravnajućoj i zadnjoj nalijegajućoj ivici alata.
15. Zavojnica sa lijevom orijentacijom na trnu alata, posmatrano u smjeru kretanja kazaljki na časovniku, obezbjeđuje da se materijal potiskuje prema korjenu u naličju MŠ, dok čelo alata sprečava njegovo napuštanje zone zavarivanja.
16. Brzina protoka materijala veća je na povratnoj strani nego na strani napredovanja zbog čega je veća i brzina kretanja materijala ispod čela alata nego ispod njegovog trna.
17. Nakon što i nedovoljno zagrijan materijal tokom trajanja ciklusa zavarivanja prođe put od primarnog preko sekundarnog do kombinovanog (vrtložnog) kretanja oko trna i ispod čela alata, dolazi do smanjenja intenziteta sile zavarivanja F_z u prvih nekoliko sekundi trajanja ciklusa zavarivanja.
18. Povećanje broja obrtaja alata n_{alata} uz zadržavanje brzine zavarivanja v_{zav} na konstantnom nivou prouzrokuje smanjenje ekvivalentnih plastičnih deformacija u zoni zavarivanja, dok povećana brzina zavarivanja pri nepromijenjenom broju obrtaja alata povećava polje plastičnosti na korjenoj strani MŠ.
19. Nesimetričnosti ekvivalentnih plastičnih polja deformacija očiglednija su na strani napredovanja i mnogo su više izražena nego na povratnoj strani MŠ, što je očigledno na makrograficima u svim tačkama eksperimenta kod primjene bilo kog od različitih tipova alata (A, B, C, D i E).
20. Makrografici poprečnih presjeka svih zavarenih spojeva diferenciraju postojanje geometrijski specifičnih strukturnih sadržaja zavarenog spoja-jezgra jajolikog izgleda u centru MŠ (zoni “grumena”), neznatno većih dimenzija u oba pravca od prečnika trna alata nastalu spiralnim kretanjem materijala, ZTMU sa jedne strane ograničenom prečnikom korišćenog alata, a sa druge strane blago nagnutom ravni prema korjenu MŠ i ZUT, značajno manjih dimenzija neposredno uz ZTMU prema OM uzoraka.

6.0 ZAKLJUČCI

21. Jezgro MŠ, locirano u ZTMU, karakteriše rukavac orjentisan prema vrhu ploča na strani na kojoj su se poklapali vektori brzine zavarivanja i brzine rotacije alata, odnosno na strani napredovanja i bez pojavnih znaka postojanja na povratnoj strani MŠ.
22. Tragovi tečenja u prelaznim zonama između strukturnih sadžaja zavarenog spoja, uočeni na makroizbruscima, upućuju na smjer i tok kretanja materijala, to jest na karakter transfera materijala koji najviše zavisi od količine unijete energije odnosno režima zavarivanja.
23. Dimenzije jezgra MŠ (zona “grumena”) povećava se sa količinom unijete energije, to jest kada se smanjuje brzina zavarivanja a povećava broj obrtaja alata, odnosno kada je $n = 850 \text{ min}^{-1}$ i $v = 60 \text{ mm/min}$, respektivno $n_{alata}/v_{zav} = 14,1$.
24. Zona “grumena” najmanja je kada se smanji broj obrtaja alata na $n = 750 \text{ min}^{-1}$ i poveća brzina zavarivanja na $v = 80 \text{ mm/min}$, respektivno $n_{alata}/v_{zav} = 9,375$.
25. U konkretnim slučajevima, razlika u dimenzijama jezgra MŠ (zone “grumena”) zavisi od odnosa količnika n_{alata}/v_{zav} , jer se za količnik viši od 10 povećava, a za količnik manji od 10 smanjuje, odnosno manja brzina zavarivanja uzrokuje povećanje količine unijete toplote, to jest dovodi do rasta temperature.
26. Stanje režima zavarivanja pogoduje uslovima za pojavu dinamičke rekristalizacije tokom trajanja plastičnih deformacija ili statičke rekristalizacije nakon konsolidacije-hlađenja zavarenog spoja.
27. Jezgro MŠ (zona “grumena”) nema uniformno (jednoobrazno) sitno zrno po cijelom popečnom presjeku, već je uočljivije pri vrhu MŠ (neposredno ispod čela alata) mnogo više nego prema korjenoj strani, što je posledica različitog uticaja toplote određene njenim gradijentom.
28. Okolina izvan jezgra MŠ (zone “grumena”), iako strukturno pripada ZTMU, rezistentna je na promjenu režima zavarivanja, budući da ne postoji realno dokaziva osnova za drugačiju tvrdnju.
29. Mikrostrukturalna analiza, naročito fraktografska, pokazala je da je prisustvo ekviosnih i ravnoosnih sitnijih zrna u ZTMU (pogotovo u njenom jezgru), relevantan pokazatelj najviše izloženosti uticaju djelovanja plastične deformacije na povišenim temperaturama upravo ovog strukturnog konstituenta MŠ.
30. Ostala građa ZTMU obiluje izduženijim zrnima koja nestaju prema ZUT, što je posledica manjih temperatura i slabijeg intenziteta plastičnih deformacija na većim udaljenostima od centra alata.
31. U ZUT-u nedostaju plastične deformacije od alata što uzrokuje nekontrolisano ukрупljavanje zrna praćeno porastom taloga i primarni je rezultat djelovanja toplote.
32. Uticaj dužine trna alata na mehaničke osobine zavarenog spoja nije bilo moguće tačno utvrditi, prvenstveno zbog zazora u vreteništima pogona hodova radnog stola adaptirane mašine za ZTM, usled čega se pojavljuje ponovljiva vrsta “skrivene” greške tipa nedostatka

6.0 ZAKLJUČCI

korjena-“neprovara”, dominantno na kraju II faze prodiranja alata i početku II ciklusa procesa, odnosno na početku zavarivanja.

33. Navedeni razlog uslovio je potrebu da se mašinskom obradom skidanjem strugotine-glodanjem sa naličja MŠ smanji debljina već zavarenih uzoraka i na taj način ukloni uticaj “skrivenih” greške kao koncentratora napona i potencijalnog uzroka pada zatezne čvrstoće i prijevremene pojave prsline na malim uglovima savijanja oko lica MŠ.

34. Bez obzira što ni jedna od standardizovanih metoda ispitivanja bez razaranja zavarenog spoja nije pokazala indikacije za sumnju u kvalitet spoja, prvo savojni test a potom i ispitivanje zatezanjem, nedvosmisleno je pokazalo postojanje pomenutog defekta na naličju MŠ.

35. Greška ovog tipa onemogućila je da omekšani materijal prolaskom ispod trna alata u potpunosti difuziono popuni prostor na ivici spajanja uzoraka, iako je pri konstruisanju predviđeno da alati (tip A i tip C) sa najmanjom dužinom trna $h = 5,1$ mm, nepromjenljivom penetracijom od 0,2 mm i pri uglu nagiba ose alata od 1° u smjeru suprotnom od smjera zavarivanja, posjeduju takvu mogućnost.

36. U uzorcima koji su posjedovali ovaj tip “skrivenih”greške treba tražiti i dodatno objašnjenje, pored manje deformabilnosti legura iz sistema Al-Zn-Mg-Cu, slabijih rezultata proba na savijanje oko lica MŠ (korjena strana konveksna pri savijanju), pogotovo nakon upoređenja sa mjestom pojave prsline i loma vizuelnim uvidom u izgled površine preloma pri relativno malim uglovima savijanja (zona”grumena” MŠ).

37. Parametri statičkih ispitivanja mogu se ocijeniti zadovoljavajućim tim prije što su postignuti kod topljenjem nezavarljive legire EN AW 7049A u stanju T652 u prisustvu “skrivenih” greške.

38. Efikasnost zavarenog spoja od 70% do 80% postignuta je kod uzoraka za odnos između broja obrtaja alata i brzine zavarivanja koji se nalazio u rasponu optimalnog količnika $n_{alata} / v_{zav} = 9,37$ $n_{alata} / v_{zav} = 10,62$.

39. Izduženje koje je samo za mali broj uzoraka veće od 50% od izduženja osnovnog materijala, nezadovoljavajući je rezultat zbog manje izražene duktilnosti zavarenih spojeva, iako legura EN AW 7049A u stanju T652 posjeduje najmanje izduženje od svih vještački starenih visokočvrstih aluminijumskih legura.

40. Krive raspodjele tvrdoće oblika “W” pokazuju trend opadanja tvrdoće u ZUT i prelaznoj regiji između zone “grumena” prema susjednim oblastima ZTMU samo u podnožju MŠ na strani napredovanja i mjestimično na povratnoj strani, dok u drugim oblastima zavarenog spoja prema licu MŠ ona ima prilično uniforman geometrijski oblik.

41. Poređenjem sa krivom raspodjele tvrdoće u jezgru MŠ ovakav profil distribucije tvrdoće opravdava se postojanjem veličine zrna i krupnijih čestica taloga na račun stvaranja sitnijih čestica.

6.0 ZAKLJUČCI

42. Ravnomjernost profila vrijednosti tvrdoće u samoj zoni “grumena” MŠ tumači se pojavom prisustva rafiniranih zrna kao posledicom rekristalizacionih procesa uzrokovanih plastičnom deformacijom velikog intenziteta u jezgru MŠ .
43. Uobičajan asimetrični geometrijski izgled prosječnih vrijednosti tvrdoće u zbirnom grafičkom prikazu kod taložno ojačanih legura aluminijuma, ove analizirane naročito, posledica je u prvom redu kinematskih parametara procesa, pogotovo što kod povećanja broja obrtaja alata uz nepromijenjenu brzinu zavarivanja dolazi do povećanja tvrdoće u zoni “grumena” mnogo više nego kod preostale ZTMU.
44. Do povećanja tvrdoće u drugim strukturnim sadžajima dolazi i kada se poveća brzina zavarivanja, a broj obrtaja alata zadrži konstantan nivo, na osnovu čega se može zaključiti da i tvrdoća djelimično zavisi i od mjernog mjesta na strani napredovanja ili povratnoj strani MŠ, odnosno od udaljenosti položaja ose alata od lokacije otiska.
45. Sagledavajući mjesto loma pri savojnom testu preko trna u tri tačke i lomu na probi jednoosnim zatezanjem uzoraka, zapaža se da je ono locirano u područjima sa naglom promjenom nivoa vrijednosti tvrdoće, odnosno na uglovima u kojima se sijeku njeni distributivni pravci, odnosno na povratnoj strani MŠ (ZTMU-“grumen” i okolina preostale ZTMU).
46. Ispitivanja vrijednosti energije udara i udarne žilavosti (dijagrami *sila-vrijeme* i dijagrami *energija-vrijeme*) zavarenih spojeva, iako veće nego u OM, pokazuju prilično niske vrijednosti u svim ispitanim udaljenostima vrha zareza u ZTMU - jezgru MŠ (zoni “grumena”) i na dva mjesta na strani napredovanja i na povratnoj strani MŠ takođe u ZTMU.
47. Prosječne vrijednosti energije udara najmanje su u samom centru MŠ-zoni “grumena” na uzorcima zavarenim sa alatom tip A i tip C (najmanja dužina trna $h = 5,1$ mm), a najveće na mjestima loma udaljenijim od centra alata prema povratnoj strani MŠ, takođe u ZTMU.
48. Kod konstantnog broja obrtaja alata, povećanje brzine zavarivanja neznatno smanjuje energiju udara kod alata sa većom dužinom trna ($h = 5,4$ mm), dok kod uzoraka zavarenih alatima sa većim uglom konusa trna (10°) ovakva zavisnost ne može se uspostaviti.
49. Ovakav zaključak ne može uputiti na razmišljanje da je na udarnu žilavost zavarenog spoja dominantniji uticaj geometrijskih karakteristika alata, budući na visoku ujednačenost udarne žilavosti cijele ZTMU kod svih korišćenih tipova alata (A, B, C i D), bez obzira da li je zarez na strani napredovanja ili na povratnoj strani MŠ.
50. Najvažniji zaključak iz domena udarnih ispitivanja jeste da je energiji potrebnoj za propagaciju prsline E_p najčešće pripada od 24% -37% od ukupne energije udara E_u , što je od značaja za životni vijek konstrukcije oslabljene prslinom.
51. Ovakvo ponašanje zavarenog spoja objašnjava se činjenicom da slojevite strukture ZTMU, naročito oko jezgra “grumena”, dodatno utiču da se vrijednost energije koju treba utrošiti za propagaciju prsline E_p često kreće i 75% ukupne energije E_u pri udarnom opterećenju zavarenog spoja.

6.0 ZAKLJUČCI

52. Ispitivanje zamornog ponašanja zavarenog spoja sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti SENB epruvete, ograničeno je samo na ZTMU sa oštrim zarezom na vrhu orjentisanim u suprotnom smjeru od smjera zavarivanja, odnosno na konstituent spoja ZTMU koja se najviše mehanički i toplotno deformiše u toku II ciklusa procesa-zavarivanja.

53. Provedenim ispitivanjima parametara elasto-plastične mehanike loma OM i MŠ zavarenih spojeva, odnosno žilavosti loma K_{Jlc} OM i MŠ, određuje se stepen njihove osjetljivosti na prisustvo zamorom izazvane oštre prsline.

54. Dokazano je da najveću otpornost prema lomu posjeduje povratna strana MŠ, što je u najvećoj mjeri posledica procesa rekristalizacije kroz koju je povratna strana MŠ prošla kombinovanim kretanjem alata tokom trajanja II ciklusa procesa odnosno zavarivanja uzoraka.

55. Otpornost prema razvoju prsline, vidljiva na prelomnim površinama duž fronta prostiranja zamorne prsline, manja je u OM nego na povratnoj strani MŠ, što dodatno potvrđuje prethodnu tvrdnju.

56. Činjenica da se ovakvi trendovi u odnosima područja sa stabilnim i nestabilnim rastom prsline razlikuju u bitnom od izbora kinematskih parametara postupka, opredeljuju buduća istraživanja prema tehnologijama u proizvodnji aluminijumskih legura ultravisoke čvrstoće sa rekristalizovanim mikrostrukturom kao posledicom miješanja - FSP-procesiranjem trenjem i miješanjem odnosno termomehaničkim procesiranjem,

57. Iz fraktografske analize površine preloma nastalog udarnim opterećenjem u ZTMU i pregleda karakterističnih čestica dobijenih EDS analizom slijedi zaključak da se oblasti preloma ne podudaraju sa uslovima njihovog formiranja, odnosno mnogo su manje pod direktnim pojedinačnim uticajem tipa korišćenog alata (A, B, C i D), a mnogo više zavise od kombinacije odnosa broja obrtaja n_{alata} i brzine zavarivanja v_{zav} .

58. Centralna zona MŠ-“grumen” zona lomi se mehanizmom duktilnog loma kod kovanih ploča zavarenih sa alatima tip A ($h = 5,1$ mm), tipovima alata B i D ($h = 5,4$ mm) koje nemaju iste dužine i uglove konusa trna, pri nejednakom odnosu $n_{alata}/v_{zav} = 10,62$, $n_{alata}/v_{zav} = 12,5$ i $n_{alata}/v_{zav} = 14,16$, respektivno.

59. Na mjestima loma udaljenim od centra MŠ na strani napredovanja i na povratnoj strani, neposredno izvan zone “grumena”, kod istog odnosa kinematskih parametara i tipa alata, morfologija preloma upućuje da je prelom dominantno sa obilježjima krtog loma.

60. Bez obzira na manje uočene razlike moguće je izvesti generalni zaključak da mehanizam nastanka loma mnogo više zavisi od odnosa kinematskih parametara nego od tipa korišćenog alata za zavarivanje.

61. Na svim mikrofraktografski ispitanim površinama evidentna je slojevitost strukture grumena sa međuslojnim uključcima, više ili manje izraženim, dubljim ili plićim jamicama, krtim česticama i sekundarnim prslinama duž fronta prostiranja loma.

6.0 ZAKLJUČCI

62. Inicijacija prslina kod svih ispitanih uzoraka potiče od krupnijih i krtih čestica, u osnovi intermetalnih (IM) jedinjenja, sekundarnih faza različitog oblika i veličine nataloženih na uključcima MgO.

63. EDS metodom urađeni dijagrami elemenata prisutnih u markiranim česticama po površini loma i otkriveno je postojanje uključaka oksidnog tipa što implicira na prisustvo sekundarnih čestica različitog sastava, oblika i veličine.

64. EDS pregledom karakterističnih prelomnih površina izvršena je identifikacija markiranih čestica početka loma čiji grafički prikaz zavisnosti intenziteta o energiji X-zračenja izraženoj u keV, upućuje na zaključak da su intermetalne sekundarne faze većinom na bazi AlMgZnSi, AlFeZn ili AlZn izdvojene taloženjem po granicama uključaka MgO .

7.0 NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMJENE U PRAKSI

Multidisciplinarnost u metodološkom pristupu istraživanjima uticaja ulaznih faktora (upravljivih parametara), nezavisno promjenljivih veličina, obradnog procesa ZTM na karakterizaciju ostvarenog spoja - zavisno promjenljivih veličina, otkovka ciljno metalurški dizajnirane legure faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu (EN AW 7049A T 652), u naučnom smislu ogleda se u:

- odabiru iskustveno optimalnih vrijednosti kinematskih parametara zavarivanja (brzina zavarivanja i broj obrtaja alata) i geometrijskih parametara alata (dužina i ugao nagiba konusa trna) u eksperimentalnom hiper prostoru za koje su izvedeni zavareni spojevi bez zapreminskih i drugih grešaka tipa nehomogenosti u svim strukturnim sadržajima,
- formiranju dovoljno velike baze podataka termo-mehaničkih i dinamičko-oscilatornih vrijednosti alata i istraživane legure na osnovu koje je moguće konceptualno kreiranje (analitičko i numeričko) matematičkog modela tehnološkog procesora za predikciju ulaznih faktora modela u zavisnosti od interakcije izlaznih faktora koje omogućava automatsko projektovanje postupka ZTM,
- spektralnoj analizi u vremenskom i frekventnom domenu dinamičke komponente sile zavarivanja i komponenata ubrzanja alata za zavarivanje u cilju krajnje optimizacije vrijednosti za koje je moguće predviđanje pojave grešaka u korjenu MŠ,
- determinisanju hiper površine višedimenzionalnog prostora kojim se utvrđuje funkcija cilja-dostizanje zatezne efikasnosti zavarenog mjesta između 70% i 80% vrijednosti zatezne čvrstoće OM, energije razvoja prsline veće tri i više puta od energije njene inicijacije i većoj žilavosti loma MŠ nego OM,
- detaljnom primjenom toka postupka normalizacije u izradi model dijagrama krivih otpornosti na osnovu energetske prilaze *J integralu* baziranog na novom standardu ASTM E 1820-15a na efikasan način određuje se K_{Jc} - žilavost loma u različitim mjestima uzorkovanja zamorne prsline u MŠ na obje njegove strane,
- kvantificiranje zavarenog spoja ovih kompleksnih legura aluminijuma u stanjima visokih vrijednosti čvrstoće više nije opisnog karaktera, već se može brojčano ocjenjivati što pruža uslove da konstruktori i tehnolozi izaberu parametre zavarivanja za koje se dobijaju strukture sa većim pogodnostima za upotrebu u vojnoj industriji.

Sa aspekta primjene postupka ZTM u svakodnevnoj proizvodnoj praksi, zahvaljujući mogućnostima aplikacije na mašinama sa kružnom interpolacijom (numerički upravljanim) tipa glodalice i obradnih centara različitih izvedbi, ostvarljivo je spajanje u prostoru elemenata složene geometrijske forme na tehnološki relativno jednostavan i apsolutno ekonomičan način. Posebno su izražene velike mogućnosti pri upotrebi namjenskih mašina za ZTM opremljenih kontrolerima za korekciju reaktivnih parametara za slučaj nepostojanja projektovane tehnologije zavarivanja. Dalja istraživanja kretaće se u pravcu dobijanja još veće zatezne efikasnosti sučeonih spojeva pločastih matetijala od ove legure aluminijuma kao i kod drugih vrsta spojeva (preklonpi, ugaoni...) u svim položajima zavarivanja.

8.0 LITERATURA

- [1] Mihailović D., Grujičić Z. : “*Karakteristike neravnotežne strukture legura sistema Al Zn Mg Cu u livenom stanju*“, Međunarodno savetovanje: Zavarljivost aluminijuma, aluminijumskih legura i konstrukcija, SFRJ, Budva, 1976, str. 102-109.
- [2] Rabkin D.M., Ignatjev V.G., Dovbiščenko I.V.: “*Technological concepts of welded Al-and Al-alloy joints*“, Automatičeskaja svarka (Institut elektrosvarki Paton), 1981, SSSR, str.8-17.
- [3] Sanders J., Starke K.: “*The relationship of microstructure to monotonic and cyclic of two age hardening aluminium alloys*“, Metalurgical Transactions A7, 1976, pp.1407-1418.
- [4] Waterloo G., Hansen H., Gjonnes J., Skjervord S. : “*Efect of preformation and preaging at room temperature in Al-Zn-Mg(-Cu,Zr) alloys*“, Materials Science and Engineering, Vol.303, 2001, pp. 226-233.
- [5] Paris P.C., Erdogan F. : “*A critical analysis of crack propagation laws*“, Trans.ASME Journal Basic Engineering, Vol.85, 1963, pp.528.
- [6] Irwin G.R. : “*Fracture Testing of High Strength Shetet Materials Under Conditions Appropriate for Stress Analysis*“, Report 5486, U.S. Naval Research Laboratory, 1960.
- [7] Sedmak S.: “*Ocena osobina zavarenih spojeva ispitivanjem epruveta sa prslinama*“, Monografija, III Međunarodna škola mehanike loma, 1984, Arandelovac, str.281-306.
- [8] Sedmak S., Radović A.: “*Jačina zarezanih epruveta i udarna žilavost Al Zn Mg legura i njihovih zavarenih spojeva*“, Predavanje po pozivu na I kursu za EWE, 2004, Zavod za zavarivanje Beograd, Beograd.
- [9] Ashurst Scandium net, Scandium Metalurgical Data, <http://www.intellction.com/ash/scdata.html>
- [10] American Society for Metals: “*Aluminium Prtoperties and Physical Metals*”, 1984.
- [11] Pickens J.R.: “*Nomenclature for Metallographic Sections*”, Metallurgical Transactions, Vol.17A, No.6, 1986, pp.1095-1101.
- [12] Sedmak A., Šijački V., Milosavljević A., Đorđević B., Vukićević M.: “*Mašinski materijali-2 deo*“, Mašinski fakultet, Beograd, 2000, (ISBN 978-86-17-18360-6).
- [13] Evancho J.W. and Staley J.T.: “*Kinetics of Precipataion in Aluminium-Alloys during Continuous Cooling*“, Metalurgical Transactions, Vol.5, No 1, 1974, pp.43-47.
- [14] Filetin T., Kovačićek F.: “*Svojstva i primjena materijala*“, Fakultet strijarstva i brodogradnje, Hrvatska, Zagreb, 2002, str.33-35.
- [15] Porter D.A. and Esteling K.E.: “*Phase Transformations in Metals and Alloys*“, New York, USA, 1992.

8.0 LITERATURA

- [16] Wasco S. et al.: "*Forging Processes and Methods*", Forging Handbook, Association and American Society for Metals, 1985, pp.164-168.
- [17] Lamb J. and Sanders Jr.: "*The effect of Cu on the Decomposition of Al-Zn-Mg-(Cu) Alloys*", Journal of Material Sciences & Engineering, Vol.6, Issue 6 ,2017, (DOI:10.4172/2169-0022.1000404).
- [18] Holroyd N.J.: "*Slow strain rate corrosion testing of aluminium alloys, in Environment Sensitive Fracture: Envaluation and Comparison of test methods*", ASTM STP 821,1984, pp.202-241.
- [19] Talianker M. and Cina B.: "*Retrogresion and reageing and the role of dislocations in the stress corrosion of 7000-type aluminium alloys*", Metalurgical Transactions A, Vol.20A, 1989, pp.2087-2092.
- [20] Park J.K. and Ardeli A.J.: "*Effects of retrogresion and reageing treatmens on the microstructure of Al-7075 T651*", Metallurgical Transactions A, Vol.15A, 1984, pp.1531-1543.
- [21] Troici J.A., Železnikov V.A.: "*Metalurgija aluminijuma*", Moskva, 1984.
- [22] Kontić R., Blečić Ž.: "*Metalografija*", Univerzitetska riječ, SR Jugoslavija, Podgorica, 1993.
- [23] Hatch J.E.: "*Aluminium: Properties and Physical Metalurgy*", American Society for Metals, 1984, Metals Park, pp.242.
- [24] *Preliminarna studija o tehnološkim mogućnostima proizvodnje legure PD 30 i legure PD 33 u SOOR Kombinat aluminijuma Titograd*, OOUR Institut za istraživanje i razvoj aluminijuma, Titograd, 1982.
- [25] Radović A. : "*Zavarljivost Al Zn Mg-legura povišene jačine*", Zavarivač, 1978, Beograd, str.29-36.
- [26] Livanov V.A.: "*Struktura i svojstva polufabrikata od aluminijumskih legura*", Metalurgija, Moskva, 1974.
- [27] Veljanovski B., Radović A., Sedmak S. : "*Uticao Ti i Zr na poboljšanje zavarljivosti Al Zn Mg-legure*", Međunarodno savetovanje:zavarivanje, zavarljivost aluminijuma, aluminijumskih legura i konstrukcija, 25-27 februar 1976, str.49-56
- [28] Veljanovski B.: "*Razvoj aluminijumskih legura visoke čvrstoće*", Interna dokumentacija, Beograd, VTI, 1983, deo 1-4.
- [29] Veljanovski B., "*Razvoj aluminijumskih legura visoke čvrstoće*", Interna dokumentacija, Beograd , VTI, 1986, deo 5-9.

8.0 LITERATURA

- [30] Ghaziary H.M.: “*Application and Performance Characteristics of Aluminium Armor Plate for the Hull Construction of Current and Future Military Tactical Vehicle*”, 2011, (DOI:10.4271/2011-01-0536).
- [31] MacGregor D.: “*Dont Waste a Drawdown*”, Armed Forces Journal, 2012, pp.24-26,38-39.
- [32] Mondolfo L.F.: “*Aluminium alloys, Structure and Properties*”, 1976, London, Butterworths, pp.844-864.
- [33] Propagandno-komercijalni katalog, DP KAT, *RO Fabrika otkovaka*,1993.
- [34] Dragojević M.: “*Razvoj našeg naoružanja*”, Zadužbima Andrejević, 2003.
- [35] www.eurokompozit.com.mk
- [36] Arhiva SOUR Kombinat aluminijuma Titograd-*OOOR Kovačnica* (foto dokumentacija), Titograd, 1985.
- [37] Gingell A.B. and Gooch T.G.: “*Review of factors influencing porosity in aluminium welds arc*”, TWI Members Report 625/ 1997, 1997.
- [38] Metals Handbook, Vol.6: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM Metals Park, 1997, Ohio.
- [39] <http://weldcall.com/us/en/education/knowledge>
- [40] Ghaziary H.: “*Application and Performance Characteristics of Aluminium Armor Plate for the Hull Construction of Current and Future Military Tactical Vehicles*”, SAE Technical Paper, 2011, (DOI: 10.4271/2011-01-0536).
- [41] AST Handbook: *Fatigue and Fracture*, ASM International, Vol.19,1983, pp.771-812.
- [42] Starke E.A. and Staley J.T.: “*Application of modern aluminium alloys to aircraft*”, Progress in Aerospace Science, Vol.32, 1996, pp.131-172.
- [43] <http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswmat.html>, “ Friction Stir Welding - Materials and thicknesses”
- [44] Prakash J., Tewari S., Srivastava B.K.: “*Shielding Gas Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding-A Review*”, International Journal of Modern Engineering Research, 2012, Vol.1, Issue.2, pp.690-699.
- [45] Oates W.: “*Welding Handbook Eighth Edition*”, American Welding Society, Vol.3, USA, 1996.
- [46] Balasubramanian N. et al: “*Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminium alloy*”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.36, Issue 3-4, 2008, pp.254-262.

8.0 LITERATURA

- [47] Mukhopadhyay A.K. et al.: "Microstructure Property Relationships in a High Strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloy", 9th International Conference on Aluminium Alloys, 2004, pp.883-888.
- [48] Roven H., Liu M., Werenskiold J.: "Dinamic precipitation durin severte plastic deformation of an Al-Mg-Si aluminium alloy", Materials Science and Engineering A, Vol.483, 2008, pp.54-58.
- [49] Muhr O.R., Grong O., Fjaer H.G., Mariora C.D.: "Modeling of the microstructure and evolution in Al-Mg-Si alloys during multistage thermal processing", Acta materialia, Vol.52, 2004, pp.4997-5008.
- [50] Perović M., Veljić D.: "Karakterizacija zavarenog spoja različitih legura aluminijuma formiranog topljenjem i plastičnom deformacijom", 37.JUPITER Konferencija, Beograd, 2011, Zbornik radova, str.3.47-3.58, (ISBN 978-86-7083-724-9).
- [51] Stolyarov V.V. and Mishra R.S.: "Microsctrural aspects of superplasticity in ultrafine grained alloys", TMS, Warredale, PA, 1998, pp.117-126.
- [52] Deng Y. and Wang Y.: "Effect of Ekstrusion Temperature on strength and Fracture of on Al-Zn-Mg Alloys", Journal of Materialis Resarch, Vol.30, Issue 2, 2016, pp.87-94.
- [53] Hatch J.E.: "Aluminium: Propertiesanal Physical Metalalurgy", American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1998.
- [54] Kuzel R. and Prochazka I. : "Structural investiations of submicrocrystalline metals obtained by high pressure torsion deformations", Journal of alloys and compounds, Vol.378, 2004, pp.237-247.
- [55] Pourkia N., Emamy M., Farhangi H. and Syed Ebrahimi S.H.: " The Effect of Ti and Zr Elements and Cooling Rate on the Mikrostruktura and Tensile Properties of a New Developed Super High-Strength Aluminium Alloy ", Materials Science and Engineering, 2010, Vol. 257, No. 20, pp.5318-5325.
- [56] Mukhopadhyay A.K.: "Microstructure and Properties of Hifh Strength Aluminium Alloys", Transactions of the Indian Institute of Metals, 2009, Vol. 62, No. 2, pp. 113-122.
- [57] Von Hofe D. and Mildeldorf K.: "Innovations in Joining Technology-Processes and Products tor The Future", Paton Welding Journal, No.9-10, 2000, pp.149-156.
- [58] Ghosh P.K et al : "Pulsed MIG welding of Al-Zn-Mg Alloy", Materials Transactions JIM, Vol.31, Issue 8, 1990 , pp.723-729.
- [59] Shimakage K., Sato T., Toda Sh. : "Fundamental studies on the elimination of imputy in aluminium using segregation phenomena", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.39, Issue 12, pp.819-906.

8.0 LITERATURA

- [60] Elagin V.I., Zakharov., Rostova T.D.: “*Tehnology of light Alloys*” Metals science and Heat Treatment”, Vol.36, No.7-8, 1995, pp.375-380.
- [61] Naem H.T, Mohammed K.S., Ahmad K.R. and Rahmat A.: “*The Role of Direct Chiling, Terogression and Reaging Treatment on Mechanical Properties of High Stength Aluminium Alloy*“, Advance Materials Research, Vol.795, 2013, pp.211-218.
- [62] Lim S.T., Eun S.L and Nam S.W.: “*Control of Equilibrium Phases (M,T,S) in the Modified Aluminium Alloy 7000 for Thick Forging Applications*“, Materials Transactions, Vol.44, No.1, 2003, pp.181-187.
- [63] Grabulov V., Veljanovski B., Radovic A., Pavlović M.: “*Zavarivanje i zavarljivost aluminijumskih legura*”, Interni tehnički izvještaj, VTI VJ, Beograd, 1998.
- [64] Mrđa J., Pašić O.: “*Uticaj tehnoloških parametara na sadržaj vodonika u zavarenim spojevima aluminijuma zavarenih MIG postupkom*”, Zavarivanje, 1980, Br.2, str.32-37.
- [65] Radojković M., “*Savremeni pogledi na proračun i oblikovanje zavarenih konstrukcija od Al –legura*”, Zavarivač, No.1, 1979, str.28-33.
- [66] Thompson B., and White P.: “*Friction Stir Welding of Thick Section Aluminium for Military Vehicle Applications*“, 9th ISFSW, Huntsville, Maj, 2012, (distributed by TWI on CD).
- [67] Dorward R.C., Beerntssen D.J.: “*Gran structure and quench-rate effects on strength and toughness of AA 7050 Al-Zn-Mg-Zr alloy plate*”, Metall.Mater.Trans.A, 26A, Vol.9, 1995, pp.2481-2484.
- [68] Rihter Ž.: “*Zavarivanje aluminijske legure visoke jačine za konstrukcije*“, Zavarivanje, 1978, Br.1, str.18-23.
- [69] Macanković D.: “*Spajanje aluminijuma sa drugim materijalima*”, Predavanja na kursu za inženjere zavarivanja, Zavod za zavarivanje Beograd, 1989.
- [70] Limpel I.: “*Korozijska otpornost zvarov na aluminiju in aluminijuev zlitinah*”, I Jugoslavenski simpozij o aluminiju, 1969, Ljubljana (Zbornik referatov).
- [71] *Welding ALCOA Aluminium Company of America*, 1985, Pittsburg 19, Pennsylvania.
- [72] Buray Ž., Huber J.: “*Influence of surface contamination of Al Mg5 wires on welding paramtrs, joint strength and porosity*”, Doc.IIW XII-C-66-74.
- [73] Polmer I.J.: “*Light alloys-From traditional alloys to crystal*”, Fouth edition, 2006, Elsevier, pp.916-92..
- [74] Pavlović M., Radović Lj.: “*Aluminijumske legure povišene čvrstoće za zavarene konstrukcije*”, Zavarivanje i zavarene konstrukcije”, 2001, Br.3, str.99-105.

8.0 LITERATURA

- [75] Mathers G.: *"The welding of aluminium and its alloys"*, CRC Press-Boca Raton Boston New York Washington, 2000, Woodhead Publishing Limited, pp.51-57.
- [76] <http://www.idga.org/vehicles/artices/army-vehisles-must-balance-weight-protection-consi/>
- [77] Singer P,W.: *"The Evolution of the IED"*, Armed Forces Journal, 2012, pp.32-33.
- [78] Meister R.P., Martin D.C.: *"Welding of Aluminium and Aluminium Alloys"*, Columbus:Battele Memorial Institute, 1967, pp.18.
- [79] Lebedev B.K.: *"Svarka treniem"*, Mašinstroenie, 1986, str.236.
- [80] Elmer.J.W. and Kautz D.K.: *"Fundamentals of Friction of Welding"*, ASM Handbook, 1987, Vol.6, pp.150-154.
- [81] Isachenko V., Semyonov S., Sukomel A., Osipova V.: *"Heat Transfer"*, University Press of *the Pacific*", 2000, (ISBN 978-0898750270).
- [82] Đurđanović M.: *"Istraživanje procesa oblikovanja krajeva cevnih profila trenjem"*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, Niš, Srbija, 1990.
- [83] Ćirić R.: *"Mikrostrukturni i viskozni fenomeni u oblasti ravni spajanja u procesu zavarivanja trenjem raznorodnih čelika"*, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Srbija, 2007.
- [84] [http// www.fpr.co.uk/processes](http://www.fpr.co.uk/processes)
- [85] Thomas M.W, et al 1991: *"Friction Stir Butt Welding"*, International Patent Application No PCT/GB 9125978.8 Thomas M.W. et al 1995 Friction Stir Butt Welding UP Patent 5.460 317.
- [86] Lienert T.J., Stellwag W.L., Grimmett B.B, Warke R.W.: *"Friction Stir Welding Studies on Mild Steel"*, Welding Journal, 2003,Vol.82(1), pp.1-9.
- [87] *An American National Standard, AWS D17.3/D17.3M:200X*, American Welding Society, Specification for Friction Stir Welding of Alluminium Alloys for Aerospace Hardware.
- [88] Vairis A.,and Frost M.: *"Modelling the linear friction welding"*, Materials Science & Engineering A, 2000, Vol.292(1), pp.8-17.
- [89] Khandkar M.Z. and Khan J.A: *"Experimental and Analytical Investigation of Friction Stir Welding"*, ASME International Conference on Thermal Engineering, Bangladesch, 2002, pp.725-732.
- [90] Andersen M.: *"Friction Stir Welding (FSW)-Progres in R&D and new applications"*, Zavarivanje, 2005, Vol..48(3/4), str.103-108.

8.0 LITERATURA

- [91] Fuller C.B.: *"Friction stir Tooling: Tool Materials and Design"*, ASM International, 2007, pp.7-35.
- [92] Perović M., Veljić D., Rakin M., Radović N.: *"Metalurške karakteristike i mehanička svojstva zavarenog spoja od kovanih ploča vještački starene legure aluminijuma visoke čvrstoće zavarene trenjem miješanjem (FSW)"*, XVI savetovanje sa međunarodnim učesćem, Srbija, planina Tara, 2010, (Zbornik radova na CD).
- [93] <http://twi.co.uk/FrictionStirWelding-SuperiorWeldQuality>
- [94] Colligan K.J.: *"The friction stir welding process : an overview, Friction stir welding"*, urednici Daniela Lohwasser Zhan Chen, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2010.
- [95] Smith C.B., Bendzsak G.B., North J.F., Hinrichs J.S., Noruk J.S & Heidenman: *"Heat and Material Flow Modeling of the Friction Stir Welding Proces"*, 9th International Conference in Computer Technology in Welding, Detroit, Michigan, September, 11(5), 1999, pp.18-25.
- [96] Perović M., Veljić D., Rakin M., Radović N., Dakić J., Živković A.: *"Evaluation of characteriics FSW joints of forged panels made of high strength aluminium allos Al-Zn-Mg-Cu in a T652 temper"*, 1st International Scientific Conference on Engineering, Manufacturing and Advanced Technologies, MAT 2010,18-20 November, 2010.
- [97] Nandan R., Debroy T and.Bhadeshia H.: *"Recent Advances in Friction stir Welding – Proces, Weldment Structure and Properties"*, Progres in Materials Science, Vol.53, 2008, pp.980-1023.
- [98] Chen Z.W., Cui S.: *"Tool-workpiece interaction and shear layer flow during stir welding of alumininium alloys"*, Transaction of Nonferrous Metal Socciety of China, Vol.17, 2007, pp.258-261.
- [99] Dawes C.,Thomson W.: *"Friction Stir Welding of aluminiujm alloys"*, TWI Bulltin 6,1995, pp.124-127.
- [100] Vijayan S., Raju R.: *"Proces Parameter Optimizacion and Characterizacion of Friction Stir Welding of Aluminium Allos"*, International Journal of Applied Engineering Research, Vol.3(10), 2008, pp.1303-1316.
- [101] Bušić M.: *"Zavarivanje trenjem aluminijumskih sendvič panela rotirajućim alatom"*, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Hrvatska, Zagreb, 2015, str.25
- [102] Reynolds A.P.: *"Friction Stir Welding of Aluminium Alloys"*, University of South Columbia, South Carolina, USA, 2003.
- [103] Totten E.G., MacKenzie D.S.: *"Handbook of Aluminijum Alloy"*, Production and Materials Manufacturing, Vol.2, 2003, pp.579-601.

8.0 LITERATURA

- [104] Zhang Y., Cao X., Larose S., Wanjara P.: "Review of tools for friction stir welding and processing", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.51 (3), 2012, pp. 250-261.
- [105] Rai R., De A., Debroy T.: "Review: friction stir welding tools", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.16 (4), 2011, pp.325-342.
- [106] Arora A.: "Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter", Scripta Materialia, Vol.28, 2011, pp. 1124-1129.
- [107] Šibalić N.: "Modeliranje i simulacija procesa spajanja deformisnjem – FSW", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Podgorica, 2010, str.168-169.
- [108] <http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswmatproc.html>, "Friction Stir Welding - Process advantages"
- [109] Bajić D.: "Postupci zavarivanja", Udžbenik, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014, str.219, (ISBN 978-9940-527-38-9).
- [110] Peel M.J., Steuwer A., Withers P.J., Dickeson T., Shi Q., Shercliff H.: "Dissimilar friction stir welds in AA 5083-AA 6082. part i: Process parameter effects in thermal history and weld properties", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.37A, No.3, 2006, pp.2183-2193.
- [111] Kriger U.: "Rührreißschweißen: Schweißen und Hartlöten Aluminiumwerkstoffen, 3.2.32" Von, VS SR Njemačka, 1998.
- [112] Elangovana K., Balasubramanian V.: "Influence of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in A 2219 aluminium alloy", Journal of Materials Processing Technology, No.200, 2008, pp.163-175.
- [113] Mishra R., Ma Z.: "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, Vol.50, 2005, pp.1-78.
- [114] Shinoda T.: "Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welding", 3rd ISFSW, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, 27-28 September 2001, (distributed by TWI on CD).
- [115] Klobčar D., Kosec L., Smolej S., Tušek J.: "Weldability of aluminium alloy AlSi 12 using FSW", Proceedings of conference EUROJOIN 8, HDTZ, Hrvatska, 2012, str.99-106.
- [116] Stamenković D., Đurđanović M., Mitić D.: "Zavarivanje postupkom FSW", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2006, Br.2, str.59-66.
- [117] Dike S., Prakash V., Lewendovski J.: "High Strain Rate/Temperature Experiment Relevant to Friction Stir Welding", Progress in Material Science, Vol.51, No. 3, 2008, pp.1125-1131.

8.0 LITERATURA

- [118] Dong P., Lu F., Hong J., Cao K.: "*Analysis of Weld Formation Proces in Friction Stir Welding*", 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, June 1999, (distributed by TWI on CD).
- [119] Hashimoto T., Jougan S., Nakata K.: "*FSW Joints of High Strength Aluminim Alloy*", 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, June 1999, (distributed by TWI on CD).
- [120] Russell M., Shercliff H.: "*Analytical Modeling of Friction Stir Welding*", INALCO 98, 7th International Confernce: Joints in Aluminium, UK, Cembridge, Vol.2, 1998, pp.185-217.
- [121] Shinoda T., Tokisue.H., Enomoto M., Hori H., Koga S., Kumagai M., Matsumoto K., Okamura H., Tsuchiya K.: "*Recent Trends of Research and Devolopment of FSW Technology in Japan*", 3rd ISFSW, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, 27-28 September 2001, (distributed by TWI on CD).
- [122] Zhang G., Su W., Zhang J., Zhang X.: "*Visual observation of effect of tilting on forging action during fsw of aluminium stet*", Science and Techologiy of Welding and Joining, Vol. 16(1), 2011, pp.87-91.
- [123] Milčić D., Živković A., Mijajlović M.: "*An Overview on Friction Stir Welding of the Al 2024 T351*", 34th International Conference on Production Engineering, Proceedings, University of Niš Faculty of Mechnaical Engineerrig, Niš, 2011, pp. 477-480, (ISBN 978-86-6055-019-6).
- [124] Trimble D., Monaghan J., O'Donnell E.: "*Force generation during friction stir welding of AA 2024 T3*", CIRP-Annals-Manufacturing Techology 69, 2012, pp.9-12.
- [125] Johnson R.: "*Forces in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys*", Post 5 First ISFSW, Thousand Oaks, CA, June 1999, (distributed by TWI on CD).
- [126] McLane M., Carter P.: "*Free-Form Friction Stir Welding*", 4th ISFSW, Park City, Utah, 14-16 Maj 2003, (distributed by TWI on CD).
- [127] Kallee S., Nicholas D., Thomas W.: "*Friction Stir Welding-Invention, Innovations and Applications*", INALCO 2001-8th International Conference on Joints in Aluminium, Mart 2001, (distributed by TWI on CD).
- [128] Thomas W., Nicholas E.: "*Friction Stir Welding for the transportation industries*", Materials & Design, Vol.18 (4/6), 1997, pp.269-273.
- [129] Chao Y., Qi X., Tang W.: "*Heat Transfer in Friction Stir-experimental and Numerical Studies*", Journal of Manufacorin Science and Engineering, Vol 125, 2003, pp.138-145.
- [130] Seidel T. and Reynolds A.: "*Two-Dimensional Friction Stir Welding Process Model Based on Fluid Mechanics*", Sci. & Tecf.of Welding and Joining, Vol.8, No.3, 2003, pp.175-183.

8.0 LITERATURA

- [131] Mijajlović M., Milčić D., Đurđanović M.: "*Heat Generation-Temperature Phases of the FSW Process*", 10th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry - RaDMI", 2010, Donji Milanovac, Serbia, 2010, Volume 1, pp.331-335, (ISBN 978-86-6075-017-6).
- [132] Gould J., Feng Z.: "*Heat flow model for friction stir welding of aluminium alloys*", Journal Materials Process & Manufacturing, 1998, V.7, pp.42-49.
- [133] Đurđanović M.: "*Prilog razmatranju primene toplote generisane trenjem*", Tehnika-Mašinstvo, Vol.52, No 6, 2003, pp.1-7.
- [134] Dawes C.J. and Thomas W.M.: "*Friction stir process welds aluminium alloys*", Welding Journal, Vol.75, No 3, 1996, pp.41-45.
- [135] Okamura H., Aota K., Ezumi M.: "*Friction stir welding alloy and application to structure*", Journal of Japan Welding Institute of Light Metals, Vol.50, No.4, 2000, pp.166-172.
- [136] Lehman L.: "*Friction Stir Welding High Temperature Materials, Manufacturing Problem Prevention Proceedings*", The Aerospace Corporation, 2001, pp.11-19.
- [137] Karlsson L. et al: "*Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Aluminium*", Proc.INALCO-7, Cambridge, UK, 1998, pp.143-151.
- [138] Sutton M.A., Yang B., Reynolds A.P., Taylor R. : "*Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminium*", Materials Science and Engineering A323, 2002, pp. 160-166.
- [139] Mahoney M.W., Rhodes C.G., Flintoff J.G., Spurling R.A. and Bingel W.H. : "*Properties of Friction Stir Welded 7075 T651 Aluminium*", Metallurgical and Science, Vol.33, 1998, pp. 1964-1998.
- [140] Lazzeri L., Pieracci A., Salvetti A.: "*An Evaluation of Fatigue Crack Growth Prediction Methods Used in Aircraft Design*", Proceedings of the 18th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, 1995, pp. 615-645.
- [141] Haldman K. and Donald J.: "*Features and configurations of FSW equipment*", JOM., Vol.56, No.11, 2004, pp.179-185.
- [142] *Intelligent Stir Welding for Industri and Research-ISTIR*, Retrieved October 2005. http://www.mts.com/aesd/friction_stir1.htm
- [143] Flores O.V, Kennedy C., McMurr L.E.: "*Microstructure Issues in Friction Stir welded Aluminium Alloy*", Sciptra Materiala, Vol. 38, No.5, 1998, pp. 703-708.
- [144] La Van D.A. "*Microtensile Properties of Weld metal*", Experimental Techniques, Vol.23, No.3, 1999, pp.31-34.

8.0 LITERATURA

- [145] Von Sombeck A., Dos Santos J.F., Torster F., Laueano P. and Kocak.M., : *"Fracture Toughness of Joints on Aluminijum Alloys"*, Ist ISFSW, Thousand Oaks, USA, 1999, (distributed by TWI on CD).
- [146] Hao S., Schwale K.H. and Cornec A.: *"The Effect of Yield Strength Mis-match on the Fracture Analysis of Welded Joints"*, International Journal of Solid and Structures, Vol.37, No.39, 2000, pp. 5385-5411.
- [147] Mishra R.S. and Mahoney M.W. : *"Friction Stir processing:a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys"*, Materials Science Forum, Vol.357, 2001, pp.507-514.
- [148] Valiev R.Z., Salimonenko N.K., Tsenev N.K., Berbon P.B. and Angdon T.G.: *"Observations of high rate superplasticity in commercial aluminium alloys with ultra fine grain sizes"*, Scripta Materiala, Vol.37, 1997, pp.1945-1950.
- [149] Sato Y., Kokawa H., Enomoto M. and Jogan S.: *"Microstructure evaluation of 6063 aluminium during friction stir welding"*, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 30, 1999, pp.2429-2437.
- [150] Donne D., Biallas G.: *"Fatigue and fracture performance of Friction Stir Welded 2024-T3 joints"*, Proceeding European Conference on spacecraft Structure, Material and Mechanical testing, Braunschweig, 1999, Germany, Vol.428, pp.309-314.
- [151] Booth D. and Sinclair I.: *"Fatigue of friction stir welded 2024-T351 aluminium alloy"*, Material Science Forum, 2002, Vol.396-402, pp.1671-1676.
- [152] Kumagai M. and Tanaka S.: *"Properties of aluminium wide panels by friction stir welding"*, Ist ISFSW Thousand, Oaks, 1999, California (distributed by TWI on CD).
- [153] Biallas G., Braun G., Staniek G. and Kayser W.: *"Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Friction Stir Welded 2024-T3"*, Ist ISFSW, Thousand, Oaks, 1999, California (distributed by TWI on CD).
- [154] Heurtier P., Jones M.J. and Allehaux D.: *"Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding"*, Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol.171, pp.348-357.
- [155] Heinz B., Skotzki B., Eggeler G.: *"Microstructural and mechanical characterization of a friction stir welded Al-alloy"*, Material Science Forum, 2000, Vol.331-357, pp.1757-1762.
- [156] Dawes M.G., Karger S.A., Dicerson T.I. & Przdadek J., : *"Strength and fracture toughness of friction stir aluminium alloys"*, IInd ISFSW, Sweden, 2000, Gothenburg (distributed by TWI on CD).

8.0 LITERATURA

- [157] Liu H.J., Chen Y.C and Feng J.C.: ”*Effect of heat treatment on the mechanical properties of friction stir welded joint of 2219-T6 aluminium alloy*”, Materials Science and Technology, Vol.22, No.2, 2006, pp.237-241.
- [158] Liu G., Murr L.E., Niou C.S., McClure J.C and Vega, F.R. : ”*Microstructural Aspects Of the Friction Stir Welding of 6061-T6 Aluminium*”, Scripta Materiala, Vol.37, No.3, 1997, pp.355-361.
- [159] Cavaliere P., Campanile G., Panella F., Squilalace A. : ”*Effect of welding parametrs on mikorostructural properties of AA 6056 joints producd by Friction Stir Welding*”, Journal of Materials Processing Techology, 2006, Vol.180, pp.63-270.
- [160] Murr L.E., Li Y., Trilo B.M., Nowak B.M. and McClur J.C. : ”*A comparative stud of Friction Stir Welding of Aluminium Alloys*”, Aluminium Transactions 1, 1999, pp.141-154.
- [161] Allehaux T.J. and Denquin A.: ”*Microstructure and properties of a friction stir welded 7349-T6 aluminijum alloy*”, IVth ISFSW, 2003, Park City, Utah, USA (distributed by TWI on CD).
- [162] Tomas W.M., Nicholas E.D., Watts E.R. and Straines D.G. : ”*Friction Based Welding Techology for Aluminium*”, The 8th International Conference on Aluminium Alloys, 2002, Cambridge, UK.
- [163] Staron P., Kocak M., William S.W. and Wescott A. : ”*Residual stress in friction stir – welded Al sheets*”, Physica B : Condensed Matter, 2004, Vol.350 (Issues 1-3 Supplement 1), 2004, pp. 491-493.
- [164] Hitingth D.G., Van Nieberk T., Blignaut C., Kruger G and James M.: ”*Analysis of the FSW force footprint and its relationship with process parameters to optimise weld pefomance and tool design*”, 2004, Welding in the World, Vol.48, No.1, pp.50-58.
- [165] Peel M., Steuwer A., Preuss M., Wihers P.: ”*Microstrukture machanical properties and residual stresses as a funktion og welding speed in aluminium AA 5083 Friction stir welds*”, Acta Materials, 2003, Vol.51, pp.4791-4801.
- [166] Lombard H., Hatting D.G., Jones M, N. and Steuwer A.: ”*Synchrotron Diffraction residual strain scanning in FSW as a function of process conditions*”, VIth ISFSW, 2006, Saint-Sauveur, Canada (distributed TWI on CD).
- [167] Preston R.V.: ”*Modeliling of residual stresses in welded aerospace alloys*”, PhD thesis, UK, Cambridge University, 2000.
- [168] Shi Q.Y., Dickerson T.L., and Shercliff H.R.: ”*Thermo-mechanical analysis on welding process of aluminium 2024 with TIG and FSW*”, VIth International Conference on Trends in Welding Research, 2002, Vol.18, No.2, Georgia, USA.

8.0 LITERATURA

- [169] Colegrove P. & Shercliff H.R.: "*Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075–T7351 friction stir welds*", Science and Tehnology of Welding and Joining, Vol.8, No.3, pp.175-183.
- [170] Hamilton C., Somers S.,Dumek : "*A thermal model of friction stir welding applied to Sc-modified Al-Zn-Mg-Cu alloy extrusions*", Inrternational Journal of Mashine Tools \$ Manufacture, Vol.49, 2009, pp.230-238.
- [171] Midling O.T., Oesterkamp L.D. and Bersaas J.: "*Friction Stir Welding aluminium-process and applications*", Cambridge, UK, 1998, pp.161-169.
- [172] Hashimoto T., Jougan S., Nakata K., Kiy Y.G and Ushio M. : "*FSW joints of high strength aluminium alloy* ", 1st ISFSW,1999, Thousand Oaks, California (distributed by TWI on CD).
- [173] Nakata K., Kim Y.G., Ushio M, Hashimoto T. and Jougan S: "*Weldability of high strength aluminium alloys by friction stir welding*", ISIJ International 2000, Vol.40, pp.515-519.
- [174] Rhodes C., Mahoney M., Bingel W., Spurling R.,Bampton C.: "*Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminium*", Scirpta Materialia, Vol.36, No.1,1997, pp.69-75.
- [175] Murr L.E., Li Y., Trilo E.A., McClur J.C.: "*Microstructure in friction stir welding metals*", Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1998, Vol.7, pp.145-161.
- [176] Nofel M. and Kadum M.: "*Effects of Friction Stir Welding pressure on the microstructure and mechanical properties of weld joints*", International Journal of scientific Research, Vol.2, No. 12, 2011, pp.2189-2195.
- [177] Sutton M.A., Reynolds A.P., Yan J.,Yang B.,Yuan N.: "*Microstructure and mixed mode I/II fracture of AA 2524-T351 base material and friction stir welds*", Engineering Fracture Mechanics, Vol.73, No.4, 2006, pp.391-407.
- [178] Nimes A.C., Guerra M., Schmidt C., McClure and Murr L.E. : "*Flow Pattens During Friction Stir Welding*, Materials Characterizacion, Vol.49, No.2, 2002, pp.95-101.
- [179] Shepherd G.: "*The evalution of friction stir welded joints on airbus aircraft wing structure*", IVth ISFSW , 2003, Park City, Utah, USA (distributed by TWI on CD).
- [180] Barcelona A., Buffa G., Fratini L., Palmeri D.: "*On microstructural phenomena occurring in friction stir weldin of aluminium aloys*", Journal of Materials Processing Technology, Vol.177, 2006, pp.340-343.
- [181] Barnes J.E., McMichel J., Reynolds A.: "*Effects of FSW dfectss on 7075 joint strength and fatigue life* ", VIth ISFSW, 2006, Saint-Sauveur, Canada (distributed by TWI on CD).

8.0 LITERATURA

- [182] Colegrove P.A., Hoyer T. and Shercliff H.R.: "*Thermal and Microstructural Modelling in Thick Plate Aluminium Alloy 7075*", Proceedings of the 2003 TMS, 2003, pp. 33-42.
- [183] Donne D., Raimbeaux G., Biallas G., Allehaux D., Palm F. and Ghidini T. : "*Fatigue properties of Friction Stir welded aluminium butt joints*", ICAF2003-Fatigue of Aeronautical Structures as an Engineering Challenge, The 22nd Symposium, International Committee on Aeronautical Fatigue, Switzerland, May 2003.
- [184] Sua J.Q., Nelson T.W., Mishra R. Mahoney M.: "*Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium*", Acta materialia, Vol.51, 2003, pp.713-729.
- [185] Veljić D., Radović N., Sedmak A., Perović M.: "*Tehnologija zavarivanja aluminijumskih legura postupkom zavarivanja trenjem alatom*", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Br.55, 2010, str.13-20.
- [186] Perović M.: "*Uticaj izbora alaza na mikrostrukturnu karakterizaciju trenjem sa miješanjem sučeono zavarenog spoja otkovka od aluminijumske legure EN AW 7049A u stanju T652*", XIV Međunarodna konferencija održavanje i proizvodni inženjering-KODIP 2017, 2017, Budva (Zbornik radova CD).
- [187] Sato S., Enomoto M., Kato R. and Uchino K. : "*Application of aluminium extrusions to suspension arms*", IBEC 98,1998.Vol.5, No-P334, pp.141-146.
- [188] Sato Y.S., Kurihara Y, Park S.H.C., Kokava H. and Tsuji N.: "*Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding*", Scripta materiala, Vol.50, No.1-2, pp.57-60.
- [189] Dawes,C.J.: "*Seam welding aluminium sheet and plate using the stir welding process*", 6th International Symposium JWS , 1996, Nagoya, Japan.
- [190] Christner B.: "*Developments and testing of friction stir welding (FSW) as a joining method for primary aircraft structure*", ICAS Congress, 2002.
- [191] Christner B.K & Sylva G.D. : "*Friction stir weld developments for aerospace applications*", International Conference on Advances in Welding Technology Joining of High Performance Materials, 1996, Columbus, Ohio, USA.
- [192] Perović M., Vuherer T., Bajić D.: "*Uticaj broja obrtaja alata i brzine zavarivanja na mehaničke karakteristike sučeonog spoja legure Al-Zn-Mg-Cu postupkom trenjem sa miješanjem*", Zbornik dneva varilne tehnike 2017, Slovenia, Celje, 2017, pp.102-107 (ISBN 978-961-94199-0-9).
- [193] Ouyang J.H. and Kovačević R.: "*Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the Same and Dissimilar Aluminium Alloys*", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.1, Issue 1, 2002, pp.51-63.

8.0 LITERATURA

- [194] Russell S. and Maynor J.: “*Fatigue and crack growth behavior of friction stir welded 7075 –T6 and 2024-T3 aluminium alloys*”, IIIrd ISFSW, 2001, Kobe, Japan. (distributed by TWI on CD).
- [195] Booth D., Sinclair I. : “*Fatigue of friction stir welded 2024-T351 aluminium alloys*“, Materials Science Forum, Vol.396-402, No.3, 2002, pp.1671-1676.
- [196] Perović M., Todorović P., Jevtović M.: “*Eksperimentalna analiza dinamičkog ponašanja alata kod postupka zavarivanja trenjem sa miješanjem*”, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Br.2,str.53-59,2014, Beograd, Srbija (UDK/UDC : 621.791.92;621.9.01).
- [197] Murr L.E., Liu G., McClurr J.C.: ”*A TEM Study of Precipitation and Related Microstructures in Friction Stir Welded 6061 Aluminium*”, Journal of Materialis Science, Vol.33, 1998, pp.1243-1251.
- [198] Fonda R.W. Bingert J.F and Colligan K.J. : “*Development of Grain Structure During Friction Stir Welding*“, Scripta Materialia, Vol.51, 2004, pp.243-248.
- [199] Lumsden J.B., Mahoney M.W., Pollock G. and Rhodes C.G. : “*Intergranular Corrosion Following Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 7075-T651*“, Corrosion, Vol.55, No.12, 1999, pp.1127-1135.
- [200] Charit I., Mishra R. and Mahoney M. : “*Multi –sheet structures in 7475 alluminium by friction stir welding in concept with post-weld superplastic forming* ”, Scripta Materialia, Vol.47, 2002, pp.631-636.
- [201] Kuhlman G.W. : “*Forging of Aluminium Alloys* “, ASM Handbook, Vol.14A, pp.299-312 (DOI :10.1361/asmhba0003996)
- [202] Sato Y., Urata M., Kokawa H.: “*Parametrs controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminium alloy 6063*“, Metalurgical & Materials Transactions A, Vol.33, No.3, 2002, pp.625-635.
- [203] Song M. : “*Numerical simulation of heat transfer in friction stir welding*“, PhD Thesis, Southern Methodist University, Dallas, USA, 2003, (distributed on CD).
- [204] Charit I. , Mishra R.: “*Higf strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al Aloy via friction stir processing*“, Materials Science and Engineering A, Vol.359 ,2003, pp.290-296.
- [205] Colligan K.J. and Pickens J.R.: “*Friction stir Welding of Thick Section Aluminium Alloys*“, Consurent Technologies Corporation, PA 15904-1935, 2015, USA.
- [206] Veljić D., Rakin M., Perović M., Međo B., Sedmak A., Bajić D. : “*Friction Stir Welding alloy 2024- numerical modelling*“, Conference EUROJOIN 8, Hrvatska, Pula,2012.
- [207] Charit I. : “*Microstrustural and Superplastic Characteristics of Friction stir Processed Aluminium Alloys*“, PhD Thesis, University of Missoki, 2004, (distibuted on CD).

8.0 LITERATURA

- [208] Linder S. : “*Friction stir welding of aluminium armor for the AAV*”, Edison Welding Institute, 2015.
- [209] Eramah A, Rakin M., Veljić D., Tadić S., Radović N, Zrilić M. Perović M.: “*Influence of Friction Stir Welding paramerts on properties of 2024 T3 aluminium alloys joins*“, Thermal Science, Vol.18,2014, pp.521-528.
- [210] Sutton M.A., Yang B., Reynolds A.P., Taylor R. : ”*Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminium*”, Materials Science and Engineering A, Vol.323, No.23, 2002, pp.160-166.
- [211] Perović M., Baloš S., Kozak D., Bajić D., Vuherer T. : ”*Uticao kinenematskih faktora zavarivanja trenjem miješanjem na karakteristike zavarenog spoja kovanih ploča od legure aluminijuma EN AW 7049A*”, Tehnički vjesnik, Vol.24, No.3, 2017, pp.723-728.
- [212] Karlsen M., Frigard O., Hjelen J., Grong O.: “*SEM-EBSD characterisation of the deformation microstrucrure in friction stir welded 2024 T351 aluminium alloy*“, Thermec 2003, Vol.426-432, 2003, pp.2861-2866.
- [213] Sutton M., Reynolds A., Yang B., Taylor R. : “*Mixed mode I/II fracture and microfracture for 2024-T3 friction stir welds*“, Engineering Fracture Mechanics, Vol.70, No.15, 2003, pp.2215-2234.
- [214] Huang G., Kouc S.”*Partiality melted zone in aluminium welds-liquation and directioal Solidafikacion*”, Welding Research Supplement, Vol.10, No.3, 2000, pp.113-129.
- [215] Kroninger H.R., Reynolds A.P.: ”*R-Curve Behavior of Friction Stir Welds in Aluminium –Lithium Alloy 2195*”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2002., Vol.25, No.3, pp.283-290.
- [216] Živković A., Dascau H., Radisavljević I, Perović M., Sedmak A., Petrovski B., : “*The effect of tool geometry on the qualitu of Al 2024 friction stir welded joint*“, 8 th International Conference Structural integrity of welded structure, 04-05.11.2010, Timisoura, Romania.
- [217] Sato YS., Park S.H.C., Kokawa H.: ”*Microstructure factors governing hardnes in friction stir welds of solid hardenend Al aloys*”, Metalurgical and Materrials Transaction A: Physical and Materials Science,2001.Vol.32A.,No.12.,pp.3033-3042
- [218] Sato YS. and Kokawa H.: ”*Distribution of Tensile Property and Mocrestrukture in Friction Stir Weld of 6063 aluminium*”, Metall.Mater.Trans. A, Vol.32A, No.12, pp.3023-3031
- [219] Chao Y.J., Wang Y., Miller K.W.: “ *Effect of friction stir welding on dinamic properties of AA2024-T3 and AA7075-T7351* ”, Welding Journal, Vol.80, No.8, 2001, pp.196-200.

8.0 LITERATURA

- [220] Paglia C.S., Caroll M.C., Pitts B.C., Buchheit R.G. : “*Strength, corrosion and environmentally assisted cracking of a 7075-T6 friction stir weld*“, Materials Science Forum, Vol.396, No.3, 2002, pp.1677-1684.
- [221] Reynolds A.P., Lockwood W., Tomaz.B.: “*Mechanical response of friction stir welded A2024: Experiment and modeling*”, Materials Science and Engineering A, Vol.323, No.1-2, 2002, pp.348-353.
- [222] Khandkar M.Z.H, Khan J.A. and Reynolds A.P.: “*Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model*”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.8, No.3, 2003, pp.165-174.
- [223] Khandkar M.Z.H, Khan J.A., Reynolds A.P. and Sutton M.A.: “*Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals*“, Journal of Materials Processing Tehnology, Vol.174, pp.195-203.
- [224] Hamilton By C., Dymek S. and Sommers A.: “*Characteristical Temperature Curves for Aluminium Alloys during Friction Sti Welding*“, Welding Research, Vol.89, 2010, pp.189-194.
- [225] Dolby R.E., Johnson K.I. and Thomas W.M.: “*The Joining of Aluminium of Exstusions*”, Aluminium Two Thousand, 5th World Congress, 2003, Rome.
- [226] Bolser R., Talwar R., Lederich R.: “*Mechanical properies of friction stir welded 7050-T7451*”, International Institute of Welding Pre-Assemblu Meeting on Friction Stir Welding, Nagoya University, Japan, 2004, pp.71-75.
- [227] Jata K.V., Sankar K.K., Ruscahau J.J.: “*Friction Stir Welding effects on microstructure and fatigue of aluminium alloy 7050-T7451*”, Metalurgical and Materials Transaction A, 2000 , Vol.31, No.9, pp.2181-2192.
- [228] Su J.Q., Nelson T.W., Sterling C.J.: “*Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminium Allous*”, Materials Science and Engineering, Vol.A405, 2005, pp.277-286.
- [229] Denquan A., Allehaux D., Campagnac M.H, Lapasset G. : “*Relationship between microstructural variations and properties of a friction stir welded 6056 aluminium alloy*“, Welding in the World, Vol.46, No.11/12, 2002, pp. 14-19.
- [230] Khandkar M.Z.H., Khan J.A. & Reynolds A.P. : “*Prediction of Temperaturte Distribution and Thermal History during Friction Stir Welding: An Input Torque Based Model*”, Welding & Joining, Vol.8, No.3, 2003, pp.1654-1659.
- [231] Kazi S. : “*A study on Joining of similar and desimilar commercial aluminim Alloys by friction stir welding*”, PhD Thesis, University of Texas at el Paso, 2001, (distibuted on CD).

8.0 LITERATURA

- [232] Nicolas M., Werenskiold J.C., Deschamps A., Bley F., Livet F, Simon J.P. : “*Study of precipitate microstructures in the heat-affected zones of a welded Al-Zn-Mg alloy*”, Euromat, 2001, Rimini, Italy.
- [233] Nicolas M., Deschamps A. : “*Characterisation and modelling of precipitate evolution an Al-Zn-Mg alloy during non isothermal heat treatments*“, Acta Materialia, Vol.51, No.20, 2003, pp.6077-6094.
- [234] Shercliff H., Russell M., Taylor A. and Dickerson T. : “*Microstructural medelling in friction stir welding of 2000 series aluminium alloys*”, Mechanique & Industries, Vol.6,2005, pp.25-35, (DOI:10.1051/meca:2005004).
- [235] Hassan A.A., Norman A.F. and Prangnelli P.B.: “*The stabibility of the nugget zone grain structure in AA7010 alloy friction stir welds during solution treatment*“, Materials Scienc Forum, Vol. 396, No.3, pp.1549-1554.
- [236] Pasta S.: “*Fatigue charactrerizacion of friction stir welding*”, Tesi di dottorato, University Palermo, 2008, (distributd on CD).
- [237] Hagstrom J., Sandstrom R. : ”*Fatigue properties of welded joints in exstruded AlMgSi-alloys*”, Royal Institute of Tecnology, Sweden,1997, (ISSN 0282-9770).
- [238] Genevois C., Dechamps A., Vacher P. : “*Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stie welds*”, Materials science and Engineering A, Vol.415, 2006, pp.162-170.
- [239] Liu H., Fuiji H., Maeda M., Nogi K. : “*Tensile properies and fracture location of friction stir welded joints 2017-T351 alluminim alloy* “, Journal of Materials Processing Technology, Vol 142, 2003, pp.692-696.
- [240] Troeger L.P., Starke E.A. : “*Microstructural and Mechanical Characterizacion of a Superplastic 6xxx Aluminium Alloy*”, Materials Science and Engineering, Vol.A277, 2000, pp-102-113.
- [241] Jene T., Dobman G., Wagner G., Eifler D. : “*Oxide fragments in friction welds-distribution and effects on crack initiation*”, VIth ISFSW, Saint-Sauveur, 2006, Canada, (distributed by TWI on CD).
- [242] Hori H., Makita S., Minamida T., Watanaba E., Anzai E. and Hino H.: ”*Joints strength of Sheet Welded by Friction Stir Welding* ”, IIIrd ISFSW, 2001, Kobe, Japan (distributed by TWI on CD).
- [243] Bussu G.: ”*Damage tolerance of welded aluminium aircraft structure*”, PhD Thesis, Cranfield University, 2000,(distributed on CD).
- [244] Bussu G., Irving E.: ”*Static and Fatigue Perfomance of Friction Stir Weldd 2024-T351 Aluminium Joints*”, Ist ISFSW, Thouasnd Oaks,1999, California(distributed by TWI on CD).

8.0 LITERATURA

- [245] Kallman L. & Magnusson L.: "*Mechanical properties of friction stir welds in thin sheet of aluminium 2024,6013 and 7475*", IInd ISFSW, 2000, Gothenburg, Sweden, (distributed by TWI on CD).
- [246] Kim Y.J. and Schwalbe K.H.: "*Mis-match Effect on Plastic Yield Loads in Idealised weldments II Heat Affected Zone Cracks*", Engineering Fracture Mechanics, 2001, Vol.68, No.2, pp.183-189.
- [247] Hori H., Makita S., Hinto H.: "*Friction Stir Welding of Rolling Stock for Subway*", Ist ISFSW, 1999., Rockwell Science Center, Thousand Oaks, California (distributed by TWI on CD).
- [248] Biallas G., Dalkilic S.,: "*FSW joints of an Al MMC a monolithic Al alloy*", VIth ISFSW, 2006, Sant-Sauveur, Canada (distributed by TWI on CD).
- [249] Jayaraman M. and et. : "*Optimizacion of process parameters for friction stir wlding of sact aluminium alloy*", Journal of Scientific & Industrial Researh, 2009, Vol.68, pp.36-43.
- [250] Pao P.S., Lee E., Feng C.R., Jones H.N., Moon D.W.: "*Corrosion fatigue in FSW and GMA welded Al 2519*", Vth ISFSW(Poster Presentations), 2003, Park City, Utah, USA (distributed by TWI on CD).
- [251] *Tehnički izvještaj o metalografskim nalazima kod legure PD 33*, Arhiva Sektora kontrole kvaliteta AD Kombinata aluminijuma , Podgorica, 2010.
- [252] *Izveštaj o ispitivanju dostavljenih uzoraka alatnog čelika*, Institut za crnu metalurgiju ad, Nikšić, 2011.
- [253] *Tehnički izvještaj o mehaničkim karakteristikama legure PD33*, OOUR Kovačnica KAT Titograd, Titograd, 1985.
- [254] Baloš S., Šidanin L.: "*Effect of tuneeling defects on the Joint strength efficiency obtained with FSW*", Materiali in tehnologije, Vol.48, 2014, pp.491-496.
- [255] Rice J.R.: "*A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and crack*", Journal of Applied Mechanich, Vol.35, 1968, pp. 379-386.
- [256] Zavratnik B.: "*Določitev lomnomehanskih lasnosti zvara na aluminijevi zlitini 7049A*", Magistrarsko delo, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2016, (<https://dk.um.si>).
- [257] Gerić K.: "*Prsline u zavarenim spojevima*", Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Srbija, Novi Sad, 2005, (ISBN 86-85211-28-X).
- [258] Čulafić V.: "*Uvod u mehaniku loma*", Monografija, Mašinski fakultet, SR Jugoslavija, Podgorica, 1999, (ISBN 86-81039-36-9).
- [259] Vratnica M.: "*Mikrostrukturna i mehanička svojstva visokočvrstih Al-Zn-Mg-Cu legura različitog stepena čistoće*", Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2005.
- [260] Oruč M., Sunulahpašić R.: "*Lomovi i osnovi mehanike loma*", Fakultet za metalurgiju i materijale, BiH, Zenica, 2009, (ISBN 978-9958-785-15-3).

8.0 LITERATURA

- [261] Živković A.: “*Uticaj geometrije alata za postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al 2024*“, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2011.
- [262] Radisavljević I.: “*Uticaj parametara zavarivanja na svojstva zavarenih spojeva aluminijumskih legura dobijenih postupkom zavarivanja trenjem alatom*”, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2014.
- [263] Hattingh D., Nieker T., Blignault C., Kruger G. : “*Analisis of the FSW Force Footprint and its Relationship with Process Parameters to Optimise Weld Performance and Tool Design*”, Microstructure and Mechanical Properties are Reported, Welding Journal, Vol 82-1, 2003, pp.1-9.
- [264] Benavides S.: “*Low temperature friction stir welding of 2024-Al*“, Doctoral Thesis, Department of Metallurgical and Materials Engineering, The University of Texas at El Paso, 2000, (distributed on CD).
- [265] Tang W., Guo X.: “*Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding*”, Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 7, 1998, pp. 163-172.
- [266] Flores O., Muur L., and McClure J.: “*Microstructural Issues in a Friction Stir Velded Aluminium Alloy*”, Scripta Materialia, Vol. 38-5, 1998, pp.703-708.
- [267] Reynolds A., Lockwood W. and Seidel T.: “*Processing Property Corelation in Friction Stir Weldsin Aluminijum Alloys*”, Physical and Mechanical Properties, Materials Science Forum, Vol.331, No.3, 2000, pp. 1719-1724.
- [268] Hashimoto T., Jyogan S., Nakata K.: “*FSW Joints of High Strength Aluminijum Alloy*”, 1st ISFSW, Roskwell Science Center, Thousan Oaks, USA, 14-19 June 1999, (distributed by TWI on CD).
- [269] Yan Y.: “*Fundamental study in FSW Processing and FSW Process structure-property Relationship For AA2024 and 2524*”, PhD thesis, University of south Carolina, 2004, (distributed on CD) .
- [270] Vuherer T., Perović M., Bajić D., Baloš S. : “*Influence of The Welding Speed on FSW Joints on 7049A Aluminium Alloy*“, 9. International scietific - profesional conference SBW 2107, Slavonski Brod, 25-27.10.2017, pp.20-31.
- [271] Rakin M.: “*Lokalni pristup žilavom lomu metalnih materijala*”, Monografija, Srbija, Beograd, 2009, (ISBN 978-86-87183-08-7).