



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



Miodrag D. Milčić

**ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA
ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM NA
DINAMIČKU IZDRŽLJIVOST ZAVARENOG
SPOJA LEGURE ALUMINIJUMA 2024 T351**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2020.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Miodrag D. Milčić

**A RESEARCH ON INFLUENCE OF THE
FRICTION STIR WELDING'S PARAMETERS ON
WELDED JOINT'S FATIGUE STRENGTH AT AA
2024 T351**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2020.

ZAHVALNOST

Ova doktorska disertacija je nastala kao deo istraživanja u okviru bilateralnog projekta naučno-tehnološke saradnje između Republike Srbije i Republike Slovenije broj BI-RS/14-15-029: "Fatigue assessment of friction stir welded joints", rukovodioca prof. dr Dragana Milčića sa strane Republike Srbije i prof. dr Janeza Krambergera sa strane Republike Slovenije.

Izradom doktorske disertacije rukovodili su mentor prof. dr Boban Anđelković i komentor prof. dr Janez Kramberger, kojima se zahvaljujem za pružen naučni nadzor u toku radu.

Zahvaljujem se prof. dr Miroslavu Mijajloviću i naučnom savetniku dr Vencislavu Grabulovu na korisnim sugestijama tokom pisanja doktorske disertacije. Zahvaljujem se docentu dr Milanu Baniću na korisnim sugestijama pri eksperimentalnom i numeričkom istraživanju.

Deo eksperimentalnih istraživanja vezanih za ispitivanje mehanike loma i brzine rasta zamorne prsline je urađen u laboratoriji za zavarivanje na Mašinskom fakultetu u Mariboru, te posebnu zahvalnost dugujem docentu dr Tomažu Vuhereru.

Želim da izrazim veliku zahvalnost prof. dr Zijahu Burziću, načelniku Instituta za ispitivanje materijala na Vojnotehničkom institutu na svesrdnoj pomoći oko ispitivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva. Takođe, veliku zahvalnost dugujem docentu dr Igoru Radisavljeviću, na pomoći oko ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva, kao i docentu dr Ljubici Radović na pomoći oko mikrostrukturnih ispitivanja zavarenih spojeva primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM).

Veliku zahvalnost dugujem dr Aleksandru Živkoviću. Njegovim alatom su vršena eksperimentalna zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351. Veliku zahvalnost dugujem i rukovodiocu laboratorije za mehanizme i mašine mr Slobodanu Jovanoviću na pomoći oko merenja pri vršenju eksperimenta zamaranja zavarenih spojeva na elektro-dinamičkom vibracionom stolu.

Želim da izrazim zahvalnost i Jovanu Radovanović, dipl. maš. inženjer iz firme "AMM Manufacturing", koji posluje u okviru "MIND Grupe". Ispitivanje zavarenih spojeva na savijanje je rađeno u firmi "Milanović inženjering" sada "Siemens mobility".

Zahvalnost dugujem nastavnicima srednje tehničke škole "Rade Metalac" u Leskovcu, Slavku Tomiću i Marku Toniću, na velikoj pomoći oko izrade epruveta, koje su korišćene za dinamička ispitivanja na elektro-vibracionom stolu. Zahvalnost dugujem i Vojkanu Nojneru,

dipl. maš. inženjeru u firmi Goša FOM na izradi držača epruveta koji je korišćen u eksperimentima.

Konačno, najveću zahvalnost dugujem mojim roditeljima, na bezrezervnoj podršci svih ovih godina.

I naravno, supruzi Mariji, sinovima Matiji i Stefanu hvala na ljubavi i snazi koju su mi davali tokom celokupnog procesa izrade doktorske disertacije, bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Boban Anđelković, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet dr Janez Kramberger, vanredni profesor, Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet
Naslov:	Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351
Rezime:	<p>Da bi se osigurao kvalitetan zavareni spoj, a time i siguran rad i visoka pouzdanost zavarenih delova ili konstrukcije ostvarene zavarivanjem trenjem sa mešanjem neophodno je odabrati optimalne parametre zavarivanja. Parametri zavarivanja trenjem sa mešanjem značajno utiču na strukturu zavarenog spoja, a time i na mehanička svojstva zavarenog spoja.</p> <p>Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem je vršeno na pločama debljine 6 mm od aluminijumske legure AA 2024 T351. Na kvalitet zavarenog spoja dominantno utiču broj obrtaja alata n i brzina zavarivanja v. U ovom istraživanju usvojeno je da broj obrtaja alata bude konstantan $n=750 \text{ min}^{-1}$, a brzina zavarivanja menjana ($v=73, 116$ i 150 mm/min). Na svim zavarenim radnim komadima, vizualnom metodom nisu utvrđene nepravilnosti lica i korena zavarenih uzoraka. Ni na jednom zavarenom uzorku radiografskim ispitivanjem nisu ustanovljene greške u zavarenom spoju.</p> <p>Sprovedena su eksperimentalna istraživanja makro i mikro strukture zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja, a zatim su sprovedena ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva: ispitivanje zateznih svojstava, ispitivanje svojstava na savijanje, ispitivanje udarne žilavosti, ispitivanje parametara mehanike loma, ispitivanje brzine rasta zamorne prsline i ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva.</p> <p>Efikasnost zavarenih spojeva za parametar zavarivanja B-750/116 je gotovo 100 %, odnosno zatezna čvrstoća zavarenog spoja je približno jednaka zateznoj čvrstoći osnovnog metala. Zavareni spojevi nisu pogodni za naprezanja na savijanje saglasno rezultatima ispitivanja na savijanje u uslovima statičkog i dinamičkog opterećenja.</p> <p>Ispitivanjem udarne žilavosti zavarenih spojeva pomoću instrumentiranog klatna, dobijene su prilično niske vrednosti energije udara za sve zavarene spojeve sa generisanim zarezom u različitim položajima strukture zavarenih spojeva.</p> <p>Ispitivanjem parametara mehanike loma, za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja, žilavosti loma K_{Ic}, najveća je na povratnoj strani zavarenog spoja, a najmanja na sredini spoja. Najveća žilavost loma je dobijena za parametre zavarivanja B-750/116.</p> <p>Ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva su vršena na servo-hidrauličkom pulzatoru i elektro-dinamičkom vibracionom stolu. Najbolja svojstva dinamičke izdržljivosti su pokazali zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja B-750/116.</p> <p>Na osnovu opsežnih eksperimentalnih istraživanja, generalno, najbolja strukturna, a samim tim i mehanička svojstva sučeonih zavarenih spojeva legure aluminijuma AA 2024 T351 su ostvareni parametrima zavarivanja B-750/116, odnosno sa odnosom parametara zavarivanja $n/v=6,47$.</p>

Naučna oblast:	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Mašinski elementi i konstrukcije, zavarivanje
Ključne reči:	Zavarivanje trenjem sa mešanjem, Legura aluminijuma 2024 T351, Parametri zavarivanja, Mehanička svojstva zavarenih spojeva, Visokociklični zamor, Elasto-plastična mehanika loma, Zamorna prslina
UDK:	621.791.1::[620.178.3:669.71.055(043.3)
CERIF klasifikacija:	T130; T210; T450
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	dr Boban Anđelković, full professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering dr Janez Kramberger, associate professor, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering
----------------------	---

Title:	A research on influence of the friction stir welding's parameters on welded joint's fatigue strength at AA 2024 T351
--------	--

Abstract:	<p>In order to ensure a quality welded joint, and thus safe operation and high reliability of the welded part or structure achieved by friction stir welding, it is necessary to select the optimal welding parameters. The parameters of friction stir welding significantly affect the structure of the welded joint, and thus the mechanical properties of the welded joint.</p> <p>Investigation of the influence of friction welding parameters was performed on 6 mm thick plates of aluminum alloy AA 2024 T351. The quality of the welded joint is predominantly influenced by the number of tool revolutions speed n and the welding speed v. In this research, it was adopted that the number of tool revolutions be constant $n=750$ rpm, and the welding speed changed ($v=73, 116$ and 150 mm / min). Imperfections of the face and roots of the welded specimens were not determined on all welded work pieces by the visual method. Not a single welded sample, examined by radiographic examination, have not been founded welding defects.</p> <p>Experimental investigations of the macro and micro-structure of welded joints achieved by different welding parameters were performed, followed by tests of mechanical properties of welded joints: tensile testing, bending testing, Charpy impact testing, fracture mechanics parameters testing, fatigue crack growth rate and fatigue testing of welded joints.</p> <p>The efficiency of welded joints for welding parameter B-750/116 is almost 100%, that is the tensile strength of the welded joint is approximately equal to the tensile strength of the base metal. Welded joints are not suitable for bending stresses according to the results of bending tests under static and dynamic loading conditions. By Charpy impact testing of welded joints using an instrumented pendulum, fairly low values of impact energy were obtained for all welded joints with generated notch in different positions of the welded joint structure.</p> <p>By examining the parameters of fracture mechanics, for welded joints achieved by different welding parameters, the fracture toughness K_{Ic} is the highest on the retreating side of the welded joint, and the lowest in the middle of the joint. The highest fracture toughness was obtained for welding parameters B-750/116.</p> <p>Fatigue tests of welded joints were performed on a servo-hydraulic pulsator and on electrodynamic shaker. The best properties of fatigue strength were shown by welded joints achieved by welding parameters B-750/116.</p> <p>Based on extensive experimental research, in general, the best structural, and thus mechanical properties of butt welded joints of aluminum alloy AA 2024 T351 were achieved by welding parameters B-750/116, that is with the ratio of welding parameters $n/v=6.47$.</p>
-----------	---

Scientific Field:	Mechanical engineering
Scientific Discipline:	Mechanical elements and constructions, welding

Key words:	Friction stir welding, Aluminum alloy 2024 T351, Welding parameters, Mechanical properties of welded joints, High-cycle fatigue, Elastic-plastic fracture mechanics, Fatigue crack.
------------	---

UDK:	621.791.1.:[620.178.3:669.71.055(043.3)]
------	--

CERIF Classification:	T130; T210; T450
-----------------------	------------------

Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND
--------------------------------	--------------------

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA	I
SPISAK TABELA	VII
1. UVOD	8
1.1. Ciljevi.....	10
1.2. Metodologija.....	11
2. TEORIJSKA RAZMATRANJA	14
2.1. SVOJSTVA, ZAVARLJIVOST I PRIMENA LEGURA ALUMINIJUMA	14
2.1.1. Legure serije 2XXX.....	17
2.1.2. Zavarljivost aluminijuma i njegovih legura.....	17
2.2. ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM.....	18
2.2.1. Osnove zavarivanja trenjem sa mešanjem.....	20
2.2.2. Alati za zavarivanje trenjem sa mešanjem.....	22
2.2.3. Vrste zavarenih spojeva koji se ostvaruju postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem	24
2.2.4. Generisanje toplote	25
2.2.5. Parametri zavarivanja	28
2.2.5.1. Broj obrtaja i brzina translatornog kretanja alata	28
2.2.5.2. Ugao nagiba alata i dubina prodiranja u materijal.....	30
2.2.5.3. Aksijalna sila	31
2.2.6. Mikrostruktura zavarenog spoja	32
2.2.7. Greške u zavarenim spojevima.....	33
2.2.8. Varijante zavarivanja trenjem sa mešanjem	34
2.2.9. Istraživanje zavarivanja trenjem sa mešanjem u Srbiji i okruženju	35
2.3. ZAMOR MATERIJALA	36
2.3.1. Karakterizacija procesa zamora materijala.....	37
2.3.2. S-N kriva (Velerova kriva)	40
2.4. MEHANIKA LOMA.....	44
2.4.1. Grifitova teorija	45
2.4.2. Linearno-elastična mehanika loma	47

2.4.3. Elasto-plastična mehanika loma	51
2.4.3.1. Otvaranje vrha prsline CTOD.....	53
2.4.3.2 Merenje otvaranja prsline	56
2.4.3.3. J-integral	56
2.5. BRZINA RASTA ZAMORNE PRSLINE	59
2.6. UDARNA ŽILAVOST MATERIJALA.....	62
3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	59
3.1. VIZUALNO ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA	62
3.2. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA.....	63
3.3. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA	63
3.3.1. Makrostrukturna ispitivanja.....	63
3.3.2. Mikrostrukturna ispitivanja	63
3.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....	64
3.5. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA	65
3.5.1. Određivanje zateznih svojstava jednoosnim zatezanjem.....	65
3.5.2. Ispitivanje savijanjem	66
3.5.3. Ispitivanje udarne žilavosti.....	67
3.5.3.1. Fraktografsko ispitivanje pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM)	71
3.6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA	72
3.6.1. Proračun faktora intenziteta napona K	80
3.6.2. Proračun J-integrala.....	81
3.6.3. Tehnika normalizacije podataka.....	83
3.6.4. Kriva otpornosti J- Δa	86
3.6.5. Kriva otpornosti CTOD (δ)- Δa	88
3.7. Eksperimentalno određivanje brzine rasta zamorne prsline	90
3.8. Eksperimentalno određivanje dinamičke izdržljivosti.....	92
3.8.1 Ispitivanje dinamičke izdržljivosti na servo-hidrauličnom pulzatoru	92
3.8.2. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti na elektro-dinamičkom vibracionom stolu ...	95
3.8.2.1. Uprošćeni analitički proračun napona u zavarenom spoju epruvete	99
3.8.2.2. Numerička analiza napona u zavarenom spoju epruvete.....	101

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA	108
4.1. Vizuelno ispitivanje	108
4.2. Radiografsko ispitivanje	108
4.3. Makrostruktura zavarenog spoja.....	108
4.4. Mikrostruktura zavarenog spoja	110
4.5. Rezultati ispitivanja tvrdoće	114
4.6. Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva	118
4.7. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava zavarenih spojeva	122
4.8. Rezultati ispitivanja udarne žilavosti zavarenih spojeva	127
4.8.1. SEM analiza prelomnih površina.....	136
4.9. Rezultati ispitivanja parametara mehanike loma	140
4.9.1. SEM fraktografska analiza prelomnih površina SENB epruveta	164
4.10. Rezultati brzine rasta zamorne prsline.....	169
4.11. Rezultati ispitivanje dinamičke izdržljivosti na elektro-dinamičkom vibracionom stolu	173
4.12. Rezultati ispitivanja dinamičke izdržljivosti na servohidrauličkom pulzatoru.....	178
5. ZAKLJUČAK.....	183
LITERATURA	189
PRILOG A	201
PRILOG B	209
PRILOG C	218
BIOGRAFIJA AUTORA.....	220

SPISAK SLIKA

Slika	Naziv
2.1	<i>Primena zavarivanja trenjem sa mešanjem u različitim industrijama</i>
2.2	<i>Šematski prikaz zavarivanja trenjem sa mešanjem</i>
2.3	<i>Šematski prikaz principa zavarivanja trenjem sa mešanjem pri ostvarivanju sučeonog spoja</i>
2.4	<i>Mešanje materijala u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem</i>
2.5	<i>Rame alata</i>
2.6	<i>Oblici cilindričnih trnova bez navoja i sa urezanim navojem</i>
2.7	<i>Oblici konusnih trnova bez i sa urezanim navojem</i>
2.8	<i>Oblici ZTM alata koje je razvio institut za zavarivanje TWI</i>
2.9	<i>Vrste ZTM zavarenih spojeva</i>
2.10	<i>Temperaturno polje zadobijeno numeričkom simulacijom</i>
2.11	<i>Ugao nagiba alata</i>
2.12	<i>Mikrostruktura ZTM zavarenog spoja</i>
2.13	<i>Zavarivanje trenjem sa mešanjem sa alatom u obliku kalema</i>
2.14	<i>Slučajevi opterećenja za različite vrednosti koeficijenta asimetrije ciklusa R</i>
2.15	<i>Faze razvoja zamorne prsline u životnom veku konstrukcije</i>
2.16	<i>Inicijalizacija prsline – stvaranje intruzija i ekstruzija</i>
2.17	<i>Izgled površine preloma usled zamora materijala</i>
2.18	<i>Faze zamornog veka</i>
2.19	<i>Zavisnost vrednosti amplitudnog napona i broja ciklusa do loma</i>
2.20	<i>S-N kriva (Velerov dijagram)</i>
2.21	<i>Velerov dijagram sa logaritamskom podelom osa</i>
2.22	<i>Velerova kriva i faze zamornog veka</i>
2.23	<i>Izgled prelomne površine za a) ravno stanje deformacija, b) ravno stanje napona</i>
2.24	<i>Primer diskontinuiteta u materijalu u vidu eliptičnog otvora</i>
2.25	<i>Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma</i>
2.26	<i>Komponente tenzora napona oko vrha prsline za mod I</i>
2.27	<i>Žilavost loma u funkciji debljine ploče</i>
2.28	<i>Upoređenje napona ispred prsline za krte i žilave materijala</i>
2.29	<i>Formiranje plastične zone na vrhu prsline</i>
2.30	<i>Koncept merenja otvaranja vrha prsline CTOD na osnovu merenja otvaranja usta prsline CMOD</i>
2.31	<i>Šema postepenog otvaranja prsline pri rastućem opterećenju</i>
2.32	<i>Dijagrami sila-otvaranje prsline pri određivanju žilavosti loma</i>
2.33	<i>Geometrijske zavisnosti pri deformaciji epruvete za određivanje otvaranja prsline δ</i>
2.34	<i>Proizvoljna putanja integracije za J integral</i>
2.35	<i>Šematski prikaz zavisnosti J-Δa pri stabilnom razvoju prsline</i>
2.36	<i>Dužina prsline kao funkcija broja ciklusa opterećenja</i>
2.37	<i>Ponašanje brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od ΔK</i>
2.38	<i>Šematski prikaz ispitivanja po Šarpiju</i>
2.39	<i>Epruveta za udarna ispitivanja Šarpijevim klatnom</i>
2.40	<i>Karakteristični dijagrami sila – put</i>

- 2.41 *Dijagram udarna sila - vreme, dobijen merenjem na instrumentiranom Charpy-jevom klatnu*
- 3.1 *Algoritam eksperimentalne metodologije utvrđivanja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem kojim se dobijaju najbolji zavareni spojevi sa aspekta mehaničkih svojstava*
- 3.2 *Primena alatne mašine – glodalice ALG-200 prilagođene za zavarivanje ploča postupkom trenjem sa mešanjem*
- 3.3 *Geometrija alata za zavarivanje trenjem sa mešanjem*
- 3.4 *Sučeeono zavarene ploče ZTM postupkom*
- 3.5 *Šematski prikaz mesta merenja tvrdoće*
- 3.6 *Plan pripreme izrada epruveta za ispitivanje zavarenog spoja i epruvete za ispitivanje zateznih svojstava*
- 3.7 *Dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje*
- 3.8 *Šematski prikaz ispitivanje savojnih karakteristika zavarenog spoja*
- 3.9 *Instrumentirano Šarpijevo klatno Tinius Olsen nazivne energije 300 J*
- 3.10 *Šematski prikaz instrumentiranog Šarpijevog klatna*
- 3.11 *Procedura ispitivanja udarne žilavosti*
- 3.12 *Dimenzije epruveta za ispitivanje udarne žilavosti testom prema Šarpiju*
- 3.13 *Pozicija izrade zareza na epruvetama za ispitivanje udarne žilavosti po Šarpiju*
- 3.14 *Skenirajući elektronski mikroskop JEOL JSM 6610LV*
- 3.15 *Oblik i dimenzije SENB epruveta prema ASTM E 1820 koja je korišćena za ispitivanje*
- 3.16 *Šematski prikaz algoritma ispitivanja parametara mehanike loma kod zavarenih spojeva prema BS 7448 - deo 2*
- 3.17 *Pozicija izrade-ureživanja zareza na SENB epruvetama*
- 3.18 *Visokofrekventni pulzator CRACKTRONIC*
- 3.19 *Stegnuta epruveta na mašini za generisanje zamorne prsline*
- 3.20 *Obeležene granice između kojih treba da se nađe dužina zamorne prsline*
- 3.21 *Širenje prsline*
- 3.22 *Šematski prikaz savijanja SENB epruvete do loma*
- 3.23 *Savijanje SENB epruvete sa postavljenim ekstenziometrom na vrhu usana epruvete*
- 3.24 *Prelomna površina*
- 3.25 *Izgled epruveta nakon završetka ispitivanja*
- 3.26 *Dijagram sila-otvaranje usta prsline F-CMOD (v)*
- 3.27 *Linearni deo dijagrama F-CMOD*
- 3.28 *Dijagram F-CMOD*
- 3.29 *Dijagram normalizovana sila-normalizovani plastični deo otvaranja prsline*
- 3.30 *Fitovanje analitičkom funkcijom normalizacije*
- 3.31 *Tipična kriva otpornosti $J-\Delta a$*
- 3.32 *Fitovanje krive $(\ln(J)-\Delta a)$ analitičkom funkcijom normalizacije*
- 3.33 *Prikaz postupka za određivanje kritične vrednosti J_{Ic} prema standardu ASTM E 1820*
- 3.34 *Fitovanje analitičkom funkcijom normalizacije*
- 3.35 *Prikaz postupka za određivanje δ_{Ic} prema standardu ASTM E 1820*
- 3.36 *a) Mašina za zamaranje- cracktronic sa fraktomatom, b) epruveta sa zalepljenom mernom trakom, c) epruveta nakon završenog ispitivanja*
- 3.37 *Servohidraulički pulzator SHIMADZU EHF-EV101k3-070-OA*
- 3.38 *Šematski prikaz servohidrauličkog pulzatora*
- 3.39 *Dimenzije epruveta za ispitivanje na zamaranje*

- 3.40 *Deo izrađenih epruveta spremnih za ispitivanje na zamaranje*
- 3.41 *Elektro-dinamički vibracioni sto SENTEK DYNAMICS serije M*
- 3.42 *Oblik i dimenzije epruvete*
- 3.43 *Set izrađenih epruveta*
- 3.44 *Virtuelni model sklopa fiksatora i epruveta opterećenih tegovima*
- 3.45 *Šematski prikaz fiksirane epruvete opterećena tegom mase 933g*
- 3.46 *Oscilatorni model epruvete opterećene tegom*
- 3.47 *Prvi oblik sopstvenih oscilacija epruvete opterećene tegom*
- 3.48 *3D model fiksatora sa 1 epruvetom*
- 3.49 *Diskretizovani model fiksatora sa 1 epruvetom*
- 3.50 *Definisano ograničenje i pomeranje platforme elektro-dinamičkog vibracionog stola*
- 3.51 *Raspodela Von Mises napona sklopa fiksatora, epruvete i tega pri statičkoj strukturnoj analizi*
- 3.52 *Raspodela normalnog napona epruvete pri oscilacijama frekvencije 20 Hz*
- 3.53 *Dijagram normalnih napona na sredini zavarenog spoja u zavisnosti od frekvencije*
- 3.54 *Elektro-dinamički vibracioni sto sa fiksatorom i istovremenom zamaranju 3 epruvete*
- 4.1 *Rezultati radiografskog ispitivanja zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja*
- 4.2 *Makroskopski izgled poprečnog preseka zavarenih spojeva*
- 4.3 *Skrivena greška tipa neprovar na korenoj strani spoja*
- 4.4 *Makrostruktura poprečnih preseka spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja*
- 4.5 *Mikrostruktura zavarenog spoja A- 750/73*
- 4.6 *Mikrostruktura zavarenog spoja B- 750/116*
- 4.7 *Mikrostruktura zavarenog spoja C- 750/150*
- 4.8 *Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima 750 min⁻¹/73 mm/min*
- 4.9 *Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima 750 min⁻¹/116 mm/min*
- 4.10 *Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima 750 min⁻¹/150 mm/min*
- 4.11 *Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na rastojanju 1 mm od lica spoja za različite parametre zavarivanja*
- 4.12 *Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na sredini spoja za različite parametre zavarivanja*
- 4.13 *Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na rastojanju 1 mm od korena spoja za različite parametre zavarivanja*
- 4.14 *Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja A-750/73*
- 4.15 *Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja B-750/116*
- 4.16 *Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja C-750/150*
- 4.17 *Srednje vrednosti granice tečenja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja*
- 4.18 *Srednje vrednosti zatezne čvrstoće za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja*
- 4.19 *Srednje vrednosti relativnog izduženja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja*

- 4.20 *Srednje vrednosti efikasnosti zavarenog spoja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja*
- 4.21 *Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko lica*
- 4.22 *Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko korena*
- 4.23 *Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko lica i oko korena*
- 4.24 *Dijagram sila-vreme i energija-vreme za zavareni spoj C-S*
- 4.25 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-R-I*
- 4.26 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-R-P*
- 4.27 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-S*
- 4.28 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-R-I*
- 4.29 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-R-P*
- 4.30 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-S*
- 4.31 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-R-I*
- 4.32 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-R-P*
- 4.33 *Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-S*
- 4.34 *Grafički prikaz sila / energija– vreme epruvete OM*
- 4.35 *Energija udara za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja za zarez na strani napredovanja, na sredini zavarenog spoja i na povratnoj strani*
- 4.36 *Uporedni rezultati udarne žilavosti za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150*
- 4.37 *Uporedni rezultati energije iniciranja prsline za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150*
- 4.38 *Uporedni rezultati energije razvoja prsline za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150*
- 4.39 *Uporedni rezultati procentualnog udela energije za stvaranje prsline u odnosu na ukupnu energiju udara E_i/E i procentualnog udela energije potrebne za širenje prsline u odnosu na ukupnu energiju E_p/E za parametre zavarivanja*
- 4.40 *Uporedni rezultati procentualnog udela ukupne energije, energije za stvaranje prsline i energije za širenje prsline u odnosu na adekvatne procentualne udele energije osnovnog metala (E_{iZS}/E_{iOM} , E_{pZS}/E_{pOM} i E_{ZS}/E_{OM}) za različite pozicije zareza u zavarenom spoju i različite parametre zavarivanja*
- 4.41 *Strukture makrostrukturnih prelomnih površina ZTM zavarenog spoja: B-R-I, B-R-P, C-R-I i C-R-P*
- 4.42 *Mikrostruktura zone termomehaničkog uticaja površine preloma*
- 4.43 *Mikrostrukturne zone preloma B-R-P i C-R-P sa uvećanjem x500 i x1000*
- 4.44 *Mikrostrukturne zone preloma C-R-I sa uvećanjem x500 i x1000*
- 4.45 *Epruveta A-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*

- 4.46 *Epruveta A-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.47 *Epruveta B-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.48 *Epruveta B-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.49 *Epruveta B-S sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.50 *Epruveta C-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.51 *Epruveta C-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.52 *Epruveta C-S sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline*
- 4.53 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/73 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - A-R-I*
- 4.54 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/73 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - A-R-P*
- 4.55 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - B-R-I*
- 4.56 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - B-R-P*
- 4.57 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na sredini zavarenog spoja - B-R-S*
- 4.58 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - C-R-I*
- 4.59 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - C-R-P*
- 4.60 *Krive otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na sredini zavarenog spoja - C-R-S*
- 4.61 *Uporedni prikaz krivih otpornosti $J-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/73*
- 4.62 *Uporedni prikaz krivih otpornosti $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/73*
- 4.63 *Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{Jlc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/73*
- 4.64 *Promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73*
- 4.65 *Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima A-750/73*
- 4.66 *Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73*
- 4.67 *Uporedni prikaz krivih otpornosti $J-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116*
- 4.68 *Uporedni prikaz krivih otpornosti $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116*
- 4.69 *Uporedni prikaz vrednosti K_{Jlc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/116*
- 4.70 *Promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116*
- 4.71 *Uporedni prikaz vrednosti δ_{lc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/116*
- 4.72 *Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116*
- 4.73 *Uporedni prikaz krivih otpornosti $J-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116*
- 4.74 *Uporedni prikaz krivih otpornosti CTOD (δ)- Δa za parametar zavarivanja 750/150*
- 4.75 *Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{Jlc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/150*

- 4.76 *Promena žilavosti loma K_{JIC} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150*
- 4.77 *Uporedni prikaz vrednosti δ_{IC} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/150*
- 4.78 *Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150*
- 4.79 *Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja i različite pozicije zareza u odnosu na pravac zavarivanja*
- 4.80 *Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja na istim pozicijama zareza (strana napredovanja, sredina spoja i povratna strana) u odnosu na pravac zavarivanja*
- 4.81 *Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja i različite pozicije zareza u odnosu na pravac zavarivanja*
- 4.82 *Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja na istim pozicijama zareza (strana napredovanja, sredina spoja i povratna strana) u odnosu na pravac zavarivanja*
- 4.83 *Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-R-I*
- 4.84 *Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-S*
- 4.85 *Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-R-P*
- 4.86 *Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-S*
- 4.87 *Dijagram $da/dN-\Delta K$ za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja A-750/73*
- 4.88 *Dijagram $da/dN-\Delta K$ za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja B-750/116*
- 4.89 *Dijagram $da/dN-\Delta K$ za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja C-750/150*
- 4.90 *Uporedni rezultati $da/dN-\Delta K$ za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog različitim parametrima zavarivanja*
- 4.91 *Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja A-750/73*
- 4.92 *Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja B-750/116*
- 4.93 *Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja C-750/150*
- 4.94 *Lom epruvete na mestu zavara oko jezgra (parametri zavarivanja B-750/116)*
- 4.95 *Prelomne površine zavarenog spoja - lom oko jezgra (parametri zavarivanja B-750/116)*
- 4.96 *Lom epruvete na mestu zavara (parametri zavarivanja A-750/73)*
- 4.97 *Prelomne površine zavarenog spoja (parametri zavarivanja A-750/73)*
- 4.98 *Lom epruvete na mestu zavara (parametri zavarivanja C-750/150)*
- 4.99 *Prelomne površine zavarenog spoja (parametri zavarivanja C-750/150)*
- 4.100 *Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima A-750/73*
- 4.101 *Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima B-750/116*
- 4.102 *Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima C-750/150*
- 4.103 *Uporedni rezultati ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja*

SPISAK TABELA

Tabela	Naziv
2.1	<i>Podela legura aluminijuma u zavisnosti od sistema legiranja</i>
3.1	<i>Hemijski sastav legure aluminijuma 2024 T351</i>
3.2	<i>Mehanička svojstva legure aluminijuma 2024 T351</i>
3.3	<i>Parametri zavarivanja</i>
3.4	<i>Oznake epruveta za određivanje žilavosti ZTM zavarenog spoja sa zarezom u različitim strukturama</i>
3.5	<i>Definisana šema ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja (750/73; 750/116; 750/150) na servohidrauličnom pulzatoru</i>
3.6	<i>Sopstveni modovi oscilovanja dobijeni numeričkim putem</i>
3.7	<i>Definisana šema ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja (750/73; 750/116; 750/150)</i>
4.1	<i>Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete A-750/73</i>
4.2	<i>Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete B-750/116</i>
4.3	<i>Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete C-750/150</i>
4.4	<i>Srednje vrednosti rezultata određivanja energije udara</i>
4.5	<i>Rezultatima merenja dužine zamorne prsline na dva uzorka osnovnog metala</i>
4.6	<i>Vrednosti parametara mehanike loma: kritična vrednost J integral - J_{Ic}, žilavosti loma K_{Jlc} i otvaranja prsline δ_{Ic} za različite parametre zavarivanja i različite pozicije zareza u odnosu na pravac zavarivanja</i>
4.7	<i>Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja A-750/73</i>
4.8	<i>Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja B-750/116</i>
4.9	<i>Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja C-750/150</i>
4.10	<i>Rezultati dinamičkog ispitivanja zamaranjem na elektro-dinamičkom vibracionom stolu</i>
4.11	<i>Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak A-750/73</i>
4.12	<i>Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak B-750/116</i>
4.13	<i>Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak C-750/150</i>
4.14	<i>Zakovitosti S-N krivih za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja</i>

1. UVOD

Aluminijum je jedan od najčešćih metala na zemlji i široko se koristi za inženjerske strukture i komponente u mnogim industrijama kao što su vazduhoplovna, automobilska, industrija šinskih vozila i brodogradnja [1]. Poznat je po niskoj gustini, visokoj otpornosti na koroziju, odličnim svojstvima obrade i visokim toplotnim i električnim svojstvima [1]. Aluminijum se smatra zelenim materijalom koji se može reciklirati, pri tome čuvajući sva svoja svojstva bez degradacije kvaliteta. Izrada struktura lakih konstrukcija od legura Al se najčešće vrši zavarivanjem delova. Koriste se razni postupci zavarivanja, najčešće postupci elektrolučnog zavarivanja, zavarivanje trenjem sa mešanjem (ZTM) (eng. FSW - **F**ric**S**tion **S**tir **W**eldig), spajanje sa trenjem. Od elektrolučnih postupka zavarivanja najčešće se koriste MIG (Metal Inert Gas) i TIG (Tungsten Inert Gas) postupci zavarivanja. Ipak, mnoge legure aluminijuma, kao što su legure aluminijuma iz serija 2XXX i 7XXX, su takođe poznate po svojim niskim mogućnostima zavarivanja i često se klasifikuju kao nezavarljivi materijali kada se koriste električni elektrolučni procesi [2]. Primena postupaka elektrolučnog zavarivanja za zavarivanje ovih serija legura dovodi do niskog kvaliteta zavarenog spoja zbog slabe mikrostrukturne solidifikacije i poroznosti u zoni fuzije. Normalno, da bi se prevazišli ovi metalurški nedostaci, spajanje ovih legura se obično vrši zakovicama i / ili zavrtnjima što dovodi do povećanja mase i troškova proizvodnje.

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (ZTM) je relativno nova tehnika spajanja [3]. Glavna metalurška prednost ovog novog postupka je u tome što se zavarivanje vrši u čvrstom stanju, ne dostižući tačku topljenja osnovnog materijala, što dovodi do manjih distorzija, manjih zaostalih napona i manjih defekata zavarivanja u poređenju sa drugim fuzionim tehnikama zavarivanja [4, 5]. Sa ovim relativno novim postupkom zavarivanja, materijali koji su se nekada smatrali nezavarljivim, sada se mogu zavarivati pomoću postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem. Iz tog razloga, ovaj relativno novi postupak je veoma dobro prihvaćen u industriji, posebno u vazduhoplovnom sektoru koji još uvek koristi zakovice i zavrtnjeve u mnogim strukturnim komponentama [6]. U ovoj oblasti se vrše obimna istraživanja u pravcu sve veće primenljivosti ovog postupka zavarivanja u industriji [7].

Jednostavnost tehnologije zavarivanja trenjem sa mešanjem i odsustvo procesa topljenja predodređuju primenu ovog postupka za spajanje različitih legura aluminijuma i dobijanje zavara

bez oštećenja sa dobrim mehaničkim svojstvima. Na kvalitet zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem utiče količina toplote koja se generiše trenjem i mešanjem materijala koje se ostvaruje posebnim oblikom alata. Brojni su parametri koji utiču na generisanje toplote i mešanje materijala, ali su dva parametra dominantna: broj obrtaja alata i brzina zavarivanja (koja se često naziva i brzina translatornog kretanja alata) [2]. Međutim, oblik trna alata i njegove dimenzije, dužina trna, prečnik ramena alata, konkavnost ramena alata (ugao konkavnosti), ugao nagiba alata, dubina uranjanja alata, vertikalna sila alata, debljina zavarenih ploča, tip zavarenog spoja, hemijski sastav osnovnog materijala i početni temperature osnovnog materijala, takođe imaju značajan uticaj na kvalitet zavarenog spoja [2]. Stoga, su mnoga istraživanja fokusirana na parametre postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem i njihov uticaj na mehanička svojstva i mikrostrukturna svojstva zavarenog spoja.

Eksperimentalna istraživanja zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem u okviru ove disertacije vršena su sa legurom aluminijuma serije 2XXX – 2024 T351, i koja je klasičnim postupcima zavarivanja praktično nezavarljiva. Za zavarivanje je korišćen alat koji je razvijen u okviru izrade doktorske disertacije A. Živkovića [8]. Parametri postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem za zavarivanje legure aluminijuma 2024 T351 su izabrani saglasno istraživanjima [8] sa izabranim alatom i saglasno tehničkim karakteristikama glodalice prilagođene za zavarivanje trenjem sa mešanjem, sa osnovnim zahtevom da dobijeni zavareni spojevi budu bez grešaka u zavarenom spoju. Usvojen je konstantan broj obrtaja alata $n=750 \text{ min}^{-1}$, a brzina zavarivanja je varirana ($v=73, 116, 150 \text{ mm/min}$). Vršena su eksperimentalna zavarivanja na pločastim materijalima debljine 6 mm, saglasno geometriji alata sa kojim je vršeno zavarivanje. Za karakterizaciju indikacija u zavarenim spojevima korišćene su metode ispitivanja bez razaranja (ispitivanje penetrantima i radiografija).

Predmet istraživanja u okviru ove disertacije je analiza odnosa broja obrtaja alata i brzine zavarivanja, kao dva dominantna parametra zavarivanja trenjem sa mešanjem, na mehanička svojstva zavarenih spojeva: zatezna i savojna statička svojstva, tvrdoću, udarnu žilavost, na zamorna svojstva zavarenog spoja kao što su: dinamička izdržljivost, brzina rasta zamorne prsline, na parametre mehanike loma kao i na makro- i mikrostrukturna svojstva zavarenih spojeva legure aluminijuma 2024 T351.

1.1. CILJEVI

Zavareni spojevi predstavljaju kritična mesta zavarenih konstrukcija. Od svih tipova grešaka koje se mogu pojaviti kod zavarenih spojeva, najčešće do lomova konstrukcija mogu da dovedu inicirane prsline, koje nastaju usled zamora materijala, odnosno usled uticaja promenljivog opterećenja na mestima izvora najveće koncentracije napona. Poznavanje radnog veka zavarenog spoja sa ustanovljenom prslinom, nekom od metoda ispitivanja bez razaranja, je od izuzetnog značaja. Dakle, nastanak i rast zamorne prsline se ne može sprečiti, ali se njihov uticaj mora uzeti u obzir u procesu konstruisanja.

Za razliku od tradicionalnog pristupa konstruisanju na osnovu graničnih stanja (tzv. limit states design), pristup konstruisanja na osnovu tolerancije oštećenja se zasniva na stanjima definisanim rastom prsline i strukturnim preobražajima mikrostrukture materijala u heterogenoj fazi. Pri tome se imaju i vidu dva principa strukturnog dizajna:

1. Tolerancija oštećenja, definisana kao sposobnost strukture da nosi predviđena opterećenja u prisustvu agresivnog delovanja okoline, zamora materijala, i slučajnih oštećenja sve do uočavanja oštećenja (bilo tokom redovnih ili vanrednih pregleda) i njihovog saniranja.

2. Trajnost, definisana kao sposobnost strukture da izdrži degradaciju materijala usled zamora, slučajnih oštećenja i agresivnog delovanja okoline do te mere da se može držati pod kontrolom različitim, ekonomski isplativim, programima ispitivanja i održavanja.

Tolerancija oštećenja se sastoji od tri ključna elementa za postizanje željenog nivoa sigurnosti. Prvi elemenat je određivanje preostale čvrstoće ili maksimalnog dozvoljenog oštećenja koje struktura može da izdrži pod propisima definisanim uslovima opterećenja (tzv. regulatory fail-safe load conditions). Drugi elemenat je rast prsline definisan kao interval napredovanja oštećenja od dužina koje se odlikuju zanemarljivom verovatnoćom loma do dozvoljenih dužina određenih preostalom čvrstoćom. Najzad se mora definisati i strategija uočavanja oštećenja kroz odgovarajuće programe pregleda. Važan zadatak teorije oštećenja je da omogući procenu tolerancije oštećenja strukture kada u njenoj mikrostrukтури dođe do nastanka i razvoja mikro-prslina.

Kako se lake konstrukcije najčešće rade od legura aluminijuma i kako se za spajanje delova konstrukcija koriste različiti postupci zavarivanja, a poslednjih godina, sve više se primenjuje relativno novi postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem, to su saglasno novom pristupu konstruisanja na osnovu tolerancija oštećenja konstrukcije, proistekli ciljevi ove disertacije.

Glavni ciljevi ovog istraživanja su:

- Razvoj metodologije istraživanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola,
- Istraživanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem na osnovu ispitivanja rađenih na elektro-dinamičkom vibracionom stolu,
- Istraživanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem na osnovu ispitivanja na servo-hidrauličnom pulzatoru,
- Istraživanje brzine rasta zamorne prsline zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem, korišćenjem linearno elastične mehanike loma,
- Istraživanje parametara mehanike loma (žilavosti loma K_{Ic} i veličine otvaranja prsline δ_{Ic}) korišćenjem elasto-plastične mehanike loma za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja na mestima različitih struktura zavarenih spojeva,
- Istraživanje udarne žilavosti zavarenih spojeva ostvarene različitim parametrima zavarivanja na mestima različitih struktura zavarenih spojeva,
- Istraživanje i analiza parametara postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351 na mehanička statička svojstva zavarenih spojeva (zatezna svojstva, savojna svojstva, profil mikrotvrdoće),
- Istraživanje i analiza parametara postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351 na makrostrukturna i mikrostrukturna svojstva zavarenih spojeva.

1.2. METODOLOGIJA

Mehanička svojstva zavarenog spoja zavise od mikrostrukture zavarenog spoja, a opet mikrostruktura zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem zavisi najviše od parametara zavarivanja, te su za potrebe istraživanja u okviru ove disertacije, izvršena opsežna eksperimentalna istraživanja:

- Makrostrukture i mikrostrukture zavarenih spojeva,
- Ispitivanje statičkih zateznih svojstava zavarenih spojeva,
- Ispitivanje profila mikrotvrdoće zavarenih spojeva,
- Ispitivanje udarne žilavosti na instrumentiranom Šarpijevom klatnu sa ciljem utvrđivanja energije udara potrebnu za iniciranje i energije udara neophodne za propagaciju (rast) prsline na na mestima različitih struktura zavarenih spojeva,
- Ispitivanje svojstava zavarenih spojeva na savijanje,
- Ispitivanje brzine rasta zamorne prsline primenom linearno-elastične mehanike loma,
- Ispitivanje kritične vrednosti J-integrala J_{Ic} i kritične vrednosti otvaranja prsline δ_{Ic} , primenom elasto-plastične mehanike loma, a na bazi kritične vrednosti J-integrala, određivanje žilavosti loma K_{Ic} na mestima različitih struktura zavarenih spojeva,
- Ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva.

Zbog vrlo heterogene strukture zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem, vršeno je ispitivanje udarne žilavosti na mestima različitih struktura zavarenog spoja na strani napredovanja i na povratnoj strani zavarenih spojeva za različite parametar zavarivanja.

Iz istih razloga primenom elasto-plastične mehanike loma eksperimentalnim ispitivanjem prema standard ASTM E1820 vršeno je određivanje kritičnih vrednosti J-integrala i otvaranja prsline δ (δ_{Ic} i J_{Ic}) i posredno određivanje veličine žilavosti loma K_{Ic} za različite strukture zavarenog spoja na strani napredovanja i povratnoj strani zavarenog spoja za različite parametre zavarivanja.

Za ispitivanje brzine rasta prsline pri zamaranju korišćen je visokofrekventni pulzator Cractronic, pri čemu je zavareni spoj opterećen na savijanje u tri tačke promenljivim opterećenjem sa faktorom asimetrije $R=0,1$.

Dinamička izdržljivost zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem se određuje na osnovu generisane Velerove krive (S–N krive). U okviru disertacije vršena su eksperimentalna ispitivanja, tako što je vršeno zamaranje epruveta na servo-hidrauličkom pulzatoru. Za dobijanje Velerove krive epruvete su bile podvrgnute promenljivom naprezanju konstantne amplitude do loma. Vrednost graničnog broja ciklusa N_D za koji se definiše dinamička izdržljivost je definisan za 10^7 ciklusa. Eksperimentalna ispitivanja su rađena promenljivim opterećenjem frekvencije 35 Hz sa faktorom asimetrije $R=0,1$.

Takođe je zamaranje epruveta vršeno primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola. Kako ovaj postupak nije standardom definisan, za ovo ispitivanje istraživana je metodologija ispitivanja. Za usvojeni oblik epruvete, definisan je fiksator za pričvršćivanje epruveta za elektro-dinamički vibracioni sto - šejker, a takođe je određena masa tega za opterećivanje epruveta na mestu zavarenog spoja. Numeričkim putem su definisani parametri ispitivanja (frekvencija i amplituda vibracionog stola - šejkera). Eksperimentalno ispitivanje na zamaranje je vršeno u domenu frekvencija vibro stola ispod prvog moda sopstvenih oscilacija.

2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

2.1. SVOJSTVA, ZAVARLJIVOST I PRIMENA LEGURA ALUMINIJUMA

Aluminijum je metal koji je veoma rasprostranjen u zemljinoj kori. Posle čelika, aluminijum je najviše korišćen metal. Spada u grupu lakih metala. Približno tri puta je lakši od čelika. Danas se aluminijum i njegove legure koriste u različitim granama industrije: građevinarstvo, procesna tehnika, automobilska industrija, avio industrija itd. Najznačajnije osobine aluminijuma su: dobra električna provodljivost (nešto manja od bakra), dobra toplotna provodljivost, dobra livkost, dobra zavarljivost, dobra plastičnost, zadovoljavajuća koroziona otpornost, nije magnetičan, zadržava dobra mehanička svojstva i pri niskim temperaturama.

Aluminijum ima relativno niske vrednosti mehaničkih svojstava. Povećanje niske čvrstoće aluminijuma moguće je: legiranjem, hladnom deformacijom, termičkom obradom i kombinacijom ovih mogućnosti (legiranjem i hladnom deformacijom ili legiranjem i termičkom obradom).

Da bi se poboljšala mehanička svojstva, aluminijum se legira. Legirajući elementi su: bakar, mangan, silicijum, magnezijum i cink. Legure aluminijuma su uglavnom dvokomponentne i trokomponentne. Legure aluminijuma su podeljene u osam grupa, koje nose oznake od 1XXX do 8XXX. Podela legura aluminijuma u zavisnosti od sistema legiranja data je u tabeli 2.1. Sistem numerisanja za aluminijumske legure je definisan od strane asocijacija za aluminijum [9].

Tabela 2.1. Podela legura aluminijuma u zavisnosti od sistema legiranja

Legirajući Element	Al	Cu	Mn	Si	Mg	Si i Mg	Zn	Ostali
Brojčana oznaka grupe	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	5XXX	6XXX	7XXX	8XXX

Kod numeričkog sistema, označavanje legura sastoji se od četiri broja. Prva dva broja označavaju broj grupe legure glavnog legirajućeg elementa i legirajuću promenu, a zatim slede brojevi glavne grupe sledećeg legirajućeg elementa po značaju i legirajuća promena. Tako na primer u oznaci legure EN AW-2024, cifra **2** označava da se radi o leguri aluminijuma sa bakrom, cifra **0** označava modifikaciju legure, a oznaka **24** označava konkretnu leguru u seriji 2XXX.

Legure aluminijuma se mogu podeliti u dve kategorije: legure koje se termički obrađuju i legure koje se ne mogu termički obrađivati.

Čist aluminijum (serija 1XXX) pripada grupi termički neobradivih materijala. Legure aluminijuma serije 3 XXX, 4 XXX i 5 XXX su aluminijumske legure termički neobrađive. Termički neobrađive legure aluminijuma se ojačavaju rastvaranjem legirajućih elemenata u čvrstom rastvoru i plastičnom preradom (deformaciono ojačavanje).

Legure aluminijuma serije 2XXX, 6XXX, 7XXX koje sadrže legirajuće elemente bakar, silicijum i magnezijum i cink, respektivno, su termički obrađive legure. Termička obrada, u najširem smislu, odnosi se na operacije zagrevanja i hlađenja, koje se izvode u svrhu promene mehaničkih svojstava (povećanje tvrdoće i čvrstoće).

S obzirom da se različite serije aluminijumskih legura različito obrađuju, to pored osnovne oznake Al-legure mogu da imaju i dodatne oznake koje opisuju stanje, odnosno način termičke obrade. Dodatne oznake termičkog stanja materijala prema SRPS EN 515 [10] su:

- F – fabričko stanje (Proizvodi koji prolaze hladnu preradu ili toplu preradu i gde nema specijalne kontrole procesa. Ovakav proizvod nema zahtevana mehanička svojstava).
- O – meko žareno stanje (žareno i rekristalisano-stanje sa najmanjom čvrstoćom i najvećom duktilnošću. Proizvodi prolaze plastičnu preradu sa ciljem da se obezbedi najniža čvrstoća.)
- W – rastvarajuće žareno stanje.
- H – ojačane hladnom deformacijom (legure termički neobrađene, rađene na hladno ili napregnuto stvrdnute, proizvodi prolaze hladnu preradu u cilju povećanja čvrstoće).
- T – termički obrađene (rastvarajuće žareno i stareno):
 - T1 – kaljeno sa radne temperature oblikovanja materijala i prirodno stareno,
 - T2 – kaljeno sa radne temperature oblikovanja, hladno oblikovanje i prirodno stareno,
 - T3 – rastvarajuće žareno, hladno oblikovano i prirodno stareno,
 - T4 – rastvarajuće žareno i prirodno stareno,
 - T5 – kaljeno sa radne temperature oblikovanja materijala i veštački stareno,
 - T6 – rastvarajuće žareno i veštački stareno,
 - T7 – rastvarajuće žareno i stabilizovano,
 - T8 – rastvarajuće žareno, hladno oblikovano i veštački stareno,
 - T9 – hlađeno sa temperature oblikovanja, hladno oblikovano i veštački stareno.

Tako na primer u oznaci legure aluminijuma sa bakrom 2024 T3, oznaka **T3** znači da je stanje rastvarajuće žareno i prirodno stareno, dok u oznaci 2024 T351, oznaka **T351** znači stanje rastvarajuće žareno i prirodno stareno i rasterećeno zaostalih napona pod dejstvom zateznog opterećenja.

Termička obrada legura serije 2XXX, 6XXX i 7XXX se odvija u tri faze [11]:

- Rastvarajuće žarenje,
- Kaljenje (gašenje) i
- Starenje.

U prvoj fazi termičke obrade - rastvarajuće žarenje, na temperaturama između 450 i 550 °C neophodni legirajući elementi se rastvaraju u kristalnoj rešetki aluminijuma, stvarajući mešane kristale. Cilj rastvarajućeg žarenja je da se na povišenim temperaturama u čvrstom rastvoru aluminijuma rastvori bar jedan legirajući element.

Druga faza termičke obrade je kaljenje (gašenje). Hlađenje se vrši sa temperature rastvarajućeg žarenja, a potrebna brzina hlađenja zavisi od tipa legure, a najčešće je hlađenje u vodi. U ovoj fazi termičke obrade, dovoljno brzim hlađenjem, obogaćeni čvrsti rastvor se transformiše u superpresićeno stanje. Kaljenjem je postignuto da legirajući elementi ostanu „zarobljeni“ u presićenom čvrstom rastvoru taloga.

Treća faza termičke obrade je starenje. Starenje može biti prirodno i veštačko. Prirodno starenje se odvija na temperaturi okoline. Ako se starenje odvija u uslovima nešto povišenih temperatura (između 120 i 180 °C), tada je reč o veštačkom starenju. Tokom starenja počinje stvaranje taloga iz superpresićenog čvrstog rastvora. Prirodnim starenjem nastaju koherentni talozi tipa GP-I zone (Guinier-Preston (GP) zone). Stvaranjem ovog tipa taloga ostaju neporemećeni odnosi između kristalnih rešetki mešanih kristala i taloga, i događa se samo elastično deformisanje rešetki.

Veštačko starenje se odvija na približno 160 °C u trajanju od nekoliko sati, dovodi do stvaranja taloga GP-II zona. Dakle, veštačkim starenjem nastaju netastabilne faze čija građa kristalne rešetke odstupa od građe rešetke mešanih kristala. Ovi talozi su koherentni sa legirajućom matricom.

2.1.1. Legure serije 2XXX

Glavni legirajući elemenat u seriji legura aluminijuma 2XXX je bakar. Mehaničke osobine ovih legura dostižu vrednosti kao kod ugljeničnih čelika. Ovako visoka čvrstoća legura je zahvaljujući jedinjenju CuAl_2 koje se izdvaja u obliku taloga. Taložno ojačavanje ove grupe legura odvija se kroz postupak veštačkog starenja. Legure serije 2XXX po pravilu imaju lošu zavarljivost klasičnim postupcima zavarivanja (MIG, TIG), zbog velike osetljivosti ka pojavi toplih prslina, kao i zbog rastvaranja čestica taloga. Kako ove legure nemaju dobru otpornost na koroziju, često se prevlače (plakiraju) čistim aluminijumom radi antikorozijske zaštite. Legure serije 2XXX zbog visoke čvrstoće, dobre obradivosti, dobre žilavosti, dobrih svojstva na zamorna opterećenja, zbog posedovanja svojstava visoke tolerancije oštećenja se koriste za izradu delova u avioindustriji. Ove legure se zovu durali (duraluminijum). Sa dodatkom elemenata kao što su Mg i Li, moguće je smanjiti specifičnu gustinu i poboljšati performanse Al legura za primenu za izradu delova u avioindustriji [12].

Najčešće legure su EN AW 2011, EN AW 2017 i EN AW 2024. Danas se jako mnogo radi na novim inovativnim legurama Al-Cu-Li. Izdvaja se legura EN AW 2198 sa niskim sadržajem litijuma (0,8-1,1 %), niske gustine, koja ima visoku zateznu čvrstoću, dobra svojstva plastičnosti i korozione otpornosti. Nove legure aluminijuma sa litijumom zahtevaju nove postupke zavarivanja. Intenzivno se radi na novim postupcima zavarivanja kao što je hibridno lasersko zavarivanje.

2.1.2. Zavarljivost aluminijuma i njegovih legura

Na zavarljivost legura aluminijuma utiču brojni faktori kao što su: veći afinitet prema kiseoniku pri čemu se stvara teškotopljiv oksid, veća toplotna provodljivost i veći koeficijent toplotnog širenja, veliko skupljanje pri očvršćavanju i velika rastvorljivost vodonika u tečnoj fazi, koja se smanjuje drastično pri očvršćavanju. Zavarivanjem legura aluminijuma smanjuju se mehanička svojstva u zoni uticaja toplote (ZUT-u), snižava se koroziona postojanost, dolazi do nastajanja pora i uključaka, dolazi do nastajanja oksidacionog sloja Al_2O_3 na površini metala zbog velikog afiniteta aluminijuma prema kiseoniku, dolazi do pojave hladnih i toplih prslina.

Od fuzionih postupaka za zavarivanje se najčešće koristi MIG i TIG. U poslednje vreme, vodeći proizvođači opreme za zavarivanje u svetu omogućavaju razne savremene modifikacije

tih postupaka zavarivanja kao što je pulsiranje tokom zavarivanja jednim ili duplim pulsom, AC MIG sa pulsiranjem ili na primer TIP TIG (sa automatskim dodavanjem tople žice).

Od ostalih postupaka zavarivanja legura aluminijuma, koriste se lasersko zavarivanje i zavarivanje elektronskim snopom.

Ako tehnologija postupka zavarivanja nije prikladna, mogu se pojaviti defekti u području zavarenog materijala, čime se smanjuje pouzdanost zavarene konstrukcije, a time i proizvoda. Mogu se pojaviti defekti zavarenih spojeva poput poroznosti, prslina, nedostatka penetracije ili nedostatka fuzije [13, 14].

Serijske aluminijumskih legura 2XXX, su slabo zavarljive konvencionalnim tehnikama fuzionog zavarivanja. Problem nezavarljivih aluminijumskih legura serije 2XXX i 7XXX uslovio je poslednjih tridesetak godina istraživanje novih tehnologija zavarivanja. Zavarivanje trenjem sa mešanjem je relativno nova tehnika spajanja u čvrstom stanju, kojom je rešen problem zavarivanja legura serije 2XXX [15-19].

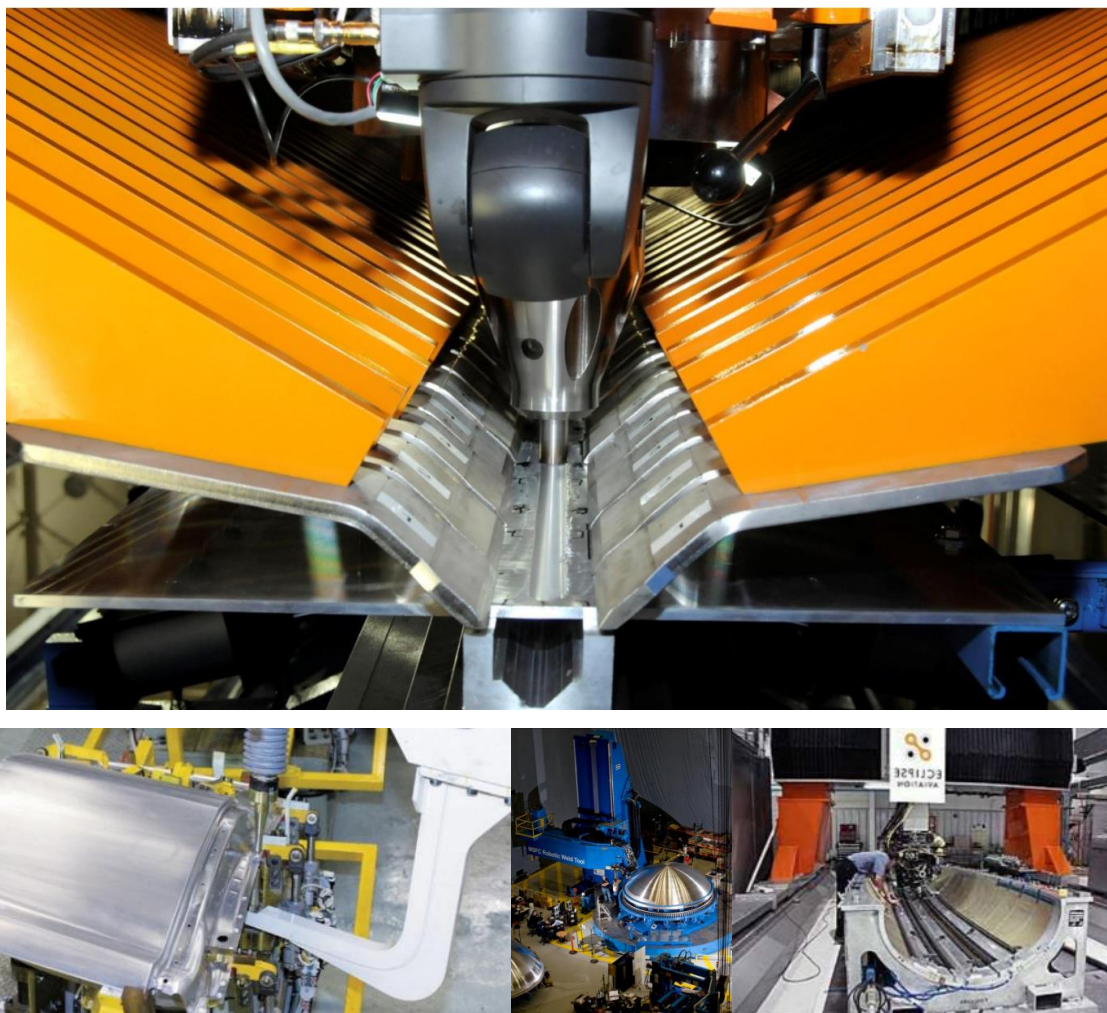
2.2. ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM

Krajem osamdesetih godina prošlog veka počelo se sa razvojem novog postupka zavarivanja materijala. Zavarivanje trenjem sa mešanjem (ZTM) je postupak zavarivanja koji je razvijen i patentiran od strane „Instituta za zavarivanje TWI“ (The Welding Institute – TWI) iz Velike Britanije, decembra 1991. godine. Ovaj postupak je sa svojim timom istraživača i inženjera razvio Wayne M. Thomas [3]. Već tokom 1994. godine, ZTM dobija svoju komercijalnu primenu u industriji. Prvu svoju komercijalnu primenu ZTM postupak imao je kod zavarivanja šinskih vozila, čije su konstrukcije bile od legure aluminijuma.

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem je energetski efikasan, ekološki prihvatljiv, a dobijeni zavareni spojevi su jeftiniji i sa manjim brojem grešaka u odnosu na zavarene spojeve dobijene klasičnim postupcima zavarivanja [2]. Nizak unos toplote u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem vrlo je privlačan za sadašnju industriju budući da je moguće proizvoditi dugačke zavarene spojeve sa malim deformacijama i malim zaostalim naponima [2, 20].

Za ostvarivanje kvalitetnih zavarenih spojeva trenjem sa mešanjem potrebna su vrlo mala priprema, međutim, potreban je adekvatan sistem stezanja kojim se garantuje fiksiranje delova koji se zavaruju da bi se sprečila odstupanja od linije zavarenog spoja (slika 2.1) [21].

ZTM je prvobitno bio namenjen za zavarivanje aluminijumskih legura, ali razvojem ovog postupka zavarivanja, uspešno se zavaraju i drugi materijali kao što su čelik, magnezijum, bakar i legure titana [22]. Danas se ZTM primenjuje osim u industriji železničkih vozila, u autoindustriji, avioindustriji, brodogradnji, procesnoj tehnici, ali i u proizvodnji kosmičkih letelica (slika 2.1).



Slika 2.1. Primena zavarivanja trenjem sa mešanjem u različitim industrijama [23]

Sam postupak zavarivanja (slika 2.2,a) se izvodi na radnom stolu mašine uz pomoć specijalno dizajniranog alata kojim se vrši zavarivanje. Alat vrši dve glavne funkcije: (a) zagrevanje radnih komada i (b) mešanje materijal delova koji se spajaju. Zagrevanje se vrši trenjem između alata i osnovnog materijala i plastičnom deformacijom osnovnog materijala u zoni mešanja. Za zavarivanje je neophodno imati specijalizovane mašine koje su predviđene za zavarivanje trenjem sa mešanjem, ali je zavarivanje moguće i na konvencionalnim alatnim

mašinama (slika 2.2,b) koje omogućavaju rotaciono i translatorno kretanje alata istovremeno ili, najčešće, rotaciono kretanje alata i translatorno pomeranje radnog stola mašine (glodalica, strug itd.) [24].



Slika 2.2. Šematski prikaz zavarivanja trenjem sa mešanjem (a) [23] i radni sto mašine sa fiksiranim radnim predmetima i podnožnom pločom (b)

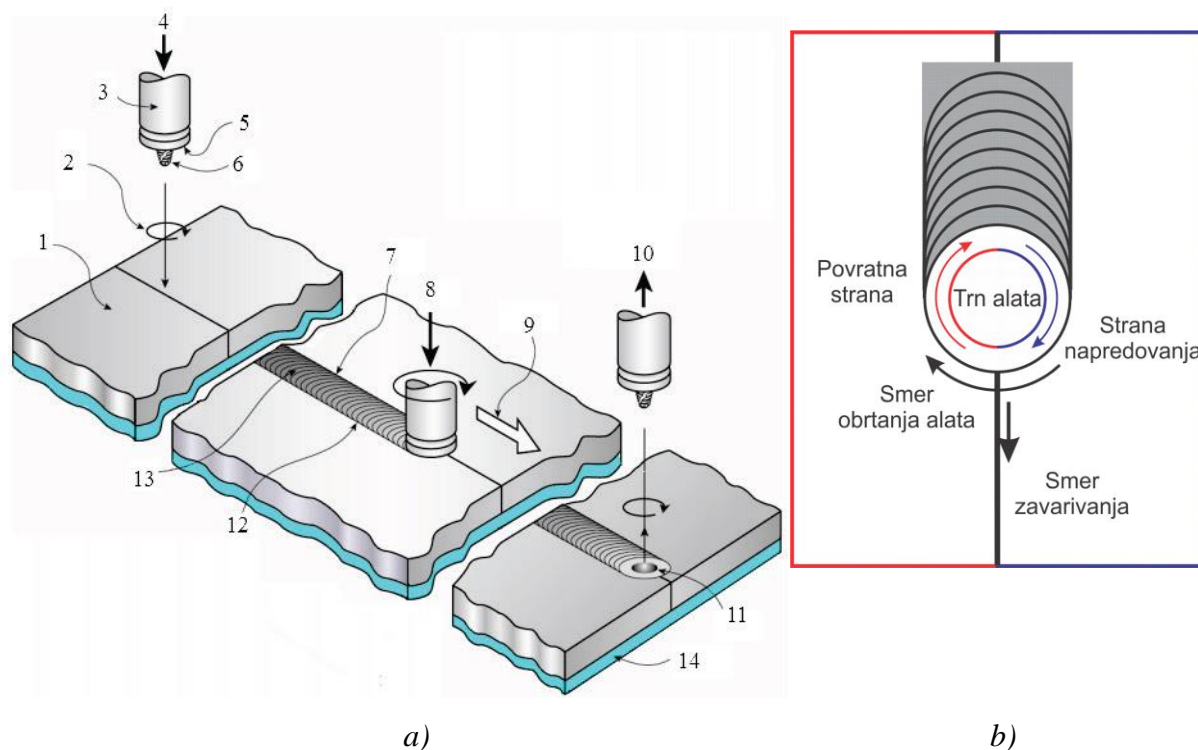
2.2.1. Osnove zavarivanja trenjem sa mešanjem

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem započinje tako što se alat pozicionira iznad delova koji se zavaruju, koji su prethodno pritegnuti za radni sto mašine na kojoj se vrši zavarivanje (slika 2.3,a). Alat (3), uz rotaciono kretanje, prilazi mestu dodira dva materijala tj. liniji dodira limova. Trn alata prodire u materijal (prva faza), pravi početnu rupu u materijalu uz početak generisanja toplote i prodire u osnovni materijal sve dok rame alata ne dodirne gornju površinu delova koji se zavaruju [25].

Tada počinje druga faza, alat jedno vreme rotira u mestu i generiše toplotu koja treba da omogući početak procesa zavarivanja. Pri tome treba obezbediti dovoljni pritisak alata na materijal kako bi se materijal koji omekšava ostao u zoni zavarivanja. U tom položaju dok alat rotira u osnovnom materijalu, dolazi do grejanja materijala do zone ispod tačke topljenja ($\approx 0,8 \cdot T_f$). Trn alata, tako zagrejan materijal, rotira oko svoje ose i na taj način meša.

Zatim počinje translatorno kretanje alata ili radnog stola, u zavisnosti od tipa mašine kojom se vrši zavarivanje. U trećoj fazi - faza zavarivanja, alat vrši translatorno i rotaciono kretanje. Iza samog alata ostaje brazda zagrejanog materijala koja se hladi, a između ploča nastaje monolitni spoj. Sa donje strane delova koji se spajaju nastaje koren zavara koji se nalazi u ravni ploča, ukoliko je izabran alat sa pravilnom dužinom trna.

Na kraju procesa zavarivanja (četvrta faza), alat izlazi iz materijala, ostavljajući iza sebe tehnološku rupu, koja nastaje kao posledica oblika alata. Tako nastala izlazna rupa se odstranjuje odsecanjem tog dela zavarenog spoja, ako se radi o limovima (pločama). Ukoliko se radi o zavarivanju trenjem sa mešanjem cevi (sučeonu spoj), odsecanje je nemoguće, ali se u tom slučaju dizajnira oblik trna tako da prilikom izlaska alata iz materijala, na kraju procesa zavarivanja, trn povlači deo materijala za sobom i na taj način zapunjava tehnološki otvor.



Slika 2.3. Šematski prikaz principa zavarivanja trenjem sa mešanjem pri ostvarivanju sučeonog spoja [25, 26] (1 - osnovni metal, 2 - smer obrtanja alata, 3 - alat za zavarivanje, 4 - prodiranje alata u materijalu - smer kretanja u vertikalnom pravcu na dole, 5 - rame alata, 6 - trn, 7 - strana napredovanja spoja, 8 - aksijalna sila, 9 - smer zavarivanja, 10 - izlaz alata iz materijala - smer kretanja u vertikalnom pravcu na gore, 11 - izlazna rupa, 12 - povratna strana spoja, 13 - lice spoja 14 - podnožna ploča)

Kod zavarivanja trenjem sa mešanjem razlikuju se strana napredovanja i povratna strana. Strana napredovanja zavarenog spoja (slika 2.3,b) je strana na kojoj se poklapaju smerovi vektora ugaone brzine obrtanja alata i brzine zavarivanja, dok se povratna strana definiše kao strana na kojoj su ova dva vektora suprotnih smerova.

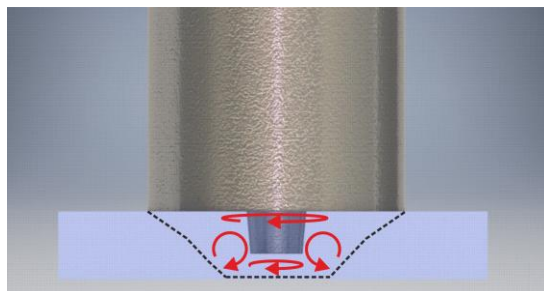
2.2.2. Alati za zavarivanje trenjem sa mešanjem

Alat koji se koristi za zavarivanje trenjem sa mešanjem se sastoji iz tri segmenta: tela alata (3), ramena alata (5) i trna alata (6) (slika 2.3,a). Telo alata ima ulogu pričvršćivanja alata u steznu čeljust mašine.

Najznačajniju ulogu u procesu zavarivanja imaju rame alata i trn alata. Generisanje toplote se ostvaruje trenjem ramena i trna alata sa osnovnim materijalom. Trenjem između ramena alata i osnovnog materijala, generiše se najveća količina toplote. Za generisanje toplote su bitni oblik i dimenzije ramena alata.

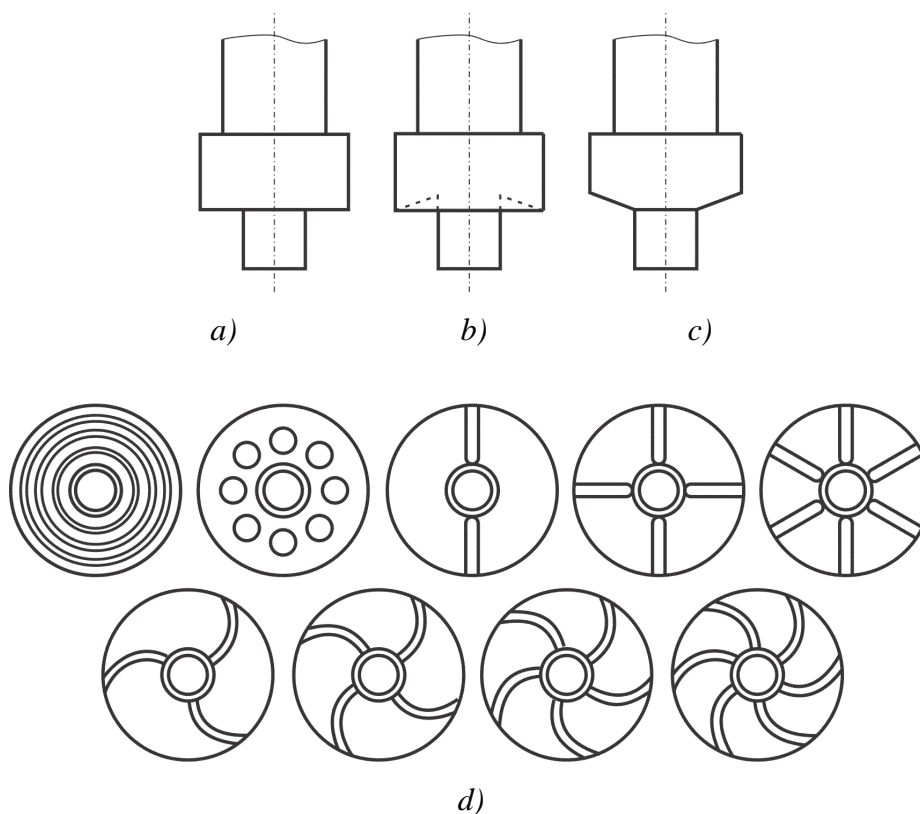
U procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem, trnom se generiše toplota trenjem i plastičnom deformacijom, a oblikom trna alata se vrši mešanje osnovnog materijala, koji je u testastom stanju. Proces zavarivanja trenjem sa mešanjem se može smatrati procesom ekstruzije zbog plastične deformacije materijala oko linije spajanja i karakteristike kretanja materijala [27].

Kolligan je sproveo eksperimentalna istraživanja sa legurama AA6061 i AA7075 i utvrdio da se materijal prenosi u haotičnom mešanju (slika 2.4), a deo materijala se prebacuje na povratnu stranu zavarenog spoja [28].



Slika 2.4. Mešanje materijala u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem [23]

Rame alata može biti ravno, ispupčeno ili izdubljeno, sa žlebovima, a sve u zavisnosti od same konstrukcije alata koja može biti različita (slika 2.5, a-c). Oblici žlebova na čelu ramena alata prikazani su na slici 2.5, d.

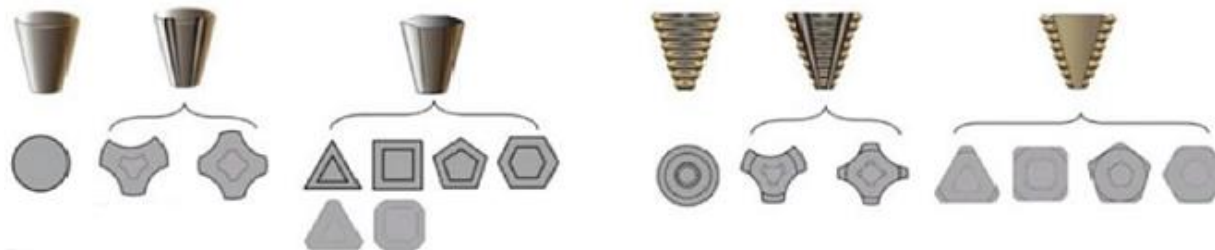


Slika 2.5. Rame alata a) ravno; b) izdubljeno; c) ispupčeno; d) oblici žlebova na čelu alata [29]

Trn alata pored generisanja toplote na dodiru sa delovima koji se spajaju, ima ulogu mešanja materijala i stvaranja monolitnog zavarenog spoja. Kao i rame alata i trn može imati razne geometrijske oblike i rešenja. Može biti cilindričnog oblika (slika 2.6), konusnog oblika (slika 2.7), sa kružnim presekom, trougaonim ili četvorougaoim, bez navoja na samom trnu ili sa navojem sa različitim korakom duž trna alata. Dužina trna mora biti nešto manja od debljine limova koji se zavaruju.



Slika 2.6. Oblici cilindričnih trnova bez navoja i sa urezanim navojem [29]



Slika 2.7. Oblici konusnih trnova bez i sa urezanim navojem [29]

Alat je izrađen od alatnog čelika koji ima znatno viša mehanička svojstva od osnovnog metala koji se zavaruje. Materijal alata mora posedovati dobre karakteristike otpornosti na habanje, mora imati dobru žilavost i povišenu čvrstoću na visokim temperaturama. Obavezna je termička obrada alata zbog što dužeg radnog veka alata. Termomehaničke promene alata u procesu zavarivanja moraju biti zanemarljive.

Proizvodnja kvalitetnog zavarenog spoja zahteva optimalni izbor alata za zavarivanje, kako bi se izbeglo oštećenje alata usled habanja, što može dovesti do deformacije alata i lomljenja trna alata. Postoji mnogo patenata koji su vezani za geometriju i rešenja alata koji se koriste za zavarivanje trenjem sa mešanjem [30]. Na slici 2.8 dati su alati koji je razvio institut TWI.



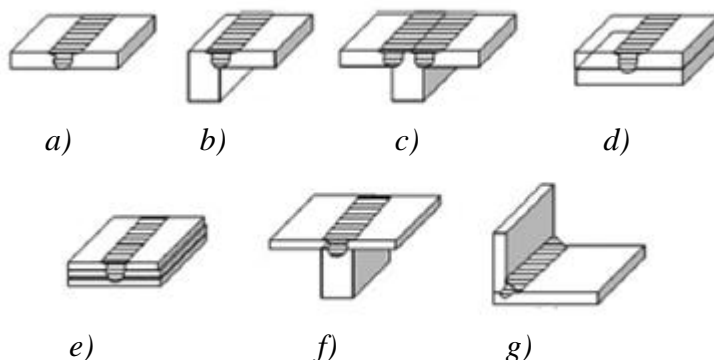
Slika 2.8. Oblici ZTM alata koje je razvio institut za zavarivanje TWI [29]

Geometrija alata za zavarivanje ima značajan uticaj na mikrostrukturu zavarenog spoja, mikrotvrdoću i čvrstoću zavarenog spoja [31–35].

2.2.3. Vrste zavarenih spojeva koji se ostvaruju postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem

Postupkom ZTM se mogu zavarivati limovi, pločasti i ravni delovi i cevi. Istraživanja zavarivanja trenjem sa mešanjem su u Srbiji uglavnom rađena na sučeonim spojevima. U radovima [36–38] su dati rezultati istraživanja zavarivanja trenjem sa mešanjem na T spojevima u Srbiji. Najčešće se vrši izrada preklopnih i sučeonih spojeva, ali je moguće i zavarivanje

ugaonih spojeva uz odgovarajuću pripremu delova koji se spajaju. Izgled mogućih spojeva koji se ostvaruju zavarivanjem trenjem sa mešanjem dat je na slici 2.9.



Slika 2.9. Vrste ZTM zavarenih spojeva: a) sučeoni spoj; b) ivični sučeoni spoj; c) T sučeoni spoj; d) preklopni spoj; e) višestruki preklopni spoj; f) T preklopni spoj; g) ugaoni spoj [2]

Ako se zavarivanjem trenjem sa mešanjem spajaju čelik ili legure titana, moguće je zavariti limove do 25mm debljine, dok za slučaj zavarivanja legura aluminijuma moguće je zavariti delove debljine do 75mm, a ukoliko se koristi alat u obliku Kalema (Bobbin alat), moguće je zavarivanje i većih debljina.

ZTM postupak se kod sučeonih spojeva najčešće koristi za zavarivanje limova debljine od 1mm do 10mm, dok se kod preklopnih najčešće zavaruju debljine limova od 1mm do 6mm debljine. Zavarivanje je moguće izvršiti i sa više alata istovremeno. Uz upotrebu numerički vođenih mašina moguće je zavarivanje u različitim pravcima, kao i krivolinijsko zavarivanje. ZTM je moguće izvesti u svim položajima zavarivanja jer nema rasprskavanja materijala. Razvoj tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem FSSW-a, omogućeno je zavarivanje u uslovima složene montaže delova.

2.2.4. Generisanje toplote

Za razumevanje postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem jako je bitno poznavanje načina generisanja toplote. Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem rezultira intenzivnom plastičnom deformacijom oko rotirajućeg alata i trenjem između alata i osnovnog materijala. Oba ova faktora doprinose povećanju temperature unutar i oko zone mešanja. Kako raspodela temperature unutar i oko zone mešanja direktno utiče na mikrostrukturna svojstva zavara, kao što su veličina zrna, granice zrna, ukрупnjavanje i rastvaranje taloga, te rezultujuća mehanička

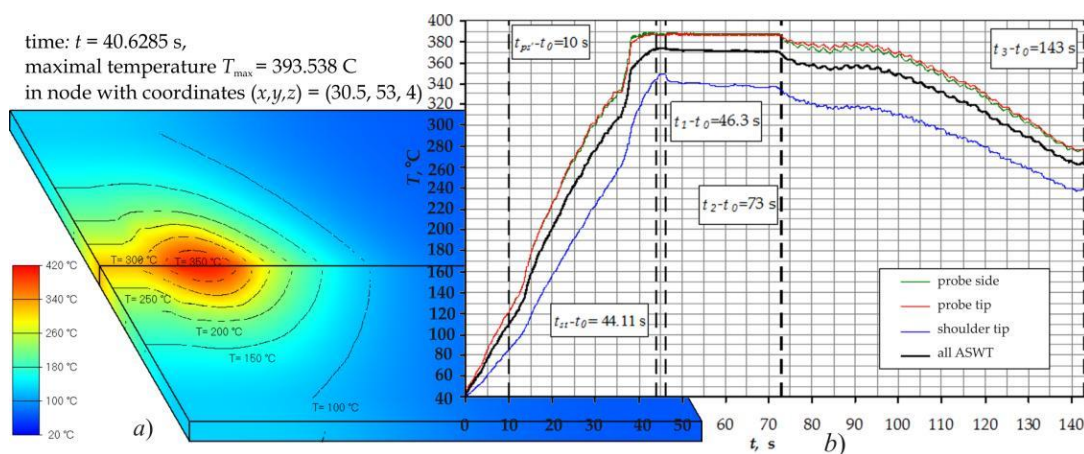
svojstva zavarenog spoja, važno je dobiti informacije o raspodeli temperature tokom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Međutim, merenje temperature unutar zone mešanja je veoma teško zbog intenzivne plastične deformacije nastale rotacijom i translatornog kretanja alata. Stoga, su maksimalne temperature unutar zone mešanja za vreme zavarivanja trenjem sa mešanjem ili procenjene na osnovu mikrostrukture zavarenog spoja ili snimljene pomoću ugrađenih termoelementa u područja koja se nalaze uz rotirajući trn alata.

Frigaard i dr. su u radu [39], prikazali razvijeni numerički trodimenzionalni model transfera toplote u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem za aluminijumske legure koje otvrdnjavaju u procesu starenja. Ovaj razvijeni model je zasnovan na metodi konačnih razlika, a implementiran je u okruženju Matlab 5.2. Prosečna generisana količina toplote po jedinici površine i vremenu prema njihovom modelu je:

$$q_0 = \frac{4}{3} \pi^2 \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot R^3 \quad (2.1)$$

gde je: q_0 snaga alata koja se transformiše u toplotu u W, μ koeficijent trenja, p pritisak u Pa, ω ugaona brzina alata (s^{-1}) i R poluprečnik alata u m.

Mijajlović u radovima [40, 41] daje prikaz razvijenog numeričkog trodimenzionalnog modela transfera toplote u razvojnom okruženju Visual Basic 6.0. Razvijeni model je zasnovan na metodi konačnih razlika. Na osnovu količine generisane toplote, određene u vidu analitičkog modela i na osnovu termo-mehaničkih svojstava legure aluminijuma 2024 T351 kao rezultat numeričke simulacije dobijeno je temperaturno polje sučeonog zavarenog spoja ostvarenog trenjem sa mešanjem dato na slici 2.10.



Slika 2.10. Temperaturno polje zavarenog spoja dobijeno numeričkom simulacijom [41]

Mijajlović u radovima [40, 41, 42] daje analitički model generisanja toplote za konusni oblik trna, a H Schmidt u radu [43] daje analitički model generisanja toplote za cilindrični oblik trna. Kako se toplota generiše usled trenja u kontaktu osnovnog materijala i aktivnih površina alata (ramena alata i trna alata) i usled plastične deformacije usled rotacionog i translacionog kretanja alata to je ukupna količina generisane toplote:

$$Q_{uk} = \delta \cdot Q_{def} + (1 - \delta) \cdot Q_{adh} \quad (2.2)$$

gde je $\delta = v_{om}/v_{rot}$ – koeficijent stanja, koji daje odnos brzine tečenja osnovnog materijala i obimne brzine alata.

Prema [43] izrazi za generisanje toplote deformacijom Q_{def} i za generisanje toplote adhezijom Q_{adh} :

$$Q_{def} = \frac{2}{3} \pi \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \omega \left[(R_{rame}^3 - R_{trn}^3) \cdot (1 + \tan \alpha) + R_{trn}^3 + 3R_{trn}^2 \cdot H_{trn} \right] \quad (2.3)$$

$$Q_{adh} = \frac{2}{3} \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \left[(R_{rame}^3 - R_{trn}^3) \cdot (1 + \tan \alpha) + R_{trn}^3 + 3R_{trn}^2 \cdot H_{trn} \right] \quad (2.4)$$

Ukupna generisana količina toplote:

$$Q_{uk} = \frac{2}{3} \pi \left[\delta \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} + (1 - \delta) \cdot \mu \cdot p \right] \cdot \omega \cdot \left[(R_{rame}^3 - R_{trn}^3) \cdot (1 + \tan \alpha) \right] + R_{trn}^3 + 3R_{trn}^2 \cdot H_{trn} \quad (2.5)$$

J. W. Pew i dr. u radu [44], daju zavisnost generisane količine toplote u funkciji odnosa n/v , zanemarujući gubitke. Ulazna snaga u procesu zavarivanja se određuje izrazom:

$$P = T \cdot \omega = T \cdot 2\pi \cdot n \quad (2.6)$$

gde je:

P – snaga mašine koja se troši na proces zavarivanja u W,

ω – ugaona brzina alata u rad/min,

T – obrtni moment u Nm,

n – broj obrtaja alata u min^{-1} .

Iz snage zavarivanja može se predvideti količina generisane toplote Q u J/mm, deljenjem snage zavarivanja sa brzinom zavarivanja v u mm/min:

$$Q = \frac{P}{v} = \frac{T \cdot \omega}{v} = T \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{v} \quad (2.7)$$

Ovo je samo procena generisane količine toplote zbog gubitaka toplote usled zračenja i provođenja toplote kroz osnovni materijal. Gubici zavise od vrste osnovnog materijala i debljine osnovnog materijala koji se zavaruje.

Termički granični uslovi na donjoj strani delova koji se zavaruju su bitni za kvalitet zavarenog spoja odnosno za mehanička svojstva zavarenog spoja, za određeni tip legure, geometriju alata i odabrane parametre postupka (brzina zavarivanja, broj obrtaja alata itd.). Ovi termički granični uslovi su regulisani korišćenim materijala podnožne ploče sa vrlo različitim koeficijentima prelaza toplote. Korišćenjem podnožne ploče od austenitnog čelika sprečava se brzo odvođenje toplote iz zone zavarivanja, stabilizuju se temperatura delova koji se zavaruju što direktno utiče na mikrostrukturu zavarenog spoja [45, 46].

2.2.5. Parametri zavarivanja

Postoji znatan broj ulaznih parametara potrebnih za proizvodnju zavarenog spoja, kao što su broj obrtaja alata odnosno ugaona brzina alata, brzina translatornog kretanja alata odnosno brzina zavarivanja, aksijalna sila, dubina uranjanja, ugao nagiba alata, geometrija i karakteristike ramena i trna [27]. Mehanička svojstva i mikrostruktura zavarenog spoja zavise od ovih faktora i ako parametri nisu dobro odabrani, odnosno ako nisu optimalni, kvalitet zavara je ugrožen [8, 47, 48].

2.2.5.1. Broj obrtaja i brzina translatornog kretanja alata

Broj obrtaja alata n u min^{-1} odnosno ugaona brzina ω i brzina translatornog kretanja alata, odnosno brzina zavarivanja v u cm/min (mm/min) su najvažniji parametri zavarivanja trenjem sa mešanjem jer su odgovorni za mešanje materijala. Ova dva parametra imaju važnu ulogu u obezbeđenju kvaliteta zavarenog spoja. Optimalan odnos između rotacione i linearne brzine n/v je potreban da bi se garantovalo dobro mešanje materijala i unos toplote u celoj liniji zavarenog spoja [49]. Ovaj odnos n/v je često označen kao odnos zavarivanja (weld pitch) i direktno je proporcionalna sa generisanom toplotom u zavarenom spoju [50]. Prema P. Vilaca i dr. [51], klasifikuju se uslovi ZTM zavarivanja zavisno od odnosa broja obrtaja (n u min^{-1}) i brzine zavarivanja (v u mm/min) u rasponu od vrućih do hladnih zavara definisanom na sledeći način:

$$\frac{n}{v} > 4 \text{ ZTM uslovi "vrućeg" zavara}$$

$$2 \leq \frac{n}{v} \leq 4 \text{ uslovi "srednjeg" zavara}$$

$$\frac{n}{v} < 2 \text{ ZTM uslovi "hladnog" zavara}$$

Prema [51], [52] „vruće“ zavare karakteriše najveća generisana toplota, odnosno dobijeni su maksimalnim brojem obrtaja alata i minimalnom brzinom zavarivanja, i imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na „hladne“ zavare. Razlike u mehaničkim svojstvima između dve vrste zavara objašnjavaju se na osnovu mikrostrukturne analize zavarenih spojeva.

Dominantni parametri zavarivanja trenjem sa mešanjem, broj obrtaja alata n i brzina zavarivanja v , odnosno odnos n/v utiču na veličinu zone mešanja i mikrostrukturu zavarenog spoja [53].

Prema tome, moraju se vršiti eksperimentalna istraživanja zavarivanja sa različitim kombinacijama parametara n/v da bi se dobro razumelo ponašanje makro i mikrostrukture materijala i mehaničkih svojstava zavarenih spojeva.

T. Saeid i dr. u radu [54] daju istraživanje uticaj brzine zavarivanja (50, 100, 150, 200 mm / min) na mikrostrukturu i mehanička svojstva dupleks nerđajućeg čelika sa zaključkom da će se sa povećanjem brzine zavarivanja, unos toplote smanjiti. Što je manji unos toplote, manja je veličina zrna mikrostrukture što dovodi do povećanja čvrstoće i tvrdoće materijala. Međutim, niski unosi toplote mogu dovesti do oštećenja nalik na žleb duž linije spoja zbog neispravnog protoka materijala.

R. Kosturek i dr. u radu [55] daju istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na mikrostrukturu i mehanička svojstva legure AA 2519 modifikovane sa 0,16% Sc. Uslovi zavarivanja su bili u domenu ne vrućeg zavara.

U radu [56], Saad Ahmed Khodir i dr. daju istraživanje uticaja broja obrtaja alata, pri konstantnoj brzini zavarivanja od 50 mm/min na mikrostrukturu, raspodelu tvrdoće i zatezna svojstva kod sučeonih zavarenih ploča debljine 3 mm legure AA2024-T3. Brojevi obrtaja alata su bili 400, 600, 800, 1000, 1250, i 1500 min⁻¹.

U radu [57], T. Vuherer i dr. daju uticaj brzine zavarivanja na mehanička svojstva zavarenog spoja ostvarenog trenjem sa mešanjem legure Al-Zn-Mg-Cu (EN AW 7049). Vršena su uporedna ispitivanja uticaja parametara zavarivanja (konstantan broj obrtaja i različita brzina zavarivanja) na zatezana svojstva, profil tvrdoće, udarnu žilavost i parametre mehanike loma.

U radu [58] R.V. Barenji daje rezultate istraživanja uticaja brzine translatornog kretanja alata - brzine zavarivanja trenjem sa mešanjem na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijumske legure 7020-T6. U tu svrhu, ploče debljine 5 mm su zavarivane brzinom koja je iznosila 50, 100, 150 i 200 mm/min, a broj obrtaja alata je držan konstantnim 900 min^{-1} .

U radu [59] data su istraživanja uticaji broja obrtaja alata i brzine zavarivanja na sučeonim spojevima limova debljine 1.5 mm zavarenih trenjem sa mešanjem od legure aluminijuma 2024-T4. Varirano je pet broja obrtaja alata u rasponu od 560 do 1800 o / min i pet brzina zavarivanja od 11 do 45 mm/min. Proučavane su karakteristike mikrostrukture i mehanička svojstva (zatezanje, mikrotvrdoća i savijanje) zavarenih limova.

U radu [60] G.M. Xie i dr. su istraživali uticaj parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na zavarene spojeve legure Mg-Zn-Y-Zr. Eksperimentalno su uspešno zavarivane ploče debljine 6 mm pri čemu je brzina zavarivanja bila konstantna 100 mm/min, a broj obrtaja alata variran u rasponu od $600\text{-}1200 \text{ min}^{-1}$. Analiziran je uticaj parametara zavarivanja na strukturu zavarenog spoja. K. S. Anil Kumar i dr. u radu [61] su istraživali uticaj parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na zavarene spojeve različitih legura 2024-T351 i 7075-T651 na mikrostrukturu zavarenih spojeva, pri čemu je brzina zavarivanja bila konstantna 40 mm/min, a broj obrtaja alata variran u rasponu od $400\text{-}1800 \text{ min}^{-1}$.

Dakle, optimalni parametri – broj obrtaja alata i brzina zavarivanja, sa kojima će se dobiti dobra mehanička i mikrostrukturna svojstva zavarenog spoja, dobijaju se isključivo opsežnim eksperimentalnim ispitivanjem.

2.2.5.2. Ugao nagiba alata i dubina prodiranja u materijal

Dubina prodiranja alata u materijal je definisana kao najniža tačka ramena alata ispod površine materijala koji se zavaruje. Parametar dubine prodiranja igra ključnu ulogu u samom izgledu i kvalitetu šava. Dubina prodiranja mora biti pravilno podešena jer u slučaju većeg prodiranja ramena dolazi do lošeg kvaliteta šava, isticanja materijala van površine alata, a sa druge strane trn alat može skroz prodreti kroz materijal i dodirnuti podnožnu ploču, što bi dovelo do oštećenja samog trna. Trn alata mora biti par desetih delova milimetra iznad donje površine delova koja se zavaruju, kako bi se obezbedio dobar izgled korena šava.

Uticaj ugla nagiba alata, takođe ima uticaj na karakteristike mešanja materijala. Alat se naginje za 1° do 2° u odnosu na vertikalnu osu i upravno na pravac zavarivanja (slika 2.11).



Slika 2.11. Ugao nagiba alata [23]

Na taj način rame alata indukuje dodatnu silu pritiska na radni predmet što rezultira većim unosom toplote. Ova činjenica može biti korisna zbog činjenice da bi dodatna sila mogla ukloniti defekte kao što su pore (void) ili toplotni otvori (wormhole).

U radu [62] M. H. Tolephih i dr. daju rezultate istraživanja uticaja ugla alata na mehanička svojstva i mikrostrukturu sučeonog zavarenog spoja legure aluminijuma i komercijalno čistog bakra.

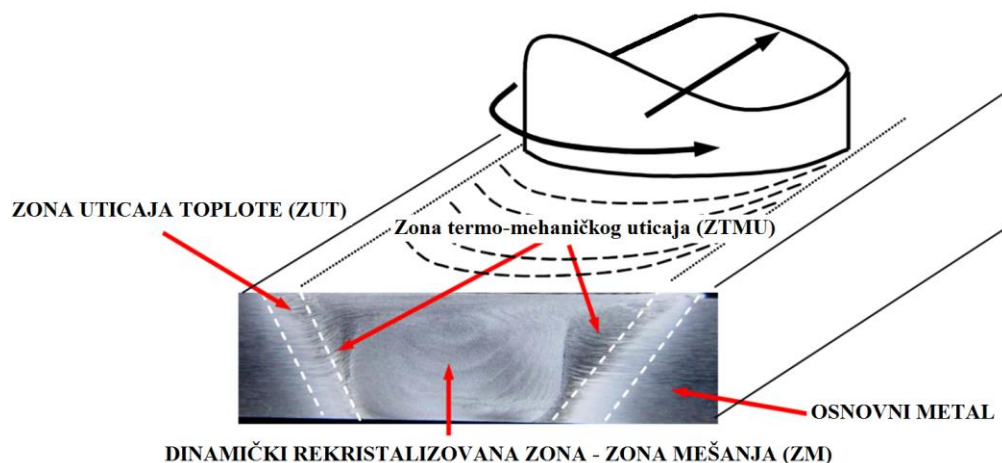
2.2.5.3. Aksijalna sila

Aksijalna sila predstavlja silu kojom alat deluje na materijal koji se zavaruje i drži materijal ispod alata, tj. sprečava tečenje materijala van površine ramena alata. Najveća sila se javlja na početku prodora trna u materijal. Zatim, aksijalna sila pada do trenutka kada rame alata dodirne površine materijala i u tom trenutku dok alat rotira u mestu i zagreva materijal, aksijalna sila ponovo raste. U trenutku kada počinje translatorno kretanje alata duž linije spajanja materijala (faza zavarivanja), dolazi do opadanja sile i do kraja zavarivanja aksijalna sila ima konstantnu vrednost. Veličina aksijalne sile zavisi kako od vrste materijala koji se zavaruje, tako i od same geometrije alata, pre svega geometrije trna alata i ramena alata. Vrednost je od 2 kN do 7 kN za slučaj zavarivanja legura aluminijuma. Intenzitet aksijalne sile utiče na mikrostrukturu i mehanička svojstva ZTM zavarenih svojstava [63].

U radu [64] istražuje se uticaj broja obrtaja ZTM alata i intenziteta aksijalne sile na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavarenog spoja i takođe zaključuje se da je neophodno eksperimentalno odrediti optimalne vrednosti parametre ova dva posmatrana parametra (n , F_a), kako bi se kao rezultata dobila najbolja mikrostrukturna i mehanička svojstva zavarenih spojeva.

2.2.6. Mikrostruktura zavarenog spoja

Prvi pokušaj definisanja mikrostrukture ZTM zavarenog spoja je bio 1997. godine na leguri aluminijuma. Svojstva ZTM zavarenih spojeva slična su zavarenim spojevima ostvarenim fuzijom. Oba zavarena spoja imaju regiju nazvanu zona uticaja toplote (ZUT) i zonu koja nije zahvaćena, poznata kao osnovni materijal (OM). Specifična geometrija alata i način zavarivanja trenjem sa mešanjem dovode do toga da kod ZTM zavarenog spoja imamo još dve karakteristične zone u mikrostrukтури: zona mešanja ili zona jezgra (zona dinamičke rekristalizacije) i zonu termo-mehaničkog uticaja. Na slici 2.12 su date tipične zone mikrostrukture zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem.



Slika 2.12. Mikrostruktura ZTM zavarenog spoja [23]

U zoni osnovnog metala, nema nikakvih mikrostrukturnih promena u materijalu, jer ta zona nije izložena bilo kakvim plastičnim deformacijama i uticaju toplote.

Kao i kod drugih postupaka zavarivanja, zona uticaja toplote (ZUT) je karakteristična i za postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem. U ovoj zoni ne dolazi do plastičnih deformacija, ali jeste izložena dejstvu toplote. Tokom zavarivanja ova zona prolazi kroz određeni temperaturni ciklus, koji dovodi do promene u mikrostrukтури i promeni mehaničkih svojstava materijala. Širina zone ZUT direktno zavisi od parametara ZTM postupka, brzine zavarivanja i broja obrtaja alata.

Na spoljnim površinama oko zone mešanja, postoji prelazna zona nazvana zona termo-mehaničkog uticaja (ZTMU) koja doživljava i toplotnu i plastičnu deformaciju. Normalno za

aluminijumske legure da nema pojave rekristalizacije u regionu ZTMU, za razliku od drugih materijala kao što su titanijum, nerđajući čelici i bakar [2, 65].

Zona mešanja (ZM) predstavlja karakterističnu zonu ZTM zavarivanja gde se javljaju najveće deformacije u materijalu. Pozicija zone mešanja u metalu šava odgovara mestu prolaza trna alata. Materijal je u zoni mešanja grubo promešan, pa je često veličina zrna u ZM manja nego veličina zrna osnovnog materijala. Veličina zrna se kreće između $1\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$. Ova oblast se formira ispod ramena alata i nešto je većeg prečnika od prečnika trna alata.

Fenomen strana napredovanja – povratna strana je još jedna reprezentativna karakteristika mikrostrukture ZTM-a. Oba su blisko povezana sa načinom na koji materijal teče oko trna alata. Stranu napredovanja karakteriše oštra granica između zone mešanja i ZTMU, dok povratnu stranu karakteriše složenija mikrostrukturu bez jasne granice između zone mešanja i ZTMU.

2.2.7. Greške u zavarenim spojevima

Veoma je važno izabrati pravu kombinaciju parametara kako bi se postigli zavareni spojevi bez grešaka i sa najboljim mehaničkim svojstvima. Parametri zavarivanja i karakteristike alata i geometrija imaju veliki uticaj na kvalitet zavara, oni kontrolišu način na koji materijal teče oko trna alata kao i količinu energije koja se daje obradku.

Neodgovarajući intenzitet zagrevanja može dovesti do formiranja ZTM grešaka kao što su nedostatak penetracije, nedostatak fuzije, tunel, šupljine, površinski žlebovi, prekomerno istisnuti materijal na licu spoja, površinsko guljenje, kolaps jezgra i nalepljivanje (kissing bond) [65, 66].

Ti se defekti ponekad dele na zapreminske nedostatke i nedostatke na liniji zavarivanja. Češća mogućnost je podela nedostataka na osnovu unosa energije. Kao što je rečeno najvažniji parametri ZTM koji se kontrolišu mašinom sa kojom se vrši zavarivanje su broj obrtaja alata (n), brzina translacije, tj. brzina zavarivanja (v). Ying Chun Chen et.al u [67] zaključuju da greške u zavarenom spoju zavise od vrednosti brzine zavarivanja tokom postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem. Zavarivanje izvedeno ispod kritične brzine daje zavarene spojeve bez nedostataka. Kada je brzina zavarivanja veća od kritične vrednosti, u spojevima se mogu proizvesti defekti zavarivanja.

Uopšteno, postoji određeni raspon kombinacija ova dva parametra zavarivanja (n , v) koji rezultira dobrim kvalitetom ZTM zavarenog spoja. Regija van nje se može podeliti na tri područja povezana sa sledećim nedostacima:

- velika količina istisnutog materijala na licu zavarenog spoja,
- defekt u obliku šupljine ili žleba je uzrokovan nedovoljnim unosom toplote,
- šupljine nastaju prekomernim mešanjem.

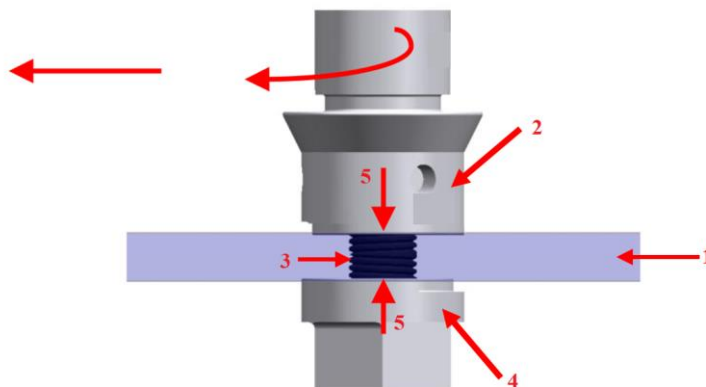
Pojava prekomerno istisnutog materijala na licu zavarenog spoja se javlja usled viška generisane toplote. Takav zavar je neprihvatljivog vizuelnog izgleda uprkos prihvatljivoj čvrstoći zavarenog spoja. Ovaj defekt za zavarivanje može se lako ukloniti glodanjem.

Defekt u korenu zavara kao što su nedostatak penetracije i defekt nalepljivanja (kissing bond) su uzrokovani nepravilnim dizajnom alata, dubinom uranjanja ili lošim mešanjem u blizini korena osnovnog materijala. Nedostatak penetracije u korenu ima veliki uticaj na mehanička svojstva kao što su radni vek, udarna žilavost, svojstvo savijanja i na nosivost. Šupljine (pore) i zavojni (pužni) otvori imaju veliki uticaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Ova vrsta defekta može se pojaviti zbog nedovoljnog protoka materijala oko trna alata, prekomerne brzine zavarivanja, nedovoljnog pritiska, nepravilnog dizajna alata ili preteranog habanja alata [29, 68].

2.2.8. Varijante zavarivanja trenjem sa mešanjem

Iz izvornog postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem razvile su se varijante modifikovanih postupaka sa aspekta modifikacije alata i promene u metodologiji spajanja kao što su: Friction Spot Welding (FSpW), Friction Riveting (FricRiveting), Friction Stir Processing (FSP), Friction Surfacing (FS), Bobbin-tool Friction Stir Welding (BTFSW) and Stationary Shoulder Friction Stir Welding (SSFSW) [69].

Posebno treba izdvojiti postupak zavarivanja BTFSW – zavarivanje trenjem sa mešanjem pomoću tzv. alatom u obliku kalema (Bobbin alat), kod kog alat ima rame i sa gornje i sa donje strane delova koji se zavaruju, pa je samim tim i generisanje toplote veće (slika 2.13). Za razliku od klasičnog alata za ZTM zavarivanje, kod zavarivanja bobbin alatom, pre samog početka potrebno je obradnom mašinom izraditi tehnološki otvor, gde će alat započeti svoj prodor u materijal. Alat po završetku zavarivanja izlazi iz materijala u pravcu svog translatornog kretanja, povlačeći za sobom materijal, pa je kao i kod klasičnog postupka ZTM-a potrebno odsecanje viška na kraju delova koji se zavaruju. Kod ovog načina zavarivanja nema mogućnosti za postavljanje podnožne ploče.



Slika 2.13. Zavarivanje trenjem sa mešanjem sa alatom u obliku kalema [23]
 1- radni predmeti; 2 – gornje rame alata; 3 – trn; 4 – donje rame alata; 5 – reaktivne sile

U Japanu (HZG Patent 199 56 963.0) je za potrebe zavarivanja određenih pozicija u autoindustriji razvijen i postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSpW – FriStion Spot Welding; FSSP- FriStion Stir Spot Welding). Postupak je dosta sličan sa postupkom zavarivanja ZTM-a. Geometrija alata je dosta slična kao i kod klasičnog postupka ZTM zavarivanja. Jedina razlika je u tome što ovde nemamo translatorno kretanje alata.

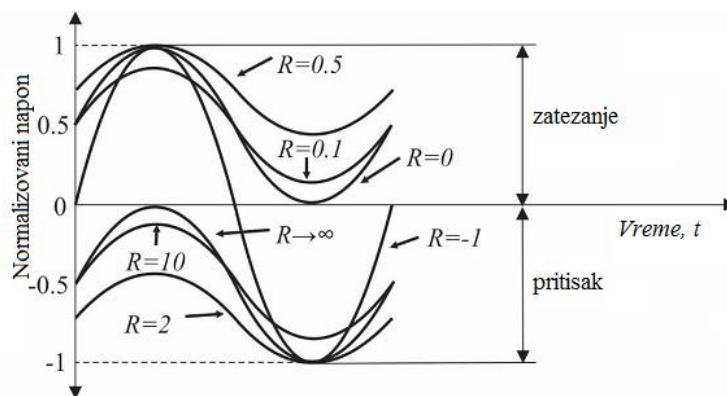
2.2.9. Istraživanje zavarivanja trenjem sa mešanjem u Srbiji i okruženju

Prvo eksperimentalno zavarivanje legure aluminijuma 2024 primenom postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem u Srbiji pod rukovodstvom prof. dr Miroslava Đurđanovića je uspešno izvršeno u Nišu u jednoj radionici u centru grada 13.03.2009. u okviru eksperimentalnog dela disertacije A. Živkovića [8]. Od 2009. u Srbiji su vršena istraživanja u oblasti zavarivanja trenjem sa mešanjem uglavnom sa legurama aluminijuma serije 2XXX i 5XXX i to: A. Živković istraživanja uticaja geometrije alata na postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al 2024 [8], M. Mijajlović istraživanja vezana razvoj analitičkog modela za određivanje količine generisane toplote pri postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem [40], D. Veljić eksperimentalna i numerička istraživanja postupka ZTM [70], D. Živojinović istraživanja primene mehanike loma na proceni integriteta zavarenih konstrukcija postupkom ZTM [71], I. Radisavljević istraživanja uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na svojstva zavarenih spojeva [72] i M. Perović istraživanja uticaja parametara zavarivanja trenjem – mešanjem na otpornost prema lomu sučeonog spoja legure aluminijuma visoke čvrstoće (serija legura aluminijuma 7XXX) [73].

2.3. ZAMOR MATERIJALA

Zamor predstavlja fenomen koji se javlja u mašinskim elementima i mašinskim konstrukcijama u uslovima promenljivog opterećenja, čiji je nivo značajno niži od granice tečenja materijala u statičkim uslovima. Još sredinom 19. veka Veler je vršio istraživanja na glatkim epruvetama i epruvetama sa zarezom i zaključio da je amplituda napona σ_a jedan od najvažnijih činilaca koji određuju zamorni vek mašinskog elementa. Basquin je prvi nacrtao Velerov dijagram ili S-N dijagram.

Promenljiva opterećenja koja se javljaju za vreme rada nekih komponenti i struktura mogu biti prikazana sa dovoljnom preciznošću, za potrebe različitih inženjerskih primena, pomoću naponskih ciklusa sa konstantnim srednjim naponom i amplitudom. Na slici 2.14 prikazani su različiti slučajevi opterećenja za različite vrednosti koeficijenta asimetrije ciklusa $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$.



Slika 2.14. Slučajevi opterećenja za različite vrednosti koeficijenta asimetrije ciklusa R

Naponski ciklusi, prema učestanosti promene opterećenja, su podeljeni u dve grupe na naponske cikluse koji izazivaju: visokociklični zamor i niskociklični zamor.

Kod niskocikličnog zamora, vrednosti promenljivog opterećenja prekoračuju granicu tečenja materijala, tako da se oko vrha prsline stvara plastično deformisana zona, što uslovljava konačni lom nakon relativno niskog broja ciklusa opterećenja ($N < 10^4$ (10^5) ciklusa opterećenja) [74, 75].

U slučaju kada vrednosti promenljivog opterećenja izazivaju u materijalu napone manje od granice tečenja materijala (deformacije na nivou elastičnih), broj ciklusa opterećenja potreban za razvoj prsline i njihov rast do kritične veličine iznosi $N > 10^4$ (10^5) ciklusa opterećenja, pa se takav zamor zove visokociklični zamor materijala [74, 75].

Učinak srednje vrednosti napona je vrlo važan jer ima velik uticaj na dinamičku izdržljivost. Zatezna naprezanja imaju negativni uticaj na dinamičku izdržljivost, a srednja vrednost napona pri naprezanju na pritisak ima pozitivni efekat na dinamičku izdržljivost [76, 77]. Postoje matematički modeli kojima se može predvideti efekat vrednosti srednjeg napona na osnovu podataka o opterećenju [76].

Istraživači su relativno rano uočili da promene u geometriji mašinskih elemenata dovode do lokalno povišenih napona. Zavareni spojevi su mašinski elementi koje karakteriše nesavršenost, postojanje brojnih grešaka, kao što su prsline, pore i sl. Prsline u zavarenim spojevima nastaju kao posledica toplotnih i metalurških procesa. Prsline se razvrstavaju na tople (vruće), hladne, lamelarne i prsline od žarenja. Sa druge strane, zavarene konstrukcije su najčešće podvrgnute uslovima dinamičkog opterećenja, koje dovodi do iniciranja prslina i daljeg širenja prslina, koje nakon dovoljnog broja ciklusa opterećenja uzrokuje otkaz konstrukcije. Radni vek konstrukcije opterećene dinamičkim opterećenjima uglavnom zavisi od brzine rasta prsline [76]. Proučavanje zamora zavarenih konstrukcija postalo je vrlo važno za industriju, budući da je otprilike 90% svih mehaničkih otkaza nastaje usled ove pojave. Ispitivanje na zamor postalo je vrlo značajno kao rezultat sve veće upotrebe materijala visoke čvrstoće i potrebe za većom nosivošću ovih materijala.

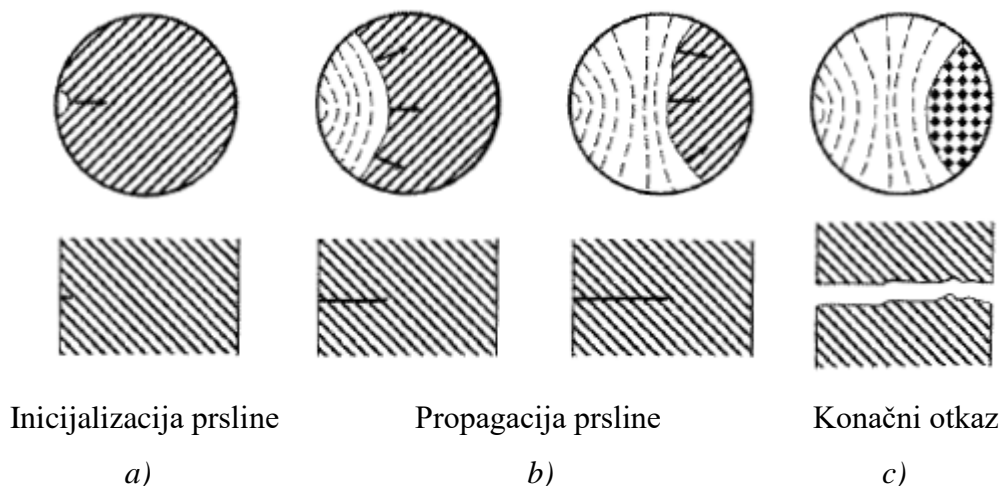
2.3.1. Karakterizacija procesa zamora materijala

Najrealnija objašnjenja mehanizma procesa zamaranja su ona koja se daju uz posmatranje makropojava i promena u mikrostrukturi. Fraktografija predstavlja studiju površine loma, za čiju se analizu najčešće koriste metode elektronske mikroskopije, od kojih su najviše u upotrebi: skenirajuća (SEM), transmisiona (TEM) i jonska (JEM). Pri tome, polomljena površina iseca se na odgovarajuću veličinu, čisti od svih organskih ostataka i montira na nosač uzoraka za SEM posmatranja.

Do otkaza konstrukcije usled zamora dolazi usled inicijalizacije i širenja jedne ili više prslina koje uzrokuju lom konstrukcije. Proces zamora može se podeliti u tri različite faze [76].

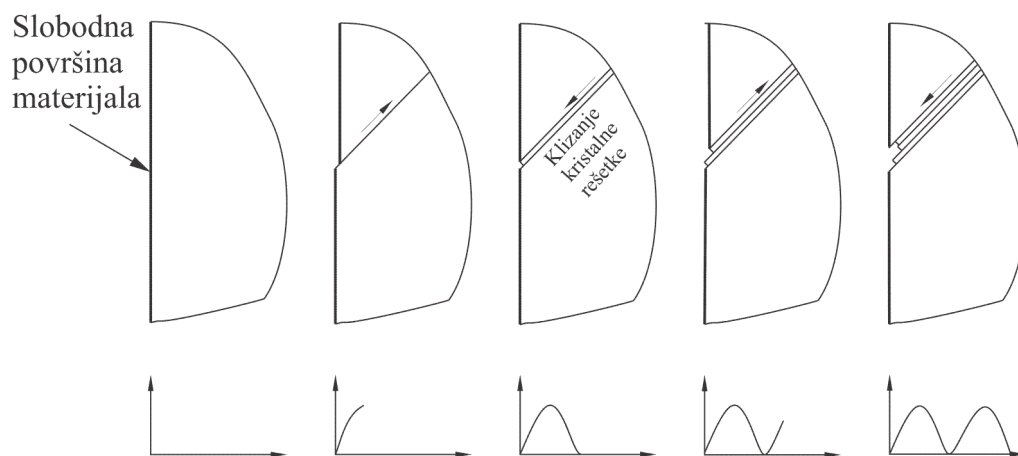
Prva faza je faza inicijalizacije prsline (slika 2.15,a) - pokretanje jedne ili više mikro prslina. Mikroprsline obično počinju od nekog zareza ili nekog drugog površinskog diskontinuiteta koji dovodi do koncentracije napona. Promenljiva opterećenja izazivaju stvaranje

ekstruzija i intruzija, pri čemu su intruzije izvori koncentracije napona, odnosno mesta na kojima se iniciraju prsline.



Slika 2.15. Faze razvoja zamorne prsline u životnom veku konstrukcije [76]

Mikroskopskim istraživanjima je utvrđena pojava inicijalnih prsline u vrlo ranoj fazi životnog veka konstrukcije. Inicijacija prsline započinje klizanjem po granicama zrna. Ciklično klizanje nastaje kao rezultat cikličnog smicajnog naprezanja (slika 2.16). Ovakvim klizanjem se stvaraju ekstruzije (ispupčenja) i intruzije (inicijalna udubljenja) (slika 2.16). Inicijalna udubljenja i ispupčenja, koja se javljaju na površini materijala su orijentisane pod uglom od 45° u odnosu na pravac delovanja glavnih napona.



Slika 2.16. Inicijalizacija prsline – stvaranje intruzija i ekstruzija

Kako prslina raste i ulazi sve dublje u materijal, njen rast sve više ograničava okolni materijal tog zrna i susednih zrna. Zbog ove pojave, nakon početnog rasta mikroprslina, rast prslina se više ne događa u smeru početnog klizanja (45°) već dominantan postaje smer propagacije prslina upravan na pravac delovanja glavnih napona. Prslina pokazuje tendenciju širenja kroz zrna materijala. Brzina rasta mikroprslina u periodu inicijacije je vrlo mala, pa je i vreme neophodno za iniciranje prslina dugo, odnosno ima značajni udeo u zamornom veku konstrukcije.

U drugoj fazi (slika 2.15,b) se događa stabilno širenje prslina. Prslina nastavlja da se širi usled cikličnog opterećenja. U slučaju niskociklički zamor, faza iniciranja prslina traje vrlo kratko. U ovom slučaju, faza stabilnog širenja prslina prisutna je u gotovo celom području prelomne površine. Kako će se širiti prslina, zavisi od vrste naprežanja. Brzina rasta prslina je od $\sim 10^{-8}$ do 10^{-3} mm/ciklusu.

Treća faza zamornog loma je nestabilan rast prslina (slika 2.15,c). U ovoj fazi dolazi do naglog širenja prslina i nestabilnog loma konstrukcije. Kod krutih materijala, lom konstrukcije započinje u trenutku kada je postignuta kritična dužina prslina. Kod žilavih materijala početak loma zavisi od vrste naprežanja.

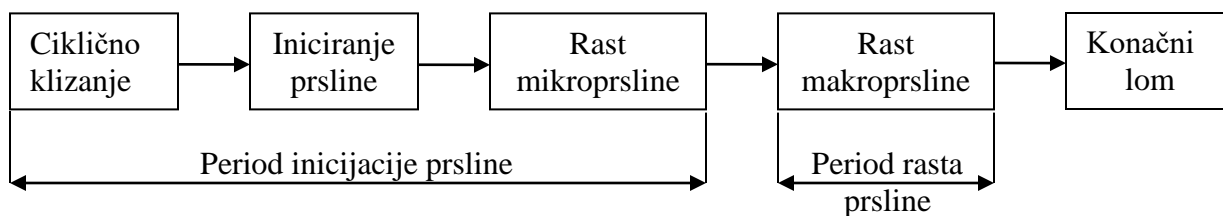
Na slici 2.17 prikazan je tipičan izgled prelomne površine nastale usled zamora materijala.



Slika 2.17. Izgled površine preloma usled zamora materijala

Na prikazanoj površini preloma usled zamora (slika 2.17) uočavaju se dve međusobno po izgledu i veličini različite površine preloma. Glatka površina je zona preloma usled zamora materijala, i druga zona koja karakteriše površinu nasilnog – statičkog loma. Prema izgledu površine loma usled zamora, odnosno prema odnosu površine zone preloma usled zamora i zone nasilnog loma (prema njihovom obliku i mestu), mogu se pretpostaviti vrste i veličine naprezanja koje su izazvale lom.

Zamorni vek je generalno podeljen na tri faze: period inicijacije prsline, period rasta prsline i konačni lom (slika 2.18).



Slika 2.18. Faze zamornog veka

Zamorni vek se definiše ukupnim brojem ciklusa napona do konačnog loma:

$$N_f = N_i + N_p \quad (2.8)$$

Realno, konstrukcije su tokom rada opterećene dinamičkim opterećenjima stohastičkog karaktera. Za ovaj slučaj opterećenja postoje kumulativni modeli oštećenja za predviđanje količine oštećenja koju konstrukcija (komponenta) može izdržati. Pravilo Miner-a je uobičajena metoda za procenu radnog veka konstrukcije opterećene sa promenljivom amplitudom [77].

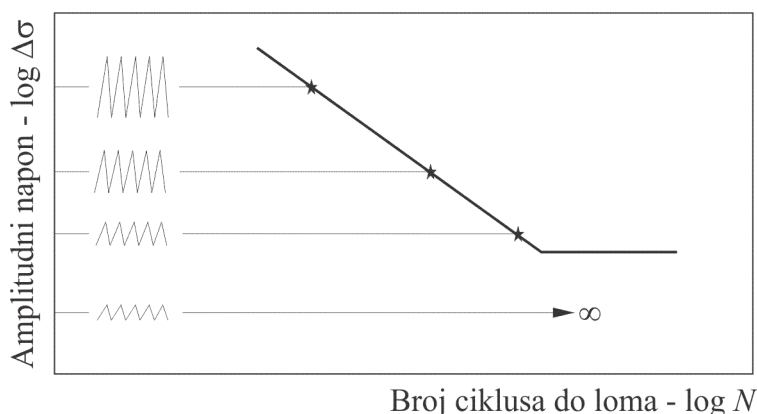
Istovremeno sa proučavanjem zamora materijala, kroz istoriju su se razvijali i uređaji za eksperimentalno ispitivanje zamora.

2.3.2. S-N kriva (Velerova kriva)

Za određivanje dinamičke izdržljivosti potreban je veliki broj epruveta, najmanje po 2 epruvete, za određenu vrednost amplitudnog napona σ_a u području vremenske dinamičke izdržljivosti pri konstantnom odnosu opterećenja $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$, a u području standardom definisane zamorne čvrstoće – trajne dinamičke izdržljivosti i veći broj epruveta radi utvrđivanja njenog tačnog nivoa [77]. Oblik i dimenzije epruveta za normalna ispitivanja propisuju se u

odgovarajućim standardima u zavisnosti od svrhe i načina ispitivanja zamaranjem (zatezanjem, pritiskivanjem, savijanjem, uvijanjem, ili kombinovanim naprezanjem). Ispitivanje može biti izvedeno u svrhu određivanja karakteristike materijala sa i bez koncentratora napona, kao i svrhu provere različitih faktora koji utiču na granicu izdržljivosti. To su: uticaj obrade u hladnom stanju, uticaj frekvencije, uticaj temperature, uticaj korozije, uticaj zaostalih napona, uticaj površinske obrade i mnogi drugi faktori.

Epruvete se jedna za drugom izlažu promenljivim opterećenjima različitog amplitudnog napona σ_a do pojave vidljive prsline ili do potpunog loma (slika 2.19). Tokom ispitivanja je odnos napona R konstantan (najčešće $R=0,1$ do $0,7$). Gornji napon se smanjuje stepenasto od jedne do druge tačke Velerovog dijagrama. Za svaku epruvetu registruje se broj ciklusa N pri kome je došlo do loma epruvete. Vrednost amplitudnog napon σ_a se smanjuje sve do vrednosti pri kojoj se epruveta ne lomi, ni pošto je izdržala granični broj ciklusa N_D . Pod graničnim brojem ciklusa N_D podrazumeva se najmanji broj ciklusa posle kojeg ne nastaje lom ni pri neograničenom broju ciklusa. Kako se vrednost graničnog broja ciklusa N_D unapred ne zna, pri ispitivanju zamaranjem primenjuje se uvek neki veći broj ciklusa koji sa dovoljnom sigurnošću premašuje vrednost graničnog broja ciklusa. Ovaj broj ciklusa iznosi 10^7 - za čelike, a do 10^8 - obojene metale i njihove legure.

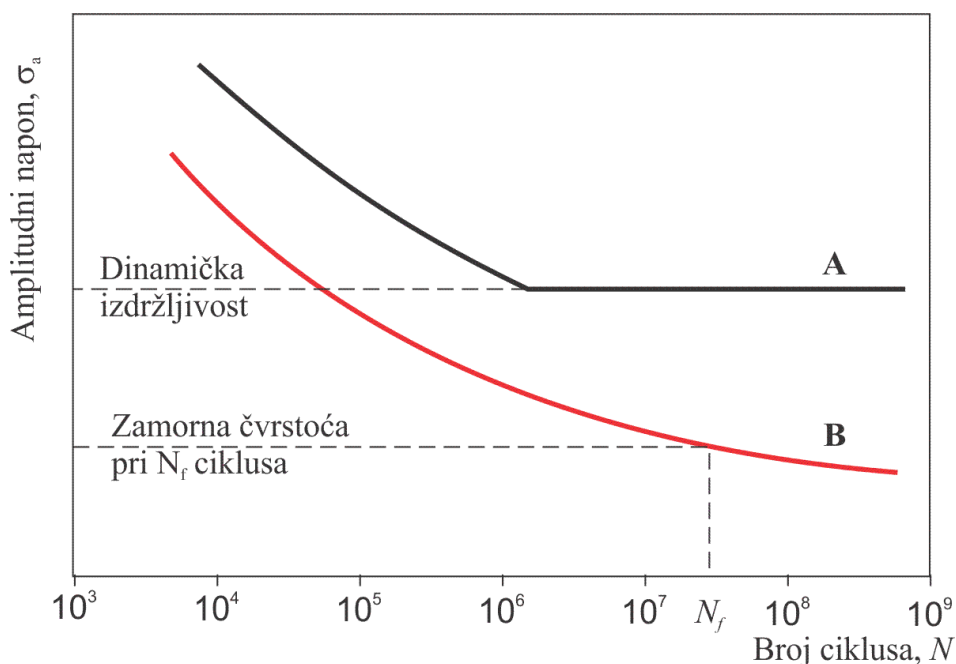


Slika 2.19. Zavisnost vrednosti amplitudnog napona i broja ciklusa do loma [78]

Rezultati ispitivanja unose se u dekartov koordinatni sistem gde je ordinata amplituda napona (σ_a ili $\Delta\sigma=2\cdot\sigma_a=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$), a apscisa odgovarajući broj ciklusa do loma N . Nakon što se tačke ispitivanja (N_i, σ_{ai}) unesu u koordinatni sistem, na osnovu rezultata ispitivanja, fitovanjem između tačaka dobija se kontinualna kriva, slika 2.20 (kriva **A**), koja najpre strmo pada, a zatim postepeno prelazi u horizontalnu pravu. Ovako dobijen dijagram naziva se dijagram zamaranja –

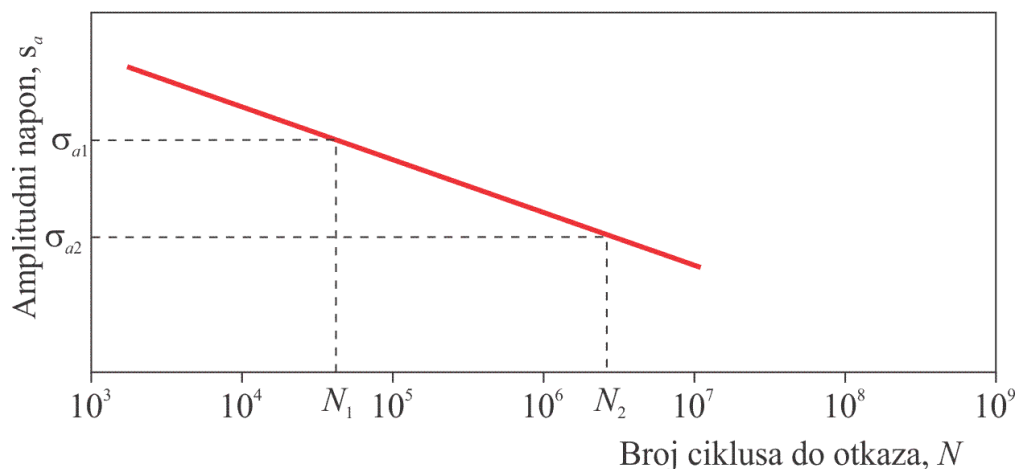
S - N kriva ili Velerov dijagram. Napon koji odgovara horizontalnom delu Velerove krive predstavlja dinamičku izdržljivost σ_D (τ_D), a to je napon koji epruveta može izdržati bez loma i pri neograničenom broju ciklusa. Ovakvu S - N krivu (slika 2.20 – kriva **A**), sa izraženom granicom dinamičke izdržljivosti imaju čelici i titan i njegove legure.

Međutim, mnogi obojeni metali i legure, kao što su aluminijum, magnezijum i legure bakra, ne pokazuju dobro definisanu granicu dinamičke izdržljivosti. Ovi materijali umesto toga pokazuju kontinuirano opadajući S - N odgovor, slično krivi **B** na slici 2.20. U tim slučajevima definiše se zamorna čvrstoća za određeni broj ciklusa N . Efektivna granica izdržljivosti za ove materijale se ponekad definiše kao napon koji izaziva otkaz pri $1 \cdot 10^8$ ili $5 \cdot 10^8$ ciklusima opterećenja.



Slika 2.20. S - N kriva (Velerov dijagram) [77]

Kako prelaz Velerove krive u horizontalu često nije lako uočljiv, preporučljivo je da podela na apscisi i ordinati bude logaritamska. Na ovaj način padajući deo Velerove krive prelazi u padajuću pravu, a sem toga tačke krive dobijene pri manjem broju ciklusa biće razvučenije, čime se postiže bolji pregled. Na slika 2.21 je prikazan jedan Velerov dijagram sa dvostrukom logaritamskom podelom osa.



Slika 2.21. Velerov dijagram sa logaritamskom podelom osa [77]

Velerova kriva daje odnos između broja ciklusa naprežavanja do loma N i raspona napona $\Delta\sigma$:

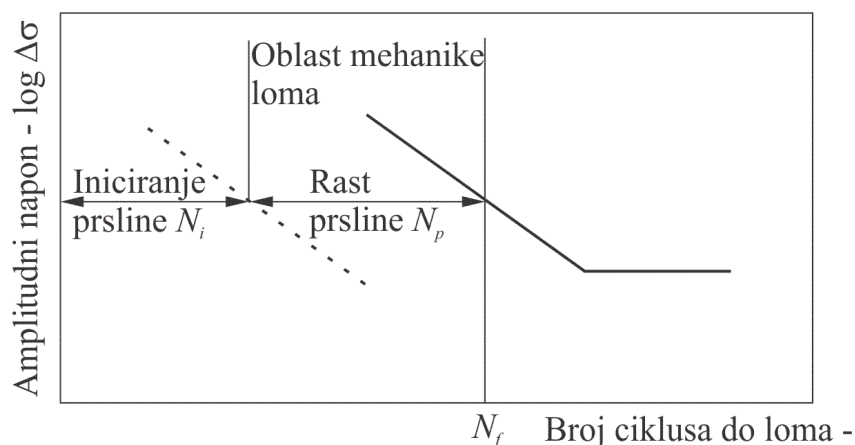
$$(\Delta\sigma)^m \cdot N = C \quad (2.9)$$

gde su:

m i C - konstante zavisne od materijala i tipa zavara, tipa opterećenja i uslovima okoline.

$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ - raspon napona, razlika najvećeg σ_{max} i najmanjeg napona ciklusa σ_{min} .

Klasični pristup konstruisanja obuhvata samo period inicijacije prsline, a mehanika loma je nauka koja se bavi ponašanjem i ispitivanjem materijala sa prslinama. Pristup mehanike loma obuhvata period rasta makro prsline do konačnog loma (slika 2.22). Filozofija mehanike loma je: živeti sa greškama u konstrukciji. Mehanika loma omogućava predviđanje radnog veka konstrukcije, odnosno definisanje trenutka kada treba izvršiti potrebno održavanje konstrukcije.



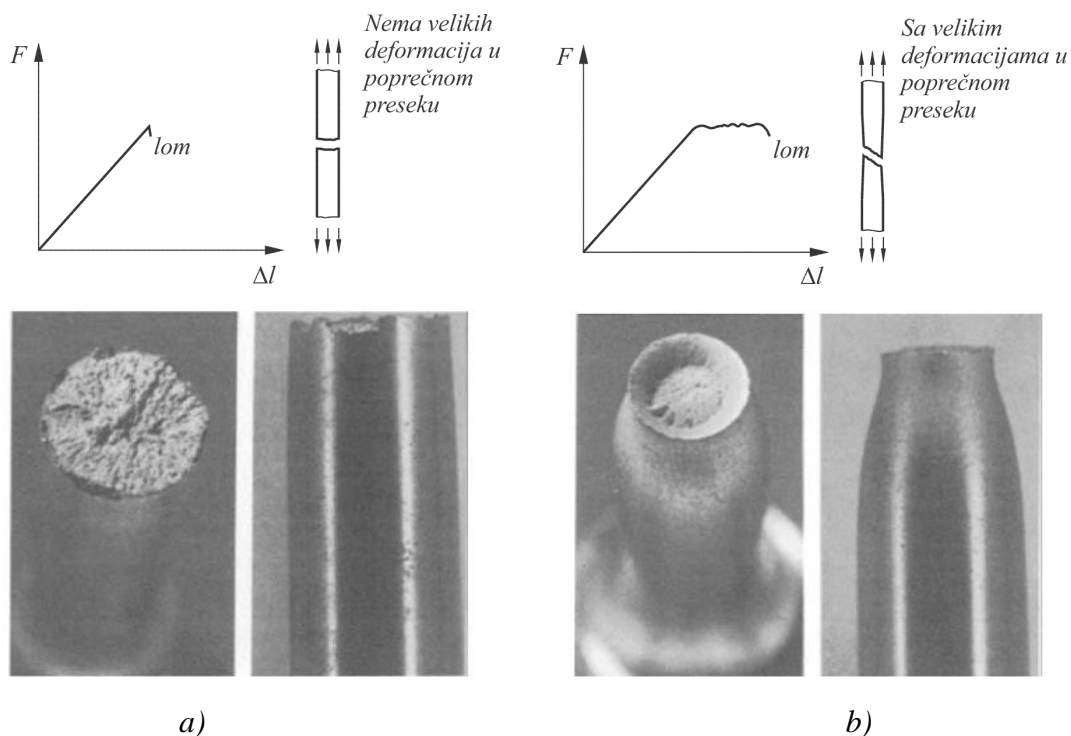
Slika 2.22. Velerova kriva i faze zamornog veka [78]

2.4. MEHANIKA LOMA

Mehanika loma je naučna disciplina koja se bavi pojavom prslina u strukturama, njihovim daljim širenjem pod dejstvom opterećenja i predviđanjem nosivosti konstrukcija. Mehanika loma zasniva se na matematičkom opisu polja napona koje okružuje prslinu u opterećenom telu.

Ako se lom posmatra kao završna faza razvoja prsline, može se zaključiti da je lom dela, uslovljen lokalnim procesima, što znači da i ukupna otpornost konstrukcionog elementa zavisi od lokalnih poremećaja. Lom je završna faza razvoja deformacije. Potpuni lom se može smatrati gubitkom kompaktnosti (razdvajanje mašinskog dela na najmanje dve nezavisne celine, uz gubitak funkcionalnosti), a nepotpuni lom se može smatrati gubitkom homogenosti usled postojanja prslina, koja se nije razvila do potpunog loma. U određenim slučajevima dopušta se pojava nepotpunog loma u konstrukciji, odnosno dopušta se kontrolisani rast prslina, kada se pouzdano utvrdi da se nastala prslina neće razviti do potpunog loma do naredne kontrole (ispitivanje konstrukcije metodama bez razaranja – radiografska ili ultrazvučna kontrola).

Veliki broj različitih uticaja i pojava vezanih za razvoj loma uslovljava i različite klasifikacije loma. Poseban značaj ima podela loma na krte i žilavi, jer ona obuhvata i uticaj deformacije koja prethodi lomu. Krte lom nastaje kod konstrukcija koje su izrađene od materijala koji se pri deformaciji samo elastično deformiše (slika 2.23,a).



Slika 2.23. Izgled prelomne površine za a) ravno stanje deformacija, b) ravno stanje napona [79]

Drugi granični slučaj predstavlja žilavi lom, koji nastaje posle plastične deformacije. U ovom slučaju, žilavi lom, za razliku od krtog loma, prati velika deformacija poprečnog preseka, odnosno prostorna deformacija (slika 2.23,b).

Na osnovu materijalnih svojstava struktura koje se analiziraju, mehanika loma se može podeliti na:

- Linearno elastičnu mehaniku loma (LEML),
- Elasto-plastičnu mehaniku loma (EPML).

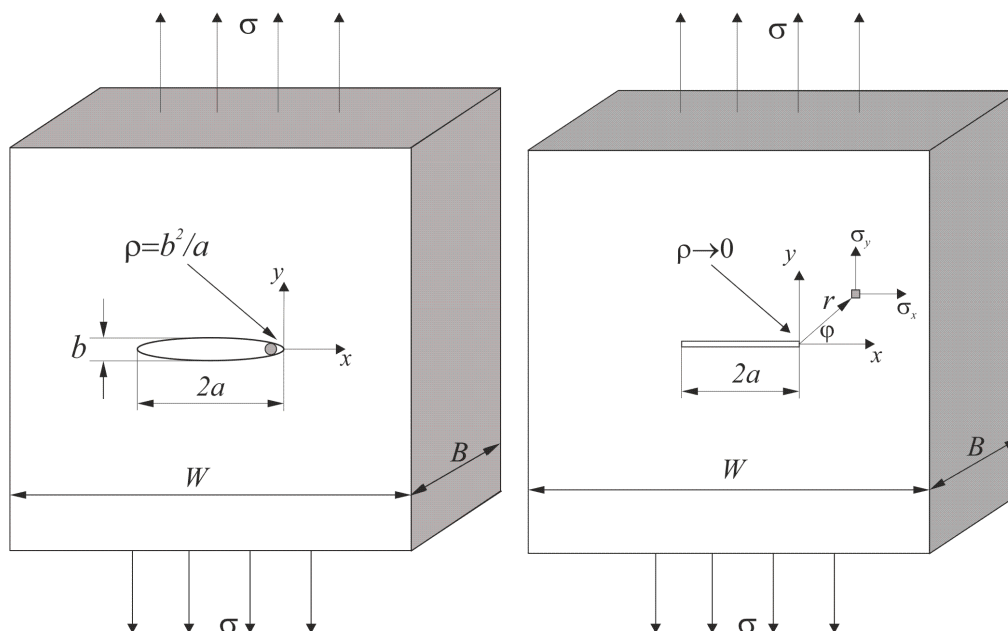
Linearno-elastična mehanika loma (LEML) se koristi kada je vrh prsline oštar i kada postoji samo mala količina plastične deformacije na prslini ili blizu nje. Ovo je obično slučaj kod materijala kod kojih se lom pojavljuje pri naponima koji su znatno ispod napona tečenja i u uslovima ravnog stanja deformacija. LEML se primenjuje za metale visoke čvrstoće, poput čelika visoke čvrstoće, titana i aluminijumskih legura. Postupci LEML se najviše koriste u avionskoj i raketnoj industriji, gde je kriterijum smanjenja težine od primarnog interesa, zbog čega se moraju koristiti materijali visoke čvrstoće, koji su istovremeno i krti.

Ukoliko je veličina plastične zone ispred vrha prsline velika u odnosu na dužinu prsline tada linearno-elastična mehanika loma više ne važi, već se moraju primeniti metode elasto-plastične mehanike loma (EPML).

2.4.1. Grifitova teorija

Grifitova (Griffith) teorija o krtom lomu (1920.) pružila je osnovu za buduće energetske koncepte inicijacije ili širenje preloma. Griffith je definisao napon na vrhu diskontinuiteta (slika 2.24) na primeru kada se eliptični otvor poluprečnika kružnice upisane u temenu elipse $\rho = b^2/a$ približava obliku prsline ($\rho \rightarrow 0$) [76]:

$$\sigma_{\max} = \alpha_k \cdot \sigma = \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \cdot \sigma = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \cdot \sigma \quad (2.10)$$



Slika 2.24. Primer diskontinuiteta u materijalu u vidu eliptičnog otvora

Za relativno dugu mikroprslinu koja ima mali poluprečnik vrha (oštra prslina), vrednost $(a/\rho)^{1/2}$ je velika pa se jednačina (2.10) svodi na [76]:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.11)$$

gde je: odnos σ_{\max}/σ faktor koncentracije napona [76]:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.12)$$

Griffith je razvio kriterijum za eliptičnu prslinu na ploči koristeći pristup energetske ravnoteže. Izjednačio je energiju elastičnog naprezanja koja se skladišti u materijalu, kao elastična deformacija, sa stvorenom površinskom energijom kada se dve nove slobodne površine formiraju tokom širenja prsline.

On je zaključio da će se prslina širiti kada oslobođena energija elastičnog naprezanja, kao rezultat širenja prsline, premaši energiju potrebnu za širenje prsline. Njegova analiza pokazala je da je kritični napon potreban za širenje prsline u krutom materijalu [76]:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a}} \quad (2.13)$$

gde je: σ_c - kritični napon, E – modul elastičnosti, γ_s – površinska energija (potrebna energija da se stvore dve nove površine preloma) i a – dužina prsline za slučaj ravnog stanja napona.

Iz jednačine (2.13) sledi:

$$2\gamma_s = \frac{\pi \cdot a \cdot \sigma_c^2}{E} = G \quad (2.14)$$

Leva strana jednačine (2.14) $2\gamma_s$ predstavlja otpornost materijala na nestabilan rast prsline, a desna strana $\pi a \cdot \sigma_c^2/E$ je brzina oslobađanja energije odnosno G sila rasta prsline.

Griffithova jednačina važi samo za krte materijale koji se samo elastično deformišu. Pošto se metali plastično deformišu, Orowan je kasnije modifikovao Griffithovu jednačinu, zamenjujući γ_s sa $\gamma_s + \gamma_p$, gde je γ_p plastična deformacija povezana sa produženjem prsline. Griffithova jednačina se zatim može napisati kao [76]:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E \cdot (\gamma_s + \gamma_p)}{\pi \cdot a}} \quad (2.15)$$

Ako je material visoko žilav odnosno $\gamma_p > \gamma_s$ [76]:

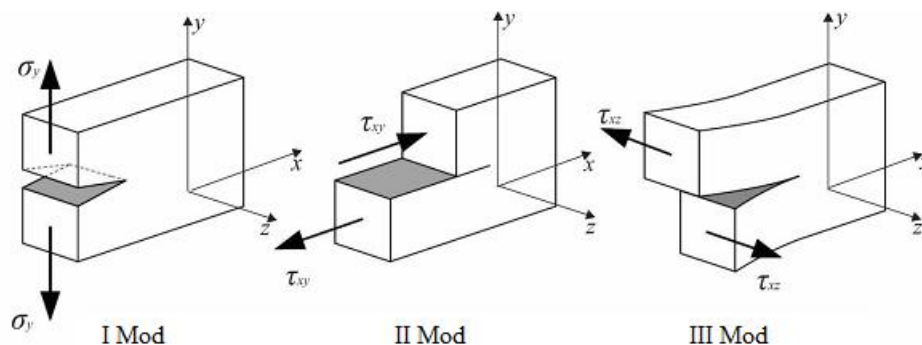
$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E \cdot \gamma_p}{\pi \cdot a}} \quad (2.16)$$

2.4.2. Linearno-elastična mehanika loma

Postoje tri su osnovna moda (oblika) otvaranja prsline i obrazovanja površina preloma:

- I mod – lom cepanjem,
- II mod – lom smicanjem u istoj ravni,
- III mod – lom smicanjem van ravni (u ravni duž čela prsline).

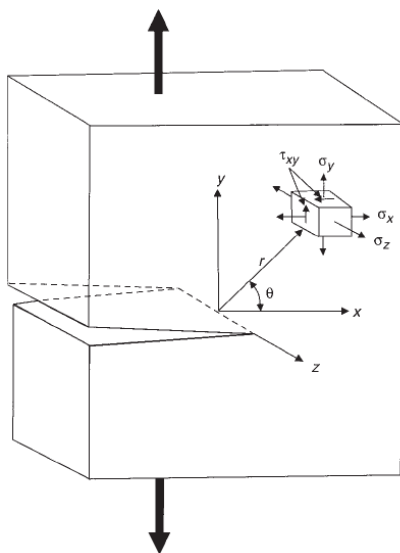
Na slici 2.25 prikazani su tri osnovna oblika otvaranja prsline.



Slika 2.25. Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma [76, 78, 79]

Lom koji nastaje pri razvoju prslina cepanjem (mod I) je najopasniji i najviše proučavan. Sila otvaranja prsline deluje upravno na ravan cepanja.

Na slici 2.26 prikazane su komponente napona koje deluju na element u blizini vrha prsline.



Slika 2.26. Komponente tenzora napona oko vrha prsline za mod I [76]

Za I mod otvaranje prsline beskonačne ploče sa prslinom na sredini (slika 2.27), naponi se mogu izraziti kao [76]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

- za ravno stanje napona

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.18)$$

- za ravno stanje deformacije

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

pri čemu je: K – faktor intenziteta napona.

Za I mod obrazovanja prsline, faktor intenziteta napona [76]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.20)$$

Za II i III mod obrazovanja prsline, faktor intenziteta napona [76]:

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad (2.21)$$

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a} \quad (2.22)$$

pri čemu je: σ – normalni napon,

τ – tangencijalni smičući napon.

Uglavno do loma kod većine materijala dolazi usled normalnih napona (I mod). Stoga je ovaj mod najviše teorijski i eksperimentalno obrađen.

Faktor intenziteta napona K_I (izraz 2.20) je funkcija napona i dužine prsline i važi samo u slučaju zategnute beskonačne ploče sa centralnom prslinom. U svim ostalim slučajevima, znači kod tela konačnih dimenzija, ivičnih i površinskih prsline ili drugačijih opterećenja, izraz (2.20) treba korigovati koeficijentom Y , koji uzima u obzir navedena odstupanja od slučaja zategnute beskonačne ploče sa centralnom prslinom [76]:

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.23)$$

Vrednosti koeficijenta Y su definisane za veliki broj različitih slučajeva [76, 79].

Brzine oslobađanja energije G i intenzitet napona K su povezani relacijom [76]:

$$K^2 = E' \cdot G \quad (2.24)$$

gde je:

$E' = E$ – za ravno stanje napona

$E' = E / (1 - \nu^2)$ – za ravno stanje deformacije

ν – Poasonov koeficijent

K – faktor intenziteta napona

G – Grifitova energija

Za svaki materijal postoji kritična veličina faktora intenziteta napona K_I , pri kojoj počinje rast prsline. Kritična veličina faktora intenziteta napona K_{Ic} zove se žilavost loma.

Žilavost loma K_{Ic} je karakteristika materijala koja kvantitativno izražava otpornost materijala na stvaranje nestabilnog preloma u slučaju da u njemu postoji prslina. Oznaka žilavosti loma K_{Ic} znači da se tokom otvaranja prsline (mod I), stanje napona na vrhu prsline ispunjava uslove ravnog stanja napona. Prema tome, do rasta prsline i loma neće doći ako je ispunjen uslov:

$$K_I < K_{Ic} \quad (2.25)$$

Žilavost loma K_{Ic} se definiše sledećom relacijom [80]:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot f\left(\frac{a_c}{W}\right) \quad (2.26)$$

gde je:

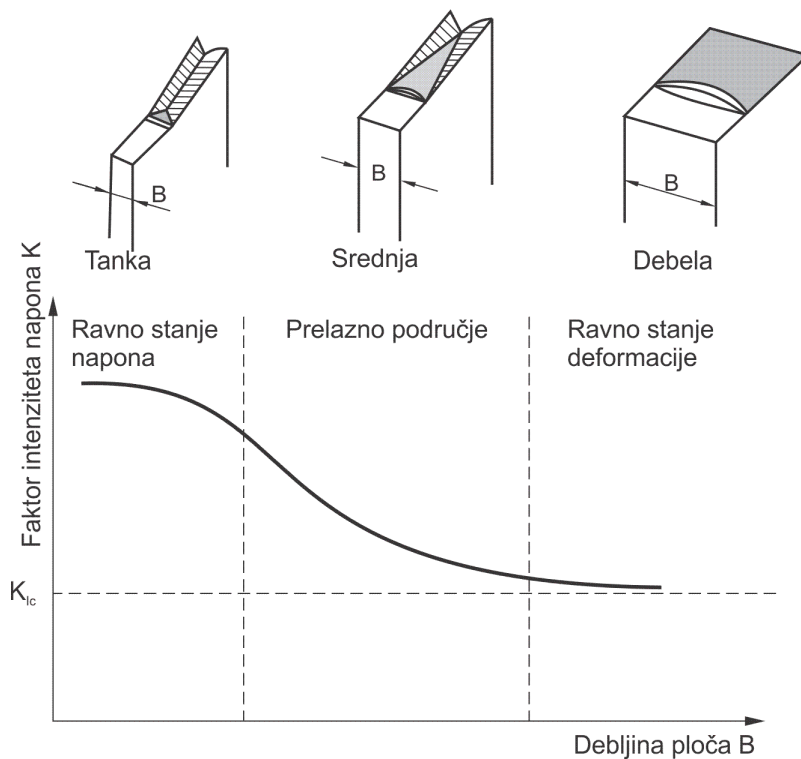
σ_c – nominalni napon pri kom dolazi do nestabilnog rasta prsline,

a_c – kritična dužina prsline,

$f(a_c/W)$ – bezdimenziona veličina koja je funkcija dimenzija epruvete.

Kritični faktor intenziteta napona zavisi od vrste materijala, uticaja okoline, debljine ploče, a u krajnjem slučaju i od dužine prsline. Budući da se kritični faktor intenziteta napona – žilavost loma menja sa debljinom ploče, to jest zavisi od nje, podatak kada ta vrednost postaje konstantna je veoma važan (slika 2.27).

To se događa kada stanje napona na vrhu prsline pređe u ravno stanje deformacije, odnosno kada je debljina ploče dovoljno velika i ne dolazi do promene faktora intenziteta napona K . Ta vrednost predstavlja minimalnu vrednost i naziva se žilavost loma i označava se sa K_{Ic} i kao takva pripada prvom i, u tehničkoj praksi, najčešće korišćenom modu otvaranja prsline.

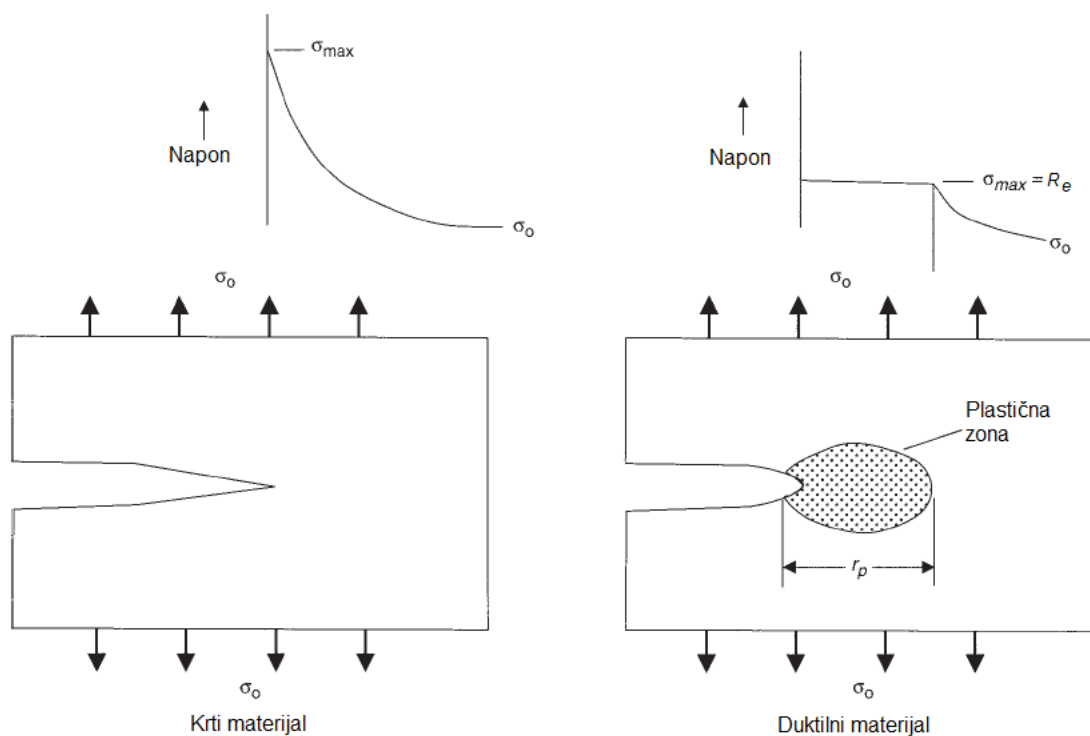


Slika 2.27. Žilavost loma u funkciji debljine ploče [76]

Žilavost loma K_{Ic} se dobija eksperimentalno sa tačno definisanim epruvetama i postupcima ispitivanja. Epruvete za određivanje žilavosti loma za I mod otvaranja prsline K_{Ic} , preporučene su standardom ASTM E399-90 [80].

2.4.3. Elasto-plastična mehanika loma

Kada napon na vrhu prsline premaši granicu tečenja, materijal koji se nalazi u blizini vrha prsline počinje plastično da se deformiše i apsorbuje energiju. Kao što je prikazano na slici 2.28, plastična zona ispred vrha prsline postaje dovoljno velika u poređenju sa dimenzijom prsline. Tada se ne mogu koristiti načela linearno elastične mehanike loma, jer material počinje da se nelinearno ponaša. Ovi slučajevi se javljaju kod materijala sa visokom žilavosti loma K_{Ic} .



Slika 2.28. Upoređenje napona ispred prsline za krte i žilave materijala [76]

Irwin je predložio da se postojanje plastične zone delovanja prsline definiše kao da je prsline duža od stvarne veličine. Predložio je da efektivna dužina prsline bude jednaka stvarnoj dužini prsline plus radijus plastične zone:

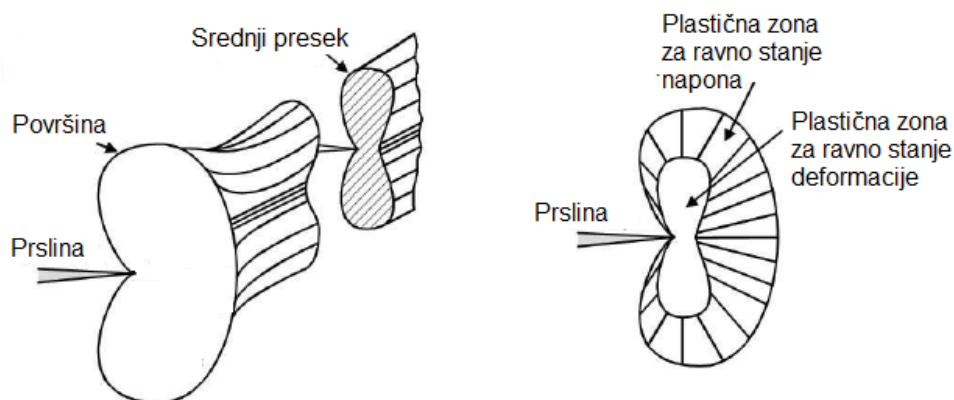
$$a_{ef} = a + r_p \quad (2.27)$$

Veličina plastične zone deformacije r_p za pretpostavljen kružni oblik plastične zone oko vrha prsline za ravno stanje napona, (slika 2.29), može da se odredi na osnovu izraza [76]:

$$r_p \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (2.28)$$

odnosno za ravno stanje deformacije:

$$r_p \approx \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (2.29)$$



Slika 2.29. Formiranje plastične zone na vrhu prsline [76]

Primene linearno-elastične mehanike loma je samo u uslovima ravnog stanja deformacije, kada se može zanemariti uticaj plastične deformacije. U slučaju materijala visoke žilavosti, oko prsline nastaje šira zona plastičnosti oko vrha prsline, pa parametri linearno-elastične mehanike loma nisu dovoljni da bi opisali polje napona i deformacija. U ovom slučaju mora se primeniti elasto-plastična mehanika loma (EPML). Elasto-plastičnom mehanikom loma određuje se: otvaranje vrha prsline (*CTOD*), J-integral i krive otpornosti (R-krive).

Standardima su definisana ispitivanja na osnovu koji se sprovode specijalizirana merenja svojstava loma:

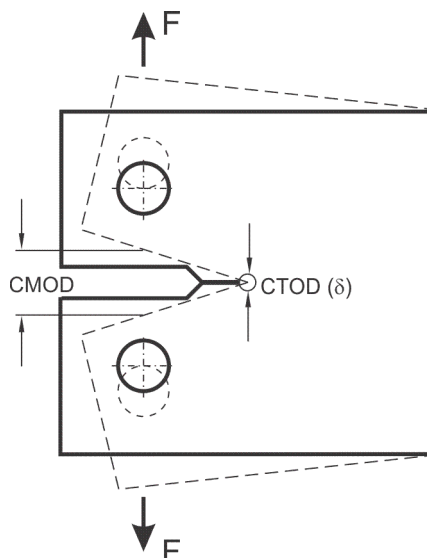
- *CTOD*: Potpuna žilavost loma za male brzine opterećenja
- J-integral: Elastično-plastična žilavost loma za male brzine opterećenja
- R-krive: Otpornost na širenje loma za elastično-plastični lom i male brzine opterećenja

2.4.3.1. Otvaranje vrha prsline CTOD

Veličina plastične deformacije na vrhu prsline proporcionalna je veličini otvaranja lica površina koja obrazuju prslinu i može se odrediti eksperimentalno. Za definisanje otvaranja prsline koriste se dva parametra:

- *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*)- otvaranje vrha prsline i
- *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*) - otvaranje usta prsline.

Na slici 2.30 prikazan je jedan tip epruvete za ispitivanje parametara mehanike loma na kojoj su prikazana mesta merenja parametra *CTOD*, i parametra *CMOD*.



Slika 2.30. Koncept merenja otvaranja vrha prsline *CTOD* na osnovu merenja otvaranja usta prsline *CMOD* [76]

Ovaj pristup temelji se na uslovu da će se prslina nestabilno širiti kada veličina otvaranja prsline δ , proporcionalan plastičnoj deformaciji, dostigne kritičnu vrednost δ_c .

Šema postepenog otvaranja prsline prikazana je na slici 2.31.

- Telo sa početnom oštrom prslinom nalazi se u stanju navedenom na slici 2.31,a. Opterećenje $F=0$ i veličina otvora prsline je $\delta_0 = 0$.
- Pod dejstvom opterećenja silom F_1 , vrh prsline se otvara (2.31,b) na vrednost δ_1 , čemu odgovara otvaranje usana prsline V_1 .
- S većom silom F_2 (2.31,c), napon ispred vrha prsline premašuje granicu tečenja i dolazi do plastične deformacije, odnosno plastične zone. U ovom slučaju, vrednost otvaranja δ_2

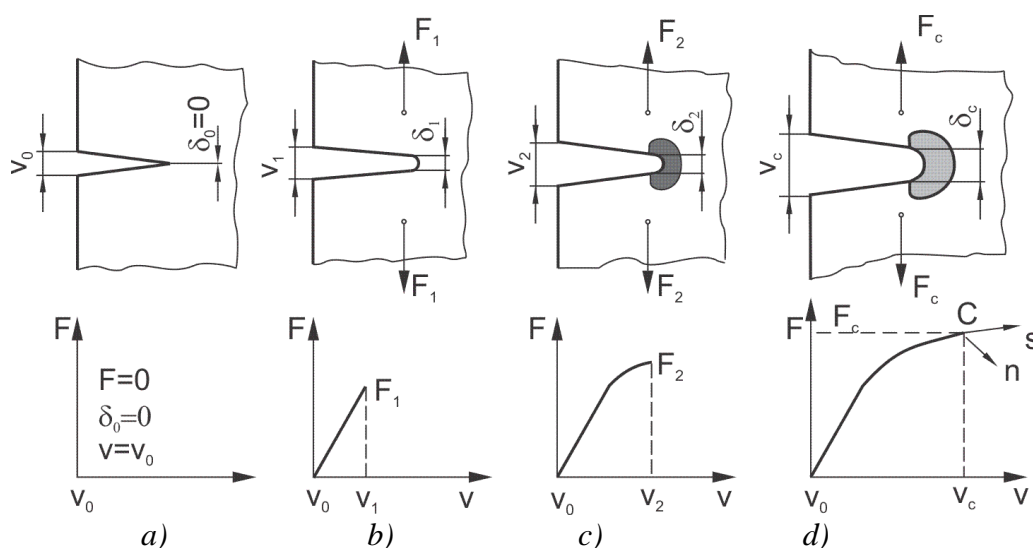
predstavlja zbir elastične i plastične deformacije na vrhu prsline, čemu odgovara vrednost otvaranja usana prsline V_2 .

- Kritični trenutak se događa tokom opterećenja silom F_c (2.31,d), kada ukupna deformacija na vrhu prsline dostigne kritičnu (graničnu) vrednost $\delta = \delta_c$, dok je $V = V_c$.

Tada se prslina počinje širiti:

- nestabilno, ako se dogodi pokretanje loma pri istovremenom oštrm padu sile (pravac n na dijagramu $F-V$ na slici 2.31,d),

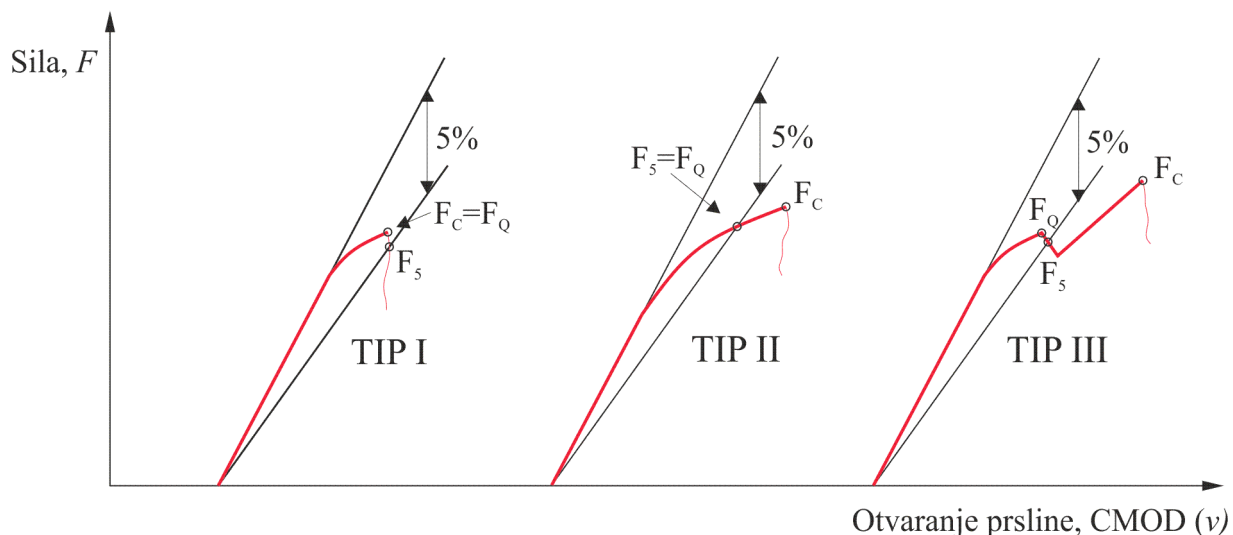
- stabilno (polako, podkritično), ako se prslina širi konstantnom ili malo većom silom (pravac s).



Slika 2.31. Šema postepenog otvaranja prsline pri rastućem opterećenju

a) - neopterećeno stanje, b) - pri opterećenju silom F_1 dolazi do otvaranja samo elastičnog vrha prsline, c) - pri sili F_2 nastaje plastična zona, d) - trenutak kritičnog otvaranja pukotine $\delta = \delta_c$ pri sili F_c , a prslina počinje da se širi.

Za određivanju kritičnog otvaranja prsline δ_c koriste se kao i pri određivanju žilavosti loma K_{Ic} davači sa mernim trakama za praćenje promene opterećenja i pomeranja. Pri ispitivanju otvaranja prsline moguća su tri tipa dijagrama $F-CMOD(V)$, slika 2.32.



Slika 2.32. Dijagrami sila-otvaranje prsline pri određivanju žilavosti loma [79]

Zavisno od oblika dijagrama F - $CMOD(V)$, za trenutak postizanja kritične vrednosti otvaranja prsline u dnu zareza, što je određeno nestabilnim rastom prsline, usvaja se trenutak prelaza iz elastičnog u plastično stanje. Tako na dijagramima tipa I i III postizanje kritičnog opterećenja F_c , kada nastaje nestabilni lom, je jasno određeno, dok se kod dijagrama tipa II mora primeniti posebna metodologija.

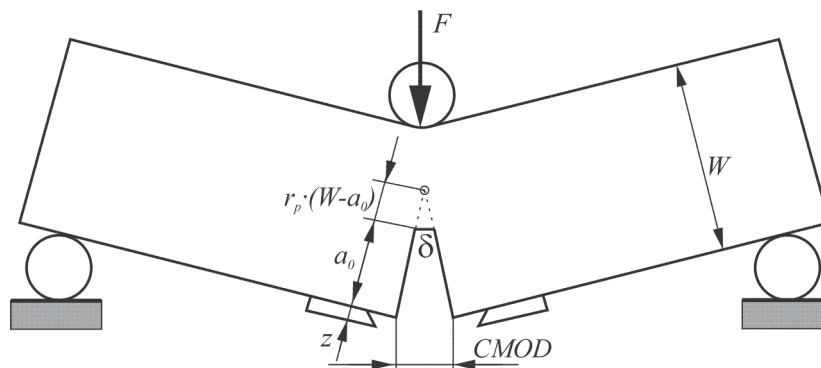
Kod dijagrama tipa I, sila raste sa porastom otvaranja prsline sve do naglog nestabilnog loma koji nastaje sa smanjenjem sile. U tom slučaju kritično otvaranje prsline δ_c odgovara maksimalnoj sili F_c uključujući i elastičnu i plastičnu komponentu. Ako do loma dođe u blizini linearnog područja, može se primeniti postupak sekante u cilju utvrđivanja da li je dobijeno važeće merenje za K_{Ic} .

U slučaju dijagrama tipa III, kriva ima područje rastuće sile pre potpunog loma. Ako je ovo povezano sa razvojem prsline utvrđenim korišćenjem postupka promene potencijala ili postupkom akustične emisije, kritično otvaranje se može uzeti kao ukupna veličina δ_c koja odgovara sili F_c pri prvom diskontinuitetu krive.

Kod dijagrama tipa II, kriva ima stabilan razvoj prsline, tj. početak loma ne karakteriše naglo opadanje sile. Traženo kritično otvaranje prsline je ono kod kojeg počinje naglo širenje prsline, a može se otkriti postupkom potencijala ili nekom drugom metodom.

2.4.3.2 Merenje otvaranja prslina

Teorijski i eksperimentalni rezultati proučavanja razvoja prslina dali su dovoljno podataka da se razradi standardna metoda za određivanje *CTOD* (δ) (BS 5672, ASTM E 1290 [81]). Na slici 2.33 date su osnovne mere, pomoću kojih se određuje otvaranje prslina. Epruveta se definiše sa dimenzijama koje odgovaraju debljini dela u eksploataciji, izreže se zarez, i iz tog zareza se izvede zamorna prslina. Savijanjem za ugao α dobija se odgovarajuće otvaranje prslina δ .



Slika 2.33. Geometrijske zavisnosti pri deformaciji epruvete za određivanje otvaranja prslina

δ [79]

Britanski standard BS 5762 i američki standard ASTM E 1290-93 definišu određivanje otvaranja prslina *CTOD* (δ) na osnovu merenja *CMOD* pomoću izraza [79]:

$$CTOD = \frac{K_I}{m \cdot R_e \cdot E} + \frac{r_p \cdot (W - a_0) \cdot CMOD}{r_p \cdot (W - a_0) + a_0 + z} \quad (2.30)$$

2.4.3.3 J-integral

Ukupna energetska ravnoteže tela sa prslinom pri datom spoljnom naponu je objektivna osnova za procenu stabilnosti prslina. Griffithov kriterijum, koji je prvobitno izveden za savršeno krte materijale, tj. linearno elastično stanje naprezanja u blizini vrha prslina, je osnovni kriterijum za stabilnost prslina, zasnovan na energetskim razmatranjima. Ovaj kriterijum je bio postepeno proširio se na stvarne konstrukcijske materijale na kojima se pojavljuju lokalne plastične deformacije u blizina vrha prslina, tj. formiranja plastične zone male veličine. U tim slučajevima, pokretačka sila prslina G , čiji je proračun zasnovan na elastičnom rešenju stanja napona u blizina prslina, je parametar koji karakteriše stabilnost prslina.

Međutim, ako se u deformisanom telu pojave plastične deformacije veće veličine, kriterijumi stabilnosti prslina opisani pokretačkom silom G ne mož se koristiti, jer ova plastična deformacija značajno utiče na polje napon-deformacija u blizini prsline. Navedeni problem je u određenoj meri otklonjen uvođenjem novog parametra loma, nazvanog J integral ili Rajsov integral. Ovaj J -integral je generalizacija pokretačke sile prsline G , a može se koristiti i u slučajevima većih plastičnih deformacija.

J -integral se može posmatrati kao promena potencijalne energije tela sa prslinom. Opšti izraz za J je definisao Rajs (Rice) 1968. godine [82]. J -integral je konturni integral nezavisan od putanje integracije (slika 2.34):

$$J = \oint_{\Gamma} \left(W dy - \bar{T}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} ds \right) \quad (2.31)$$

gde su:

W - gustina energije deformacije;

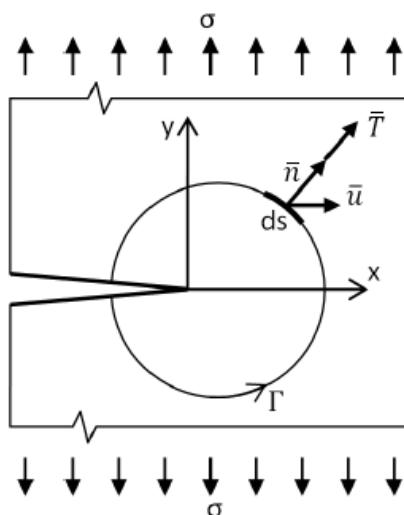
Γ - kriva koja povezuje gornju i donju površinu prsline -putanja integracije;

ds - element luka na ovoj krivi;

T_i - vektor sila zatezanja na konturi – integracionoj putanji;

u_i - vektor pomeranja,

n_i - jedinična normala na krivu Γ .



Slika 2.34. Proizvoljna putanja integracije za J integral [76], [79]

Zatim, vrednost J-integral predstavlja promenu (smanjenje) potencijalne energije dW_{el} pri rastu prsline za vrednost da , stoga je $J=dW_{el}/da$. S druge strane, Iz toga takođe proizlazi da je pod uslovom linearne elastične deformacije moguće napisati $J = G$. Saglasno tome da vrednost J integral ne zavisi od putanje integracije, znači da će za različite puteve integracije razlika biti $J_1 - J_2 = 0$, odnosno $J_1 = J_2$.

J integral može da se predstavi kao energija oslobođena na vrhu prsline po jedinici porasta površine prsline, $B \cdot da$, odnosno važi [79], [83]:

$$J \cdot B \cdot da = B \oint_{\Gamma} W dy da - B \oint_{\Gamma} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds da \quad (2.32)$$

gde je: B -debljina uzorka - epruvete

Član $B \oint_{\Gamma} W dy da$ označava energiju dobijenu (i utrošenu) na konturi Γ pri priraštaju prsline za da , uz pretpostavku nelinearne elastičnosti.

Drugi član u izrazu $B \oint_{\Gamma} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds da$ predstavlja rad sila zatezanja na pomeranju konture za priraštaj prsline da .

Vrednost J-integrala za dato telo može se proračunati ili odrediti eksperimentalno. U stvarnim materijalima sa elasto-plastičnom deformacijom određivanje vrednosti J-integrala je vrlo kompleksno. Ako je put integracije izabran blizu vrha prsline tako da obuhvata i elastično i plastično područje, tada vrednost J integral predstavlja prosečna svojstva polja deformacije u blizini vrha pukotine.

J -integral se može razdvojiti na dve komponente, elastični i plastični deo [83].

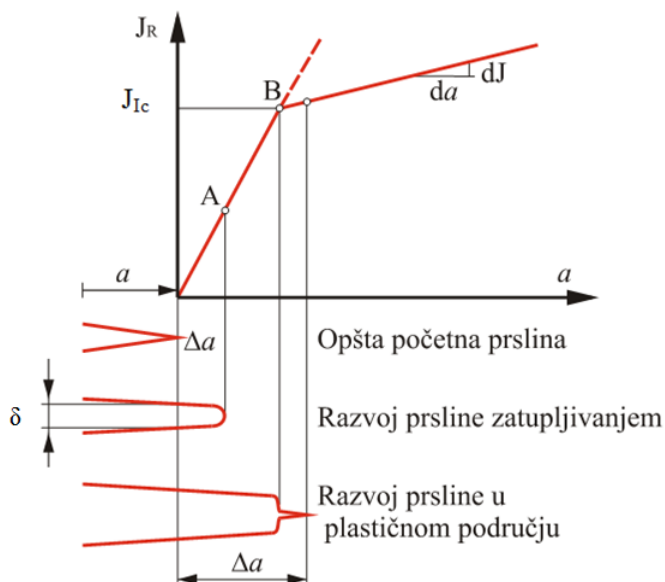
$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2.33)$$

Elastični deo J -integrala odgovara veličini G (Grifitova energija) [83]:

$$J_{el} = G = \frac{(1 - \nu^2) \cdot K^2}{E} \quad (2.34)$$

Vrednost J-integrala kada započinje nestabilno širenje prsline zove se kritična vrednost J-integrala J_{Ic} (slika 2.35):

$$J_{Ic} = G_{Ic} = \frac{(1 - \nu^2) \cdot K_{Ic}^2}{E} \quad (2.35)$$



Slika 2.35. Šematski prikaz zavisnosti J - Δa pri stabilnom razvoju prsline

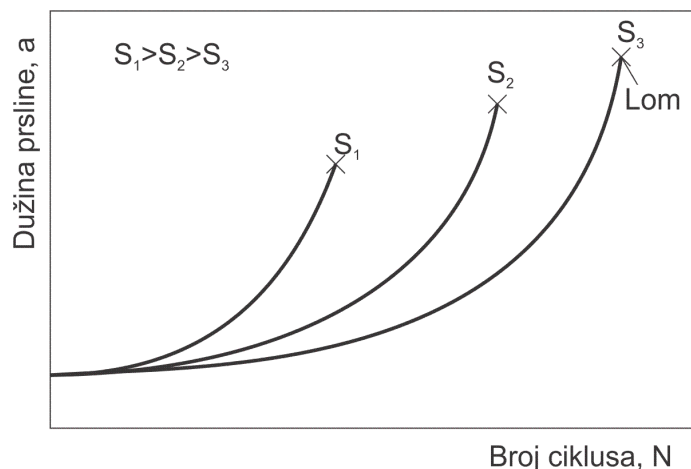
Na osnovu određene kritične vrednosti J-integrala (2.35), J_{Ic} , može da se izračuna vrednost žilavost loma K_{Ic} [83]:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (2.36)$$

Standardima [80], [81], [83] su definisani postupci eksperimentalnog određivanja parametara mehanike loma K , J i $CTOD$. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja prema standardu ASTM E1820 dobijaju se krive otpornosti J - Δa (slika 2.35) i $CTOD$ (δ)- Δa . Kada se dogodi napredovanje prsline, na krivi otpornosti (slika 2.35) se definiše kritična tačka koja predstavlja kritičnu vrednost J-integrala J_{Ic} .

2.5. BRZINA RASTA ZAMORNE PRSLINE

Struktura zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem zavisi od parametara zavarivanja. Koncept linearno elastične mehanike loma pretpostavlja da sve strukture zavarenih spojeva u većoj ili manjoj meri sadrže nedostatke. Prsline rastu od početne veličine (a_0) do kritične veličine (a_c), što odgovara otkazu u funkciji broja ciklusa opterećenja (slika 2.36). Sa slike 2.36 može se zaključiti da prslina brže raste pri naponu višeg nivoa, odnosno do loma dolazi pri manjem broju ciklusa.



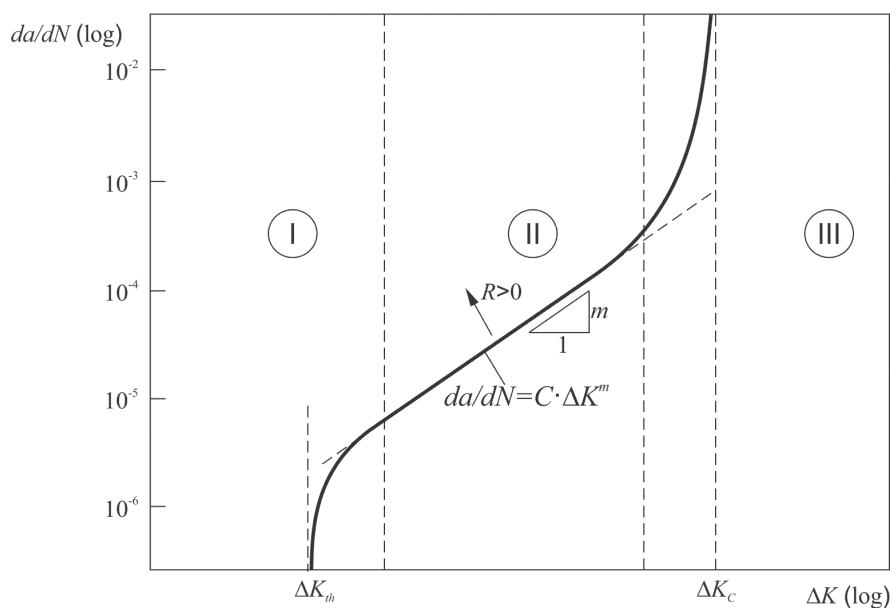
Slika 2.36. Dužina prsline kao funkcija broja ciklusa opterećenja [84]

Ako se može odrediti brzina rasta prsline da/dN , tada je moguće proceniti radni vek ili intervale pregleda koji su potrebni u određenim uslovima opterećenja i uslovima održavanja.

Prema pristupu linearno-elastične mehanike loma, brzina rasta prsline da/dN je u korelaciji je sa opsegom faktora intenziteta napona (ΔK). Opseg faktora intenziteta napona se može izračunati prema izrazu:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \sigma_{\max} \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a} - \sigma_{\min} \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2.37)$$

Brzina raste prsline predstavlja nagib krive rasta prsline, slika 2.37. Njena vrednost se može odrediti na osnovu eksperimentalnih podataka o prirastu prsline za određen broj ciklusa opterećenja.



Slika 2.37. Ponašanje brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od ΔK [85]

U početku (područje I) brzina rasta prsline je mala, ali raste s povećanjem dužine prsline. ΔK_{th} je prag rasta zamorne prsline, koji je na donjem kraju raspona od ΔK , gde se brzina rasta prsline približavaju nuli (slika 2.37). Područje II je područje stabilnog rasta prsline. U ovoj oblasti važi Parisova jednačina i promena brzine rasta prsline u osnovi je linearna [85, 86]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2.38)$$

gde je:

a – veličina prsline,

N – broj ciklusa opterećenja,

$\Delta K = \Delta K_{max} - \Delta K_{min}$ - opseg vrednosti faktora intenziteta napona,

C i m - parametri rasta prsline koji zavise od uslova sredine.

Područje III je područje nestabilnog rasta prsline gde se kriva asimptotski približava kritičnoj vrednosti faktora intenziteta napona K_c .

U oblasti II u režimu linearnog rasta prsline, zakon Parisa se može koristiti za određivanje broja ciklusa do otkaza. Ako se ΔK izraziti preko napona $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$:

$$\Delta K = Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.39)$$

onda jednačina Parisovog zakon ima oblik:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a})^m \quad (2.40)$$

Sređivanjem izraza (2.40) dobija se:

$$dN = \frac{da}{C \cdot (Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a})^m} \quad (2.41)$$

Integraljenjem jednačine (2.41) dobija se zamorni vek:

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a})^m} = \frac{1}{C \cdot \pi^{\frac{m}{2}} \cdot (\Delta\sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y^m \cdot a^{\frac{m}{2}}} \quad (2.42)$$

Tokom rasta prsline u oblasti II, neki metali su osetljivi na odnos opterećenja (R). Jednačina Parisa ne uzima u obzir odnos opterećenja. Međutim, postoje i drugi modifikovani izrazi jednačine Parisa, koji uzimaju u obzir odnos opterećenja R . Jedan od najkorišćenijih je onaj koji su razvili Foreman [87, 88]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K)^m}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad (2.43)$$

Standard ASTM E 647 [89] propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline da/dN , koja se razvija iz postojeće prsline, i proračun opsega faktora intenziteta napona, ΔK .

Istraživanje brzine rasta prsline je u fokusu mnogih istraživača. U radovima [90–92] su prikazani rezultati istraživanja uticaj strukture zavarenog spoja ostvarenog trenjem mešanjem na brzinu rasta prsline.

2.6. UDARNA ŽILAVOST MATERIJALA

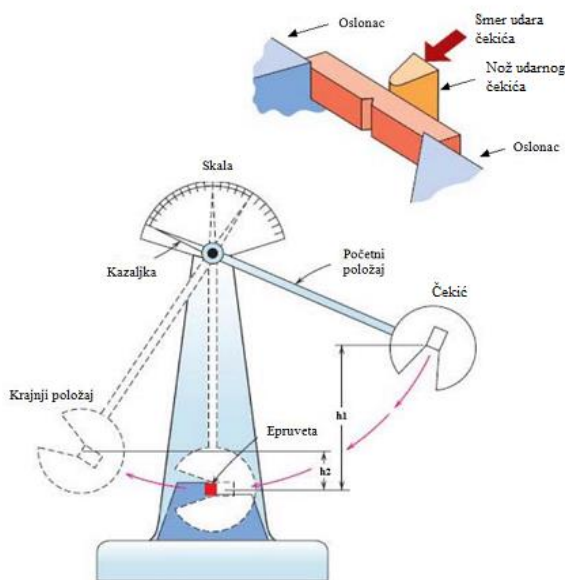
Za lake konstrukcije vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Parametri dobijeni ispitivanjem zatezanjem, granica tečenja i svojstvo plastičnosti - duktilnost, su osnova za konstruisanje zavarenih konstrukcija, da bi se osigurala njena čvrstoća pri dejstvu opterećenja. Za sigurnu eksploataciju zavarenih konstrukcije neophodno je poznavati žilavosti, kao i otpornosti prema lomu. Ocena žilavosti zavarenog spoja dobijenog bilo klasičnim postupcima zavarivanja bilo zavarivanjem trenjem sa mešanjem je složena zbog heterogenosti mikrostrukture i mehaničkih osobina metala šava.

Žilavost materijala je sposobnosti materijala da apsorbuje energiju tokom deformacije. Mera žilavosti materijala se definiše kao količina energije koja se utroši na plastičnu deformaciju i lom. Krti materijali imaju nižu žilavost kao rezultat male količine plastične deformacije koju mogu podneti. Energija udara materijala se takođe može menjati sa temperaturom. Uopšte, pri nižim temperaturama udarna žilavost materijala je smanjena. Veličina uzorka takođe može uticati na rezultate testa udara.

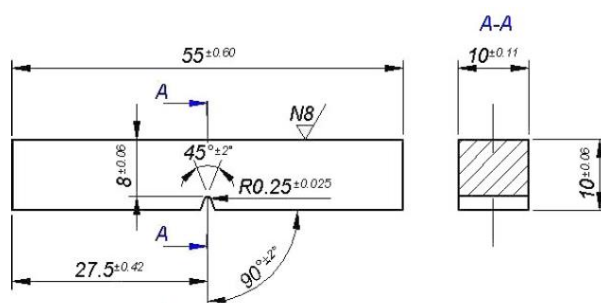
Ispitivanje žilavosti je ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile. Ispitivanje žilavosti se ustanovljava koliki udarni rad je potreban za prelom probnog uzorka (epruvete). Za ispitivanje udarne žilavosti koriste se epruvete sa zarezom. Prvo udarno ispitivanje materijala je izvršeno 1824. godine od strane Tredgolda T. [93].

Danas postoji nekoliko postupaka na osnovu kojih se vrši ispitivanje udarne žilavosti. Najčešće je ispitivanje prema Šarpiju i prema Izodu. Manju primenu imaju postupci ispitivanja udarne žilavosti prema Gijeriju i Šnatu.

Najčešće ispitivanje udarne žilavosti se vrši primenom Šarpijevog klatna (slika 2.38). Ispitivanje udarne žilavosti prema Šarpiju odlikuje jednostavnost ispitivanja, brzina ispitivanja, mali troškovi ispitivanja i laka priprema uzoraka.



Slika 2.38. Šematski prikaz ispitivanja po Šarpiju

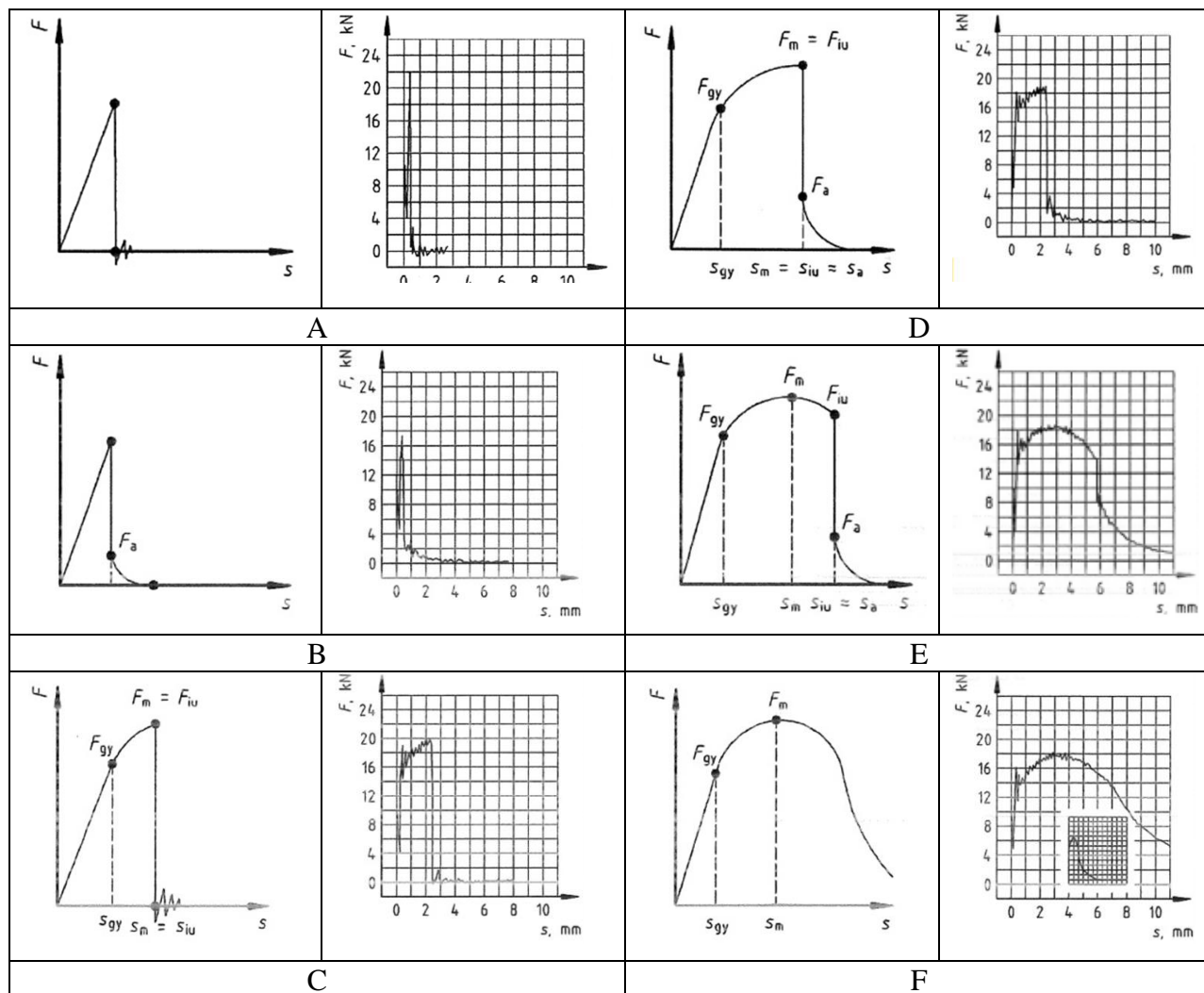


Slika 2.39. Epruveta za udarna ispitivanja Šarpijevim klatnom

Ispitivanje udarne žilavosti se vrši prema standardu SRPS EN ISO 148-1:2017 [94]. Dimenzije standardne epruvete su $10 \times 10 \times 55$ mm sa V zarezom dubine 2 mm. Oblik epruvete sa žlebom na uzdužnoj stranici, prikazana je na slici 2.39.

Danas je ova metoda ispitivanja udarne žilavosti usavršena primenom instrumentiranog Šarpijevog klatna. Merenje dinamičke udarne žilavosti na uzorcima sa V zarezom pomoću instrumentiranog Šarpijevog klatna opisano je u standardu SRPS EN ISO 14556:2016 [95].

Rezultati ispitivanja na instrumentiranom Šarpijevom klatnu u vidu dijagrama (F, t) , (E, t) i (F, s) omogućavaju utvrđivanje energije udara koja se troši na inicijaciju prsline i energije udara koja se troši na rast prsline. Šematski prikazane krive sila-ugib (F, s) i uporedno, rezultati ispitivanja dobijeni na instrumentiranom Šarpijevom klatnu su dati na slici 2.40.

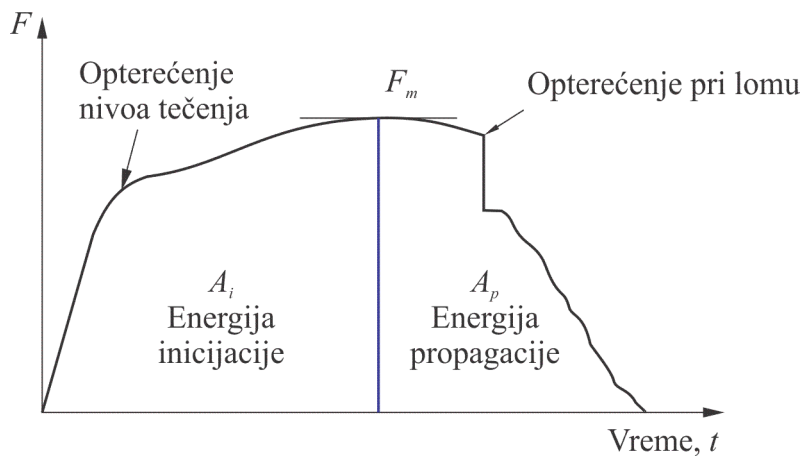


Slika 2.40. Karakteristični dijagrami sila – put (A, B, C, D, E, F). šematski dijagrami i stvarni dijagrami (F_{gy} - sila pri granici tečenja, F_m -maksimalna sila, F_{iu} - sila na početku nestabilnog širenja prsline, F_a - sila na kraju nestabilnog širenja prsline) [96]

Oblik dijagrama (F, s) zavisi od vrste ispitivanog materijala i temperature ispitivanja. Na osnovu oblika krive (F, s) dobijene ispitivanjem udarne žilavosti, može se odrediti ponašanje materijala. Ako se ispitivanjem udarne žilavosti dobije oblik dijagrama A i B (slika 2.40), onda se govori o krutom ponašanju materijala. Oblik dijagrama tipa F, karakteriše da nema jako strmog pada govori se o žilavom lomu na prelomnoj površini 100%. Za dijagrame gde postoji strmi pad sile (tipovi C, D, E), veličina pada sile u odnosu na druge karakteristične veličine sile omogućava da se približno oceni udeo žilavog loma na prelomnoj površini.

Kao što je rečeno, na osnovu rezultata ispitivanja udarne žilavosti na instrumentiranom Šarpijevom klatnu moguće je ukupnu energiju udara, A_{uk} , razložiti na energiju za stvaranje (iniciranje) prsline, A_i , i energiju za širenje prsline, A_p . Na dijagramu sila-vreme (F, t) (slika

2.41), obeležene su površine A_i i A_p . Površina A_i ispod krive odgovara energiji inicijacije prsline, dok površina A_p odgovara energiji propagacije (širenja) prsline.

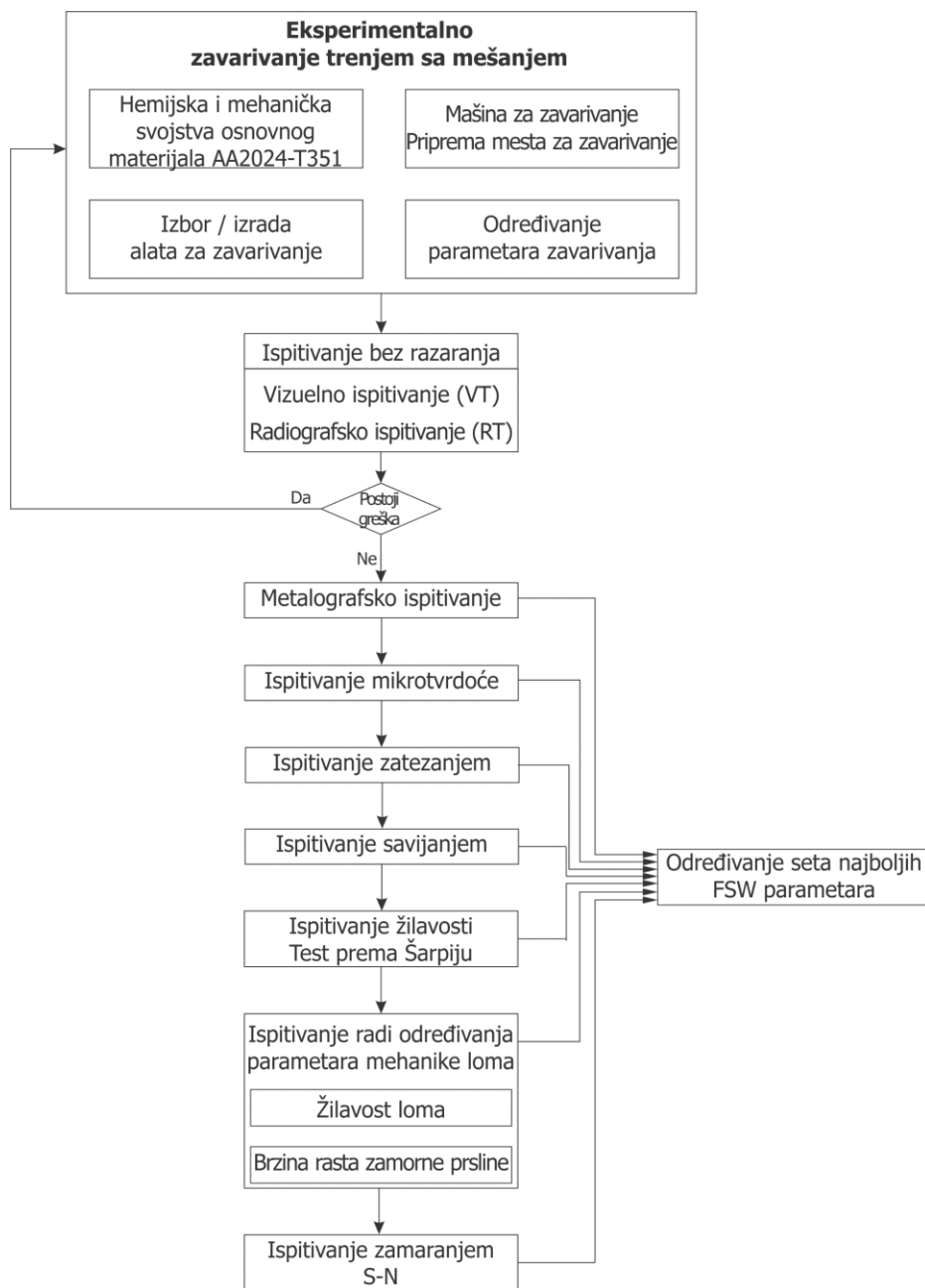


Slika 2.41. Dijagram udarna sila - vreme, dobijen merenjem na instrumentiranom Šarpijevom klatnu [97]

Rezultati ispitivanja na instrumentiranom Šarpijevom klatnu nisu samo energija inicijacije prsline i energija rasta prsline. Nakon ispitivanja vrši se fraktografski pregled prelomne površine. Na prelomnoj površini se određuje procentualni udeo krtog loma.

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Ekperimentalni deo disertacije odvijao se prema metodologiji datoj u vidu algoritma na slici 3.1.



Slika 3.1. Algoritam ekperimentalne metodologije utvrđivanja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem kojim se dobijaju najbolji zavareni spojevi sa aspekta mehaničkih svojstava

U okviru ove disertacije su vršena istraživanja sučeonih zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem legura aluminijuma EN AW-2024 T351. Ovo je, inače, avio legura, koja ima primenu za izradu nekih delova aviona. Hemijski sastav legure aluminijuma 2024 T351, koja je korišćena kao osnovni materijal, je dat u Tabeli 3.1, a mehanička svojstva legure data su u Tabeli 3.2.

Tabela 3.1- Hemijski sastav legure aluminijuma 2024 T351

Hemijski sastav	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
%	4,70	1,56	0,65	0,17	0,046	0,11	0,032

Tabela 3.2 – Mehanička svojstva legure aluminijuma 2024 T351

Granica tečenja R_{ch}	Zatezna čvrstoća R_m	Modul elastičnosti E	Poasonov koeficijent ν	Elongacija A_5	Tvrdoća
MPa	MPa	MPa	–	%	HV
370	481	73100	0,33	17.9	137

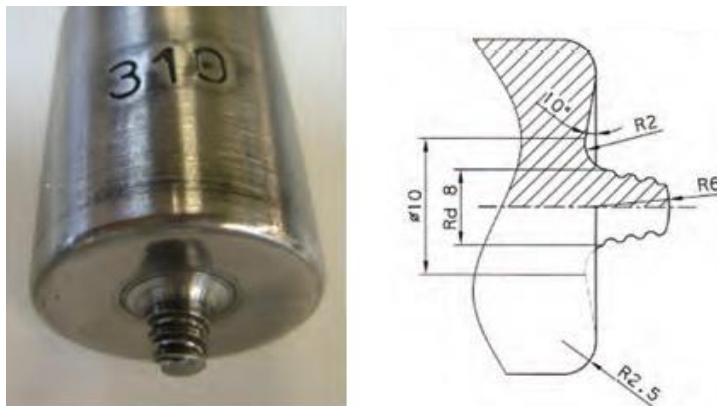
Za eksperimentalno zavarivanje korišćena je alatna mašina glodalica (slika 3.2) sa mogućnošću stepenastog biranja brzine rotiranja alata i podužnog kretanja. Za eksperimentalna zavarivanja odabrana je alatna glodalica Prvomajska ALG-200 sa snagom elektromotora za pogon kretanja glavnog vertikalnog vretena od 4 kW i izlaznim brojem obrtaja od 1400 min⁻¹. Glodalica ima mogućnost stepenaste regulacije broja obrtaja preko menjačke kutije u rasponu od 300 do 1900 min⁻¹ i brzine posmaka od 7 do 380 mm/min. Brzina posmaka za sprovedena eksperimentalna zavarivanja predstavlja brzinu zavarivanja.



Slika 3.2. Primena alatne mašine – glodalice ALG-200 prilagođene za zavarivanje ploča postupkom trenjem sa mešanjem

U toku eksperimentalnog zavarivanja nije postojala mogućnost merenja i praćenja pritiskne sile, tj. sile u vertikalnom pravcu duž z – ose.

Geometrija alata za zavarivanje trenjem sa mešanjem je svakako vrlo bitan faktor za dobijanje kvalitetnih zavarenih spojeva. Na osnovu ranije vršenih istraživanja zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351, izloženih u [8], usvojen je alat čija je geometrija data na slici 3.3.



Slika 3.3. Geometrija alata za zavarivanje trenjem sa mešanjem

Alat je izrađeni od čelika 55CrMo8 i termički obrađeni na tvrdoću 50HRC. Alati sa oznakom 310 ima trn konusnog oblika i standardni navoj

Režim primenjene termičke obrade alata od čelika 55CrMo8 je:

- zagrevanje do 600°C, vreme držanja 30 min,
- zagrevanje do 850°C, vreme držanja 10 min i kaljenje u ulju,
- otpuštanje na 400°C /60 min i hlađenje na vazduhu.

Fabrikaciona debljina ploča je bila 8 mm, pa je najpre vršeno brušenje obe strane ploča, te je nakon ove obrade površina ploča dobijena željena debljina 6 mm, koja odgovara usvojenoj geometriji alata za zavarivanje trenjem sa mešanjem.

Osim usvojenog oblika i geometrija alata, na kvalitet zavarenog spoja utiču: broj obrtaja alata odnosno ugaona brzina alata, brzina translatorsnog kretanja alata odnosno brzina zavarivanja, aksijalna sila, dubina uranjanja, ugao nagiba alata, itd. Dominantna su dva parametra zavarivanja: broj obrtaja alata n i brzina zavarivanja v . Za eksperimentalna istraživanja u okviru ove disertacije usvojeno je da broj obrtaja alata n bude konstantan, a brzina zavarivanja

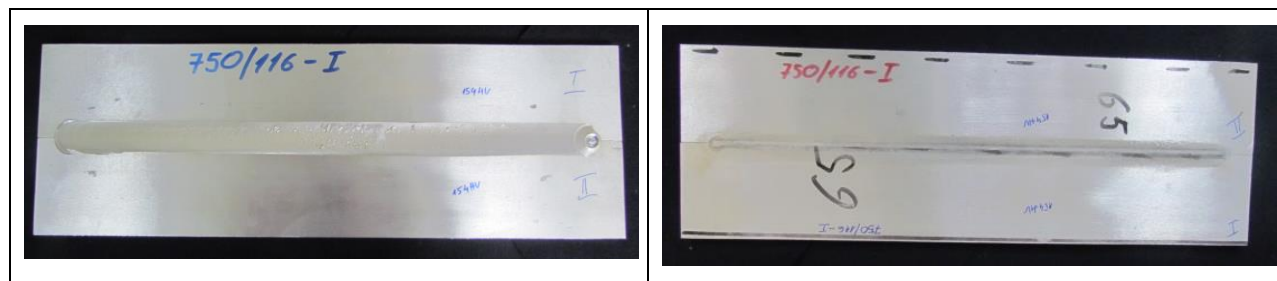
v da se varira, tabela 3.3. Usvojeni broj obrtaja alata i usvojene brzine zavarivanja su bile saglasne tehničkim mogućnostima korišćene mašine – glodalice ALG-200.

Tabela 3.3 – Parametri zavarivanja [98-102]

Uzorak	Broj obrtaja n min^{-1}	Brzina zavarivanja v mm/min	Odnos n/v obr/mm
A – I	750	73	10,27
B – II		116	6,47
C - III		150	5

Ostali parametri zavarivanja kao što je geometrija alata, ugao nagiba alata pri zavarivanju, prisustvo iste podnožne ploče itd. su bili isti u svim eksperimentalnim zavarivanjima.

Eksperimentalno su zavarivane ploče dimenzija 500 mm × 65 mm × 6 mm. Ispod ploča koje se zavaruju postavljena je osnovna ploča koja je napravljena od austenitnog čelika. Dužina zavara iznosila je približno 400 mm (slika 3.4).



Slika 3.4. Sučeono zavarene ploče ZTM postupkom

Iako postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem daje zavarene spojeve uglavnom visokog kvaliteta, može se pojaviti određena heterogenost zbog nepravilnog mešanja osnovnog materijala, nedovoljnog prodora trna alata, lošeg izbora dizajna trna alata ili nepravilnog izbora procesnih parametara zavarivanja. Kada se pojave greške u ZTM zavarenom spoju, oblik grešaka se razlikuje od onih koje se obično nalaze u zavarima ostvarenim klasičnim fuzionim postupcima zavarivanja. U okviru istraživanja ove disertacije, nakon što su ostvareni sučeoni zavareni spojevi, vršena je vizuelna kontrola (VT) lica i korena zavarenih uzoraka, a potom radiografska kontrola (RT).

3.1. VIZUALNO ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA

Vizualna metoda ispitivanja zavarenih spojeva je jednostavna metoda za osiguravanje kvaliteta zavara, ali ne daje podatke o greškama u poprečnom preseku zavara. Vizualna metoda

daje prvi utisak o kvalitetu zavara. Vizualnom metodom se određuju nepravilnosti lica i korena zavarenih uzoraka prema kriterijumu utvrđenim standardom SRPS EN ISO 25239-5:2012 [103].

3.2. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA

Unutrašnje greške u zavaru, ako postoje, mogu se ustanoviti metodom radiografije (RT) i metodom ultrazvučnog ispitivanja (UT). Svi zavareni uzorci u okviru ove disertacije su ispitivani metodom radiografije po standardu SRPS EN ISO 17636-2:2014 [104].

3.3. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA

3.3.1. Makrostrukturalna ispitivanja

Za sve zavarene uzorke je rađen razvoj makrostrukture i makrostrukturalna analiza. Analiza makrostrukture urađena je primenom svetlosne mikroskopije (SM) na stereo metalografskom mikroskopu Leitz sa integrisanom kamerom Leica DFC 295, računarskim sistemom i softverom za akviziciju podataka i obradu slike. Ispitivanja su sprovedena u cilju utvrđivanja postojanja oblasti jezgra, ZTMU, ZUT-a i OM i analize uticaja parametara zavarivanja na njihov položaj, veličinu i oblik. Takođe, makrostrukturalna ispitivanja poprečnih linija tečenja materijala, poslužila su za analiziranje karaktera i smera kretanja materijala tokom zavarivanja pri različitim parametrima zavarivanja.

Priprema uzoraka za ispitivanje se sastojala od klasičnih postupaka mašinske obrade, mehaničkog brušenja i nagrizanja odgovarajućim reagensom. Nakon isecanja iz zavarenog spoja, uzorak je mašinski obrađen i poravnat. Brušenje je izvedeno na brusnim papirima finoće P150, P240, P320, P400, P600, R1200 i R2500. Razvoj makrostrukture spoja legure 2024-T351 obezbeđen je potapanjem i držanjem uzorka 10 sec u Tuckers-ovom reagensu (45ml HCl, 15ml HNO₃, 15ml HF, 25ml H₂O), ispiranjem vodom i alkoholom i sušenjem u struji toplog vazduha.

3.3.2. Mikrostrukturalna ispitivanja

Za mikrostrukturalnu analizu poprečnog preseka zavarenih spojeva korišćen je svetlosni mikroskop Leitz-Metalloplan sa integrisanom kamerom Leica DFC 295, računarskim sistemom i softverom za akviziciju podataka i obradu slike. Ispitivanje mikrostrukture zavarenog spoja i njegovih delova urađeno je u cilju sagledavanja mikrostrukture (jezgro, ZTMU i ZUT), za uzorke zavarene različitim brzinama zavarivanja.

Priprema uzoraka za ispitivanje se sastojala od klasičnih postupaka mašinske obrade, mehaničkog brušenja i poliranja i nagrizanja odgovarajućim reagensom. Nakon isecanja iz zavarenog spoja uzorak je mašinski obrađen i poravnat. Brušenje je izvedeno na brusnim papirima finoće P150, P240, P320, P400, P600, R1200 i R2500. Za poliranje uzorka korišćene su dijamantske paste granulacije $7/5 \mu\text{m}$, odnosno $5/3 \mu\text{m}$ za završno poliranje. U cilju dobijanja kvalitetnije površine nakon poliranja dijamantskom pastom, primenjena je i tehnika elektrohemijskog poliranja i nagrizanja. Elektrohemijsko poliranje i nagrizanje izvršeno je na uređaju Polectorl - STRUERS. Za elektrohemijsko poliranje korišćen je vodeni rastvor perhlorne kiseline a za nagrizanje Barkerov reagens (vodeni rastvor bor-fluorovodonične kiseline). Uslovi poliranja: napon 20V, vreme 60 sec, brzina mešanja 8. Uslovi nagrizanja: napon 12V, vreme 120 sec, brzina mešanja 8.

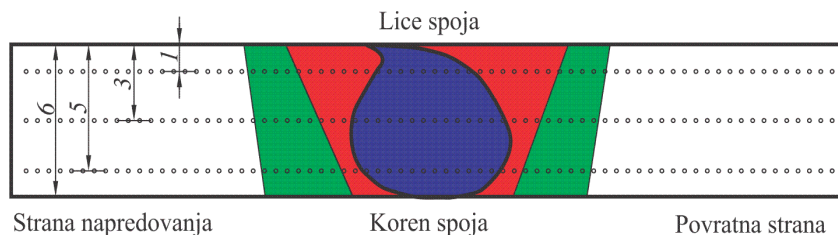
3.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Ispitivanje tvrdoće izvršeno je Vickersovom metodom na uzorcima za makrostrukturnu analizu. Korišćenjem uzoraka na kojima je razvijena makrostruktura omogućeno je precizno pozicioniranje i kontrolisanje mesta merenja (OM, ZUT, ZTMU i jezgro).

Raspodela tvrdoće kroz presek zavarenog spoja određivana je prema odredbama standarda SRPS EN ISO 6507-4 [105]. Vickersovo merenje mikrotvrdoće sprovodilo se u preseku koji je upravan na smer zavarivanja. Za merenje tvrdoće koristio se digitalni uređaj HVS-1000 (MODEL HVS-1000 DIGITAL DISPLAY MICROHARDNESS TESTER) i standardnom uređaju za merenje tvrdoće Wolpert, respektivno.

Uzorci su prebrušeni na brusilici brusnim papirima. Nakon brušenja izvršeno je poliranje uzoraka dijamantnom pastom ($6 \mu\text{m}$). Za pravljenje otiska pri merenju tvrdoće primenjen je test mikro Vickers HV1, čija je sila pritiska 9,807 N tokom 15 s.

Na tako pripremljenim uzorcima napravljen je niz otisaka preko poprečnog preseka zavarenog spoja, kako bi se dobio profil tvrdoće od osnovnog materijala OM (BM) preko zone uticaja toplote ZUT-a, zone termo-mehaničkog uticaja ZTMU i zone mešanja ZM zavara do osnovnog materijala s druge strane. Profil tvrdoća (slika 3.5) ispitivan je duž tri horizontalna pravca: lice zavara (1mm od lica spoja), sredina zavara (3 mm od lica spoja) i koren zavara (5 mm od lica spoja) (slika 3.5). Razmak između otisaka je iznosilo 0,5 mm.



Slika 3.5. Šematski prikaz mesta merenja tvrdoće

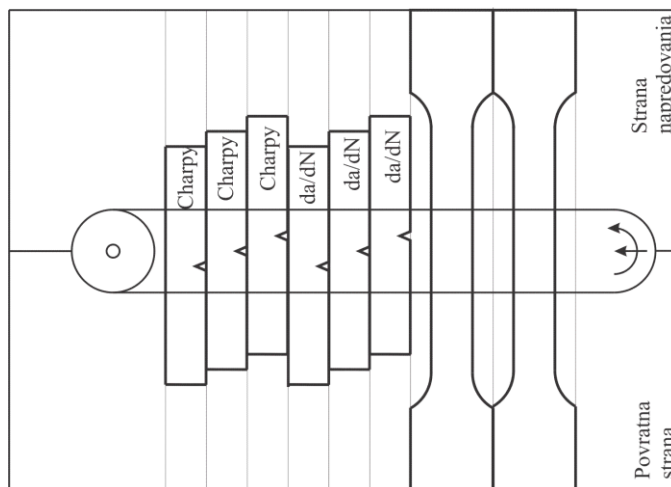
Ovakvim načinom merenja dobijena je raspodela tvrdoće kroz ceo poprečan presek zavarenog spoja, kao i uvid u nivo tvrdoće u svakom od karakterističnih delova zavarenog spoja.

Velikim brojem izvršenih merenja u uzdužnom pravcu po jednom uzorku (189 merenja za uzorke A-I i B-II odnosno 219 merenja za uzorak C-III), omogućeno je mapiranje i grafički prikaz prostiranja karakterističnih oblasti zavarenog spoja.

3.5. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

3.5.1. Određivanje zateznih svojstava jednoosnim zatezanjem

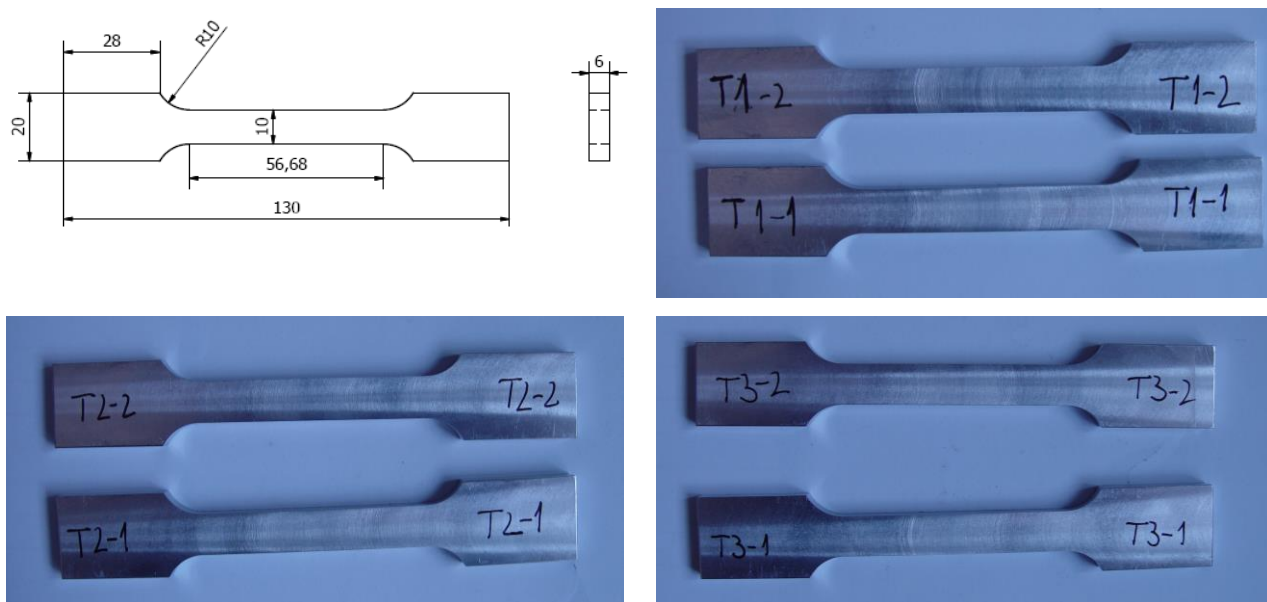
Zatezne karakteristike zavarenog spoja, određivane su na epruветama sa paralelnim bokovima izrađenim prema standardu ASTM E-8M. Ispitivanje je sprovedeno prema odredbama standarda SRPS EN 10002-1 [106] na hidrauličnoj kidalici Amsler SZBDA 599 opsega 200 kN i na instrumentiranoj mehaničkoj kidalici ZWICK opsega 50 kN. Epruvete su izrađene poprečno na zavareni spoj, prema šemi na slici 3.6.



Slika 3.6. Plan pripreme izrada epruveta za ispitivanje zavarenog spoja i epruvete za ispitivanje zateznih svojstava

Dimenzije epruveta i izrađene epruvete za ispitivanje zateznih svojstava zavarenog spoja date su na slici 3.7. Za zavarene uzorke izrađene različitim brzinama zavarivanja, ispitivana su

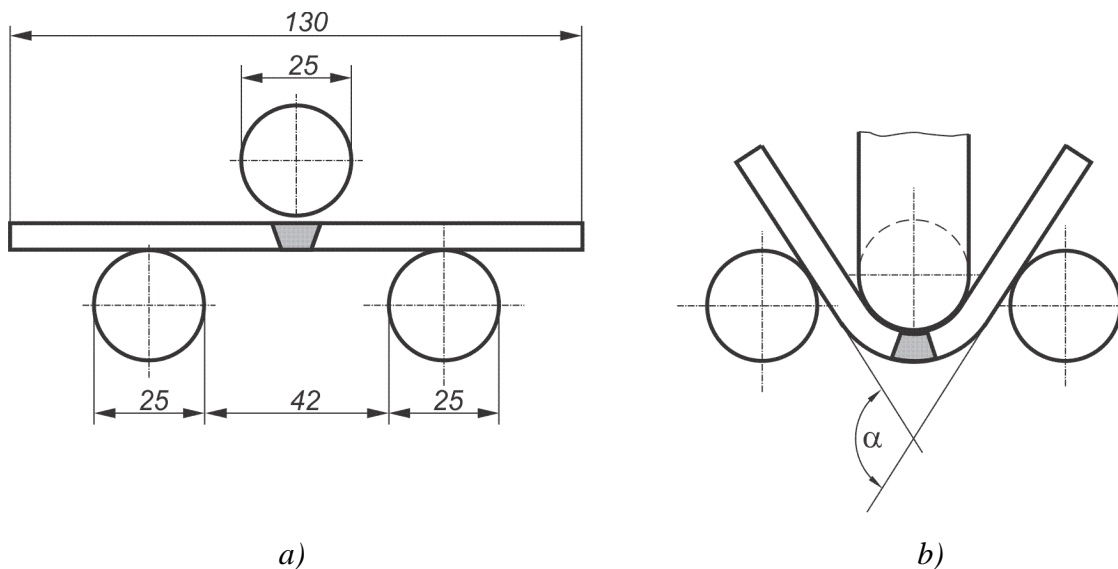
zatezna svojstva zavarenih spojeva na hidrauličnoj kidalici na dve epruvete. Urađena je analiza prelomnih površina zateznih epruveta. Iz odnosa vrednosti zatezne čvrstoće zavarenog spoja i zatezne čvrstoće osnovnog materijala (R_{mZS}/R_{mOM}) računata je efikasnost zavarenog spoja.



Slika 3.7. Dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje

3.5.2. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem je sprovedeno u cilju određivanja deformacionih sposobnosti zavarenog spoja. Epruvete i postupak ispitivanja savijanjem na sučeono zavarenim spojevima definisani su standardom SRPS EN ISO 5173:2013 [107] i AWS B4.0M: 2000. Epruvete se savijaju pomoću trna ili valjka. Ispitivanje na savijanje se vrši oko lica i oko korena zavora. U okviru istraživanja vršenih u disertaciji korišćen je alat za savijanje u tri tačke čija je geometrija prikazana na slici 3.8, a.



Slika 3.8. Šematski prikaz ispitivanja savojnih karakteristika zavarenog spoja

Epruveta za savijanje je dimenzija $130 \times 30 \times 6$ mm. Epruvete su izrađene poprečno na zavareni spoj. Svaki od navedenih uzoraka ispituje se na isti način, podvrgavaju se opterećenju dok se ne pojavi prva pukotina ili lom. Nakon uočene pojave prve prsline, epruveta se vadi iz uređaja za savijanje, vrši se vizualni pregled prsline ili loma i merenje ugla savijanja α do pojave prve prsline odnosno loma (slika 3.8, b).

3.5.3. Ispitivanje udarne žilavosti

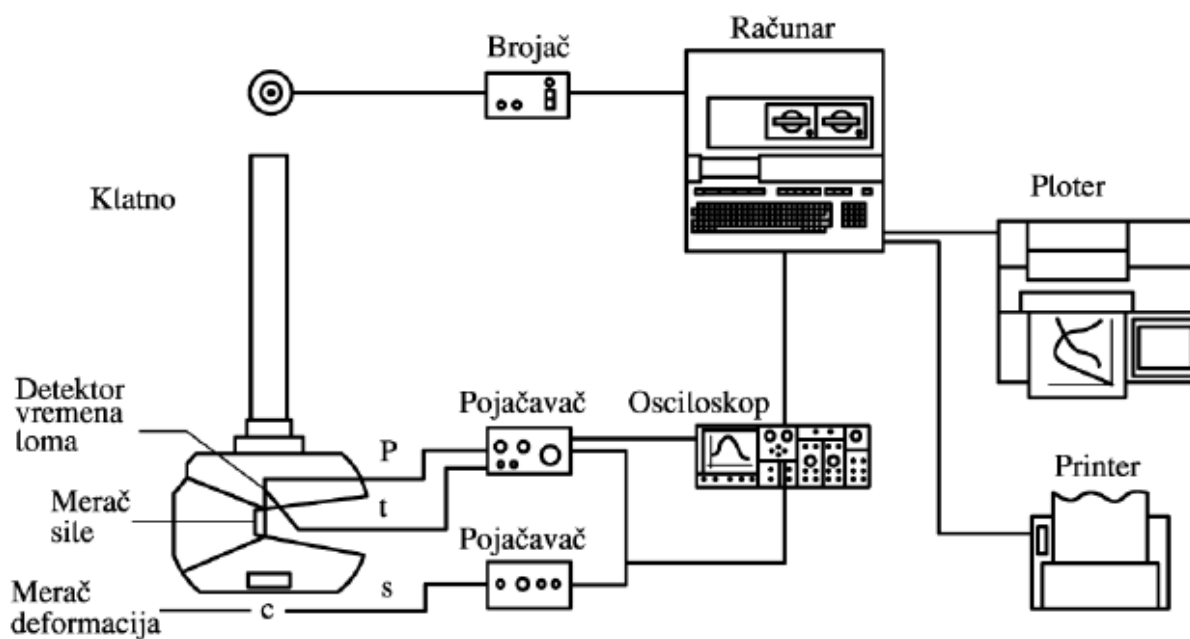
Ispitivanja su izvedena na sobnoj temperaturi, na instrumentiranom Tinius Olsen Šarpi klatnu nazivne energije 300 J (slika 3.9).



Slika 3.9. Instrumentirano Šarpijevo klatno Tinius Olsen nazivne energije 300 J

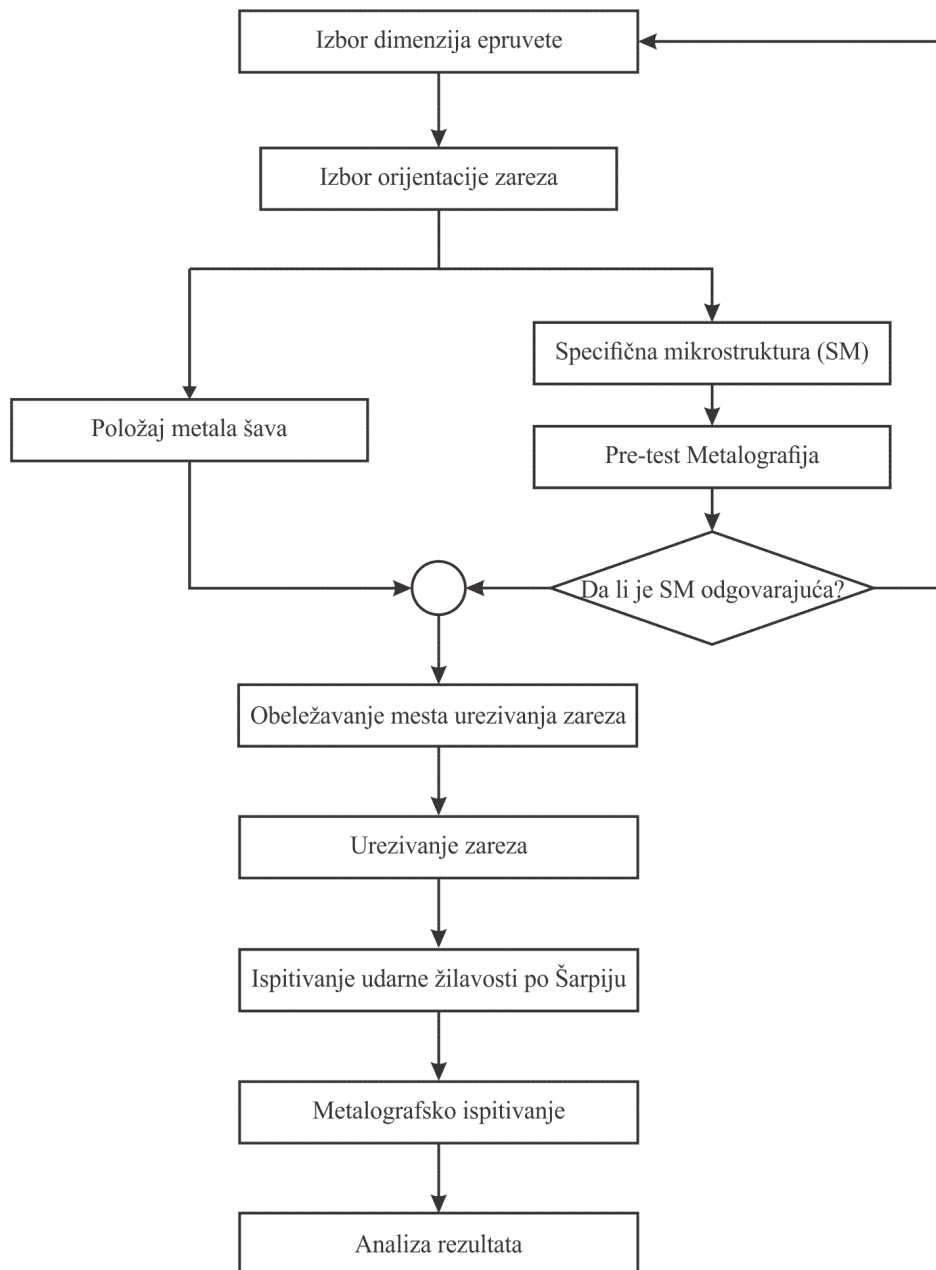
Instrumentirano Šarpijevo klatno poseduje integrisani sistem za akviziciju podataka čime je omogućeno da se pored ukupne energije udara utrošene za prelom, odrede i energija stvaranja i širenja prsline.

Kod instrumentiranog Šarpijevog klatna, system za akviziciju podataka koji čine: merač sile, deformacija i detektor vremena su instalirani u čekiću klatna (slika 3.10). Preko mernog pojačala, osciloskop registruje signal nastao pri lomu epruvete (period 5 do 12 ms), koji je dalje povezan sa računarem radi obrade signala merenja.



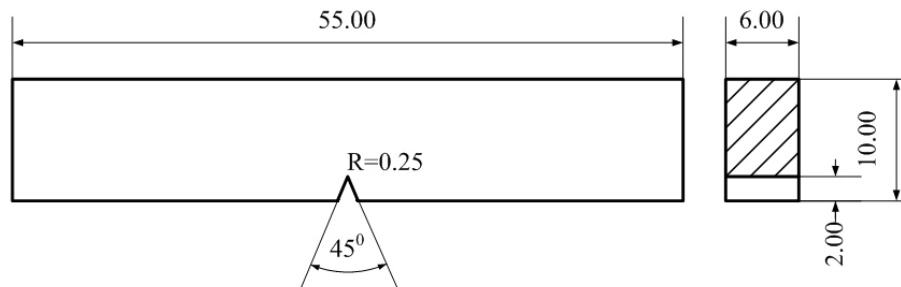
Slika 3.10. Šematski prikaz instrumentiranog Šarpijevog klatna [75]

Procedura ispitivanja udarne žilavosti je data na slici 3.11.



Slika 3.11. Procedura ispitivanja udarne žilavosti

Zbog debljine zavarivanih ploča nije bilo moguće izraditi standardnu epruvetu, pa su za ispitivanja korišćene nestandardne epruvete dimenzija 55×10×6 mm sa „V2“zarezom (slika 3.12). Koncentrator napona (zarez) nanošen je u različitim oblastima strukture zavarenog spoja. Nakon ispitivanja udarne žilavosti urađena je fraktografska analiza prelomnih površina epruveta.

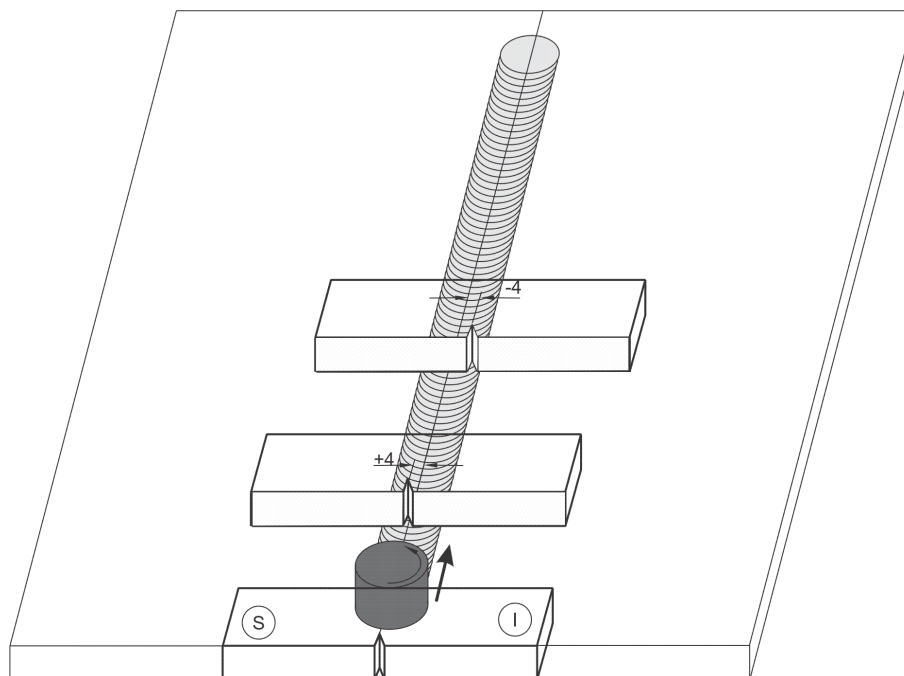


Slika 3.12. Dimenzije epruveta za ispitivanje udarne žilavosti testom prema Šarpiju

Epruvete su izrađene poprečno na zavareni spoj, prema šemi na slici 3.13.

Radi mogućnosti upoređivanja nivoa žilavosti, pored određivanja energije udara, odnosno udarne žilavosti zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem za različite brzine zavarivanja sa zarezom definisanim u različitim strukturama određivana je i energija udara osnovnog materijala. Na taj način, analizama je moguće utvrditi otpornost različitih struktura zavarenog spoja, ostvarenog različitim parametrima zavarivanja, izloženih udarnim opterećenjima.

Na slici 3.13 prikazana je pozicija urezivanja zarez na epruvetama za ispitivanje udarne žilavosti.



Slika 3.13. Pozicija izrade-urezivanja zarez na epruvetama za ispitivanje udarne žilavosti po Šarpiju

U tabeli 3.4. su date oznake epruveta za određivanje žilavosti u različitim oblastima ZTM strukture.

Tabela 3.4. Oznake epruveta za određivanje žilavosti ZTM zavarenog spoja sa zarezom u različitim strukturama

A-S	B-S	C-S
A-R-I	B-R-I	C-R-I
A-R-P	B-R-P	C-R-P
Oznake: A, B, C: vezano za parametre zavarivanja A-750/73, B-750/116 i C-750 S – zarez na sredini zavarenog spoja R-I – zarez na strani napredovanja zavarenog spoja R-P – zarez na povratnoj strani zavarenog spoja		

3.5.3.1. Fraktografsko ispitivanje pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM)

Nakon sprovedenog Šarpijevog testa ispitivanja žilavosti i ispitivanja parametara mehanike loma, vrši se mikro fraktografsko ispitivanje preloma pomoću elektronskog mikroskopa. Postoji više vrsta elektronskih mikroskopa: skenirajući elektronski mikroskop SEM i transmisioni elektronski mikroskop TEM. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM - Scaning Electron Microscopy), daje podatke o topografiji, morfologiji, hemijskom sastavu, orijentaciji zrna, kristalografskim podacima itd. Snimci dobijeni SEM-om imaju skoro trodimenzionalan izgled. SEM je vodeći aparat koji može postići detaljnu vizuelnu sliku čestice uz visokokvalitetnu i prostornu rezoluciju od 1 nm.



Slika 3.14. Skenirajući elektronski mikroskop JEOL JSM 6610LV

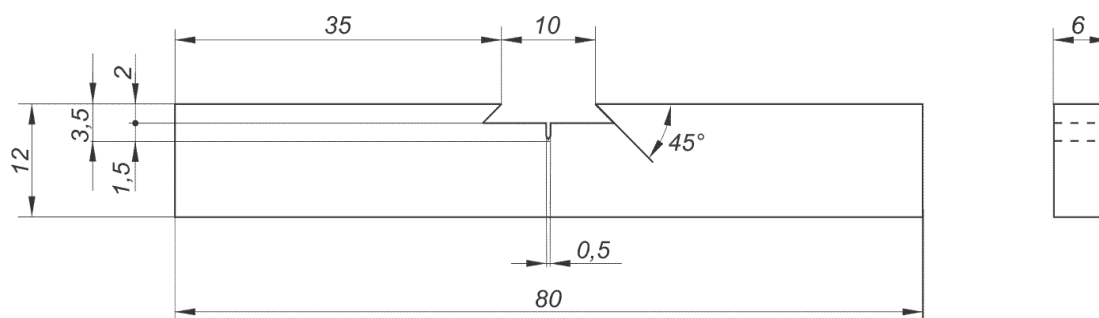
Za potrebe ove doktorske disertacije za fraktografsko ispitivanje prelomne površine korišćen je skenirajući elektronski mikroskop JEOL JSM 6610LV (slika 3.14), koji poseduje i mogućnost hemijske analize putem energetske disperzione spektroskopije (EDS).

Skenirajuća elektronska mikroskopija je sprovedena sa ciljem analize karakterističnih prelomnih površina epruveta. Pri tome je korišćena slika sekundarnih elektrona (secondary electrons, SE) i povratno rasutih elektrona (backscattered electrons, BSE).

3.6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA

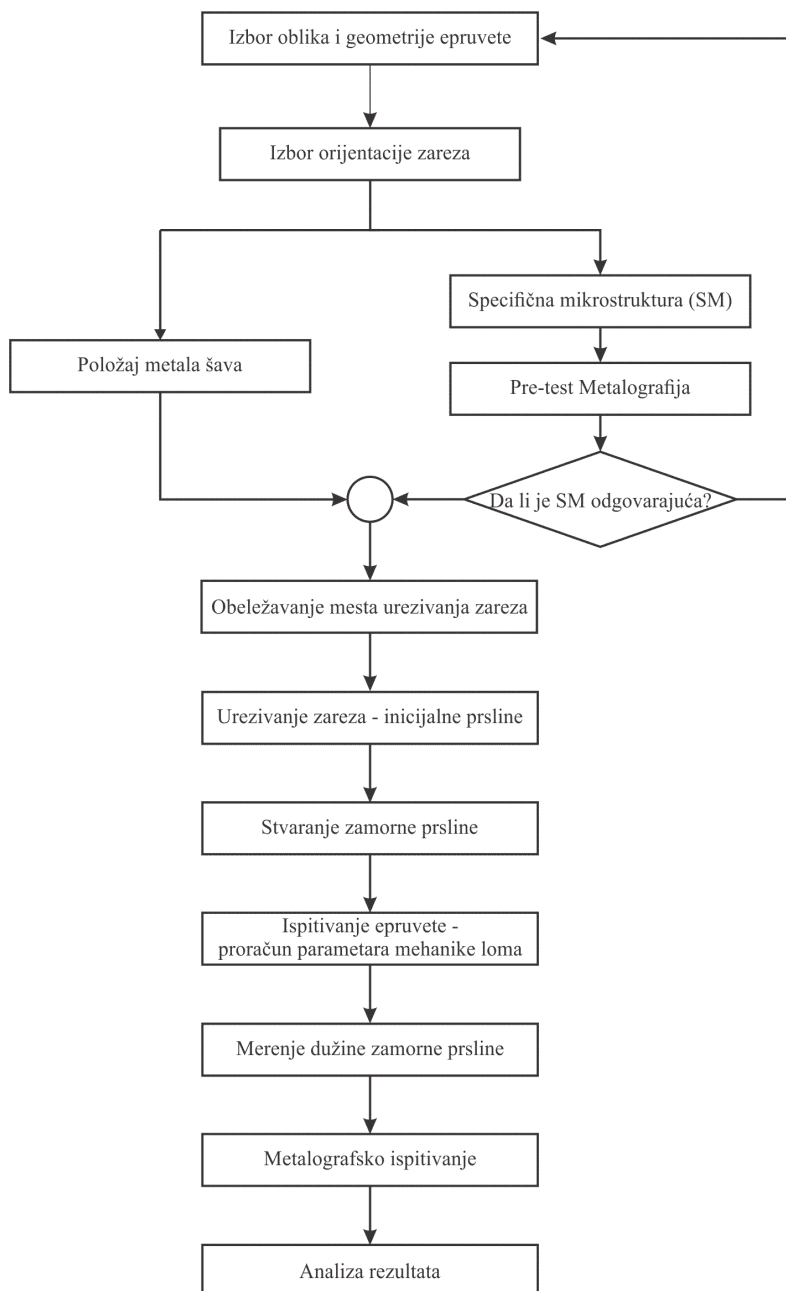
Ekperimentalno određivanje parametara mehanike loma je vršeno zbog boljeg i potpunijeg razumevanja ponašanja zavarenog spoja sa prslinom u različitim pozicijama strukture zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem. Metodologija eksperimentalnog određivanja parametara mehanike loma u uslovima elastično-plastične mehanike loma je definisana standardima BS 7448 -2, ISO 12135:2016, ASTM E 1820 - 11. U okviru disertacije je korišćena metodologija ispitivanja parametara mehanike loma standardom ASTM E 1820 - 11 [109, 110]. Ispitivanje je urađeno na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Mariboru, koristeći metodologiju definisanu standardom ASTM E1820.

Saglasno ZTM zavarenim uzorcima čija je debljina ploča bila $B=6$ mm, oblik i dimenzije epruvete prema standard ASTM E 1920 koji je korišćen za ispitivanja parametara mehanike loma dat je na slici 3.15.



Slika 3.15. Oblik i dimenzije SENB epruveta prema ASTM E 1820 koja je korišćena za ispitivanje [82]

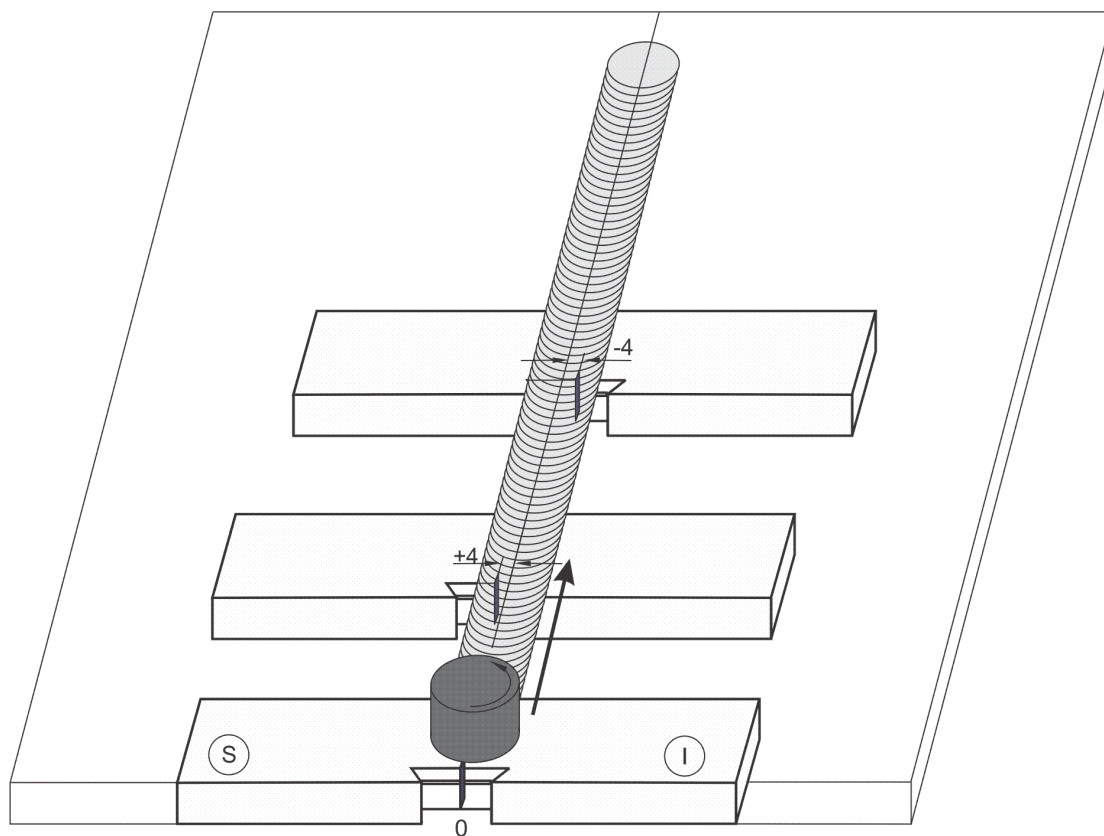
Algoritam postupka ispitivanja parametra mehanike loma (K_{Ic} , $CTOD$, J-integral) prema standardu BS 7448, deo 2 [111], data je šematski na slici 3.16, koji je primenjen u okviru ove disertacije.



Slika 3.16. Šematski prikaz algoritma ispitivanja parametara mehanike loma kod zavarenih spojeva prema BS 7448 - deo 2 [111]

Početak ispitivanja je bio posvećen pripremanju epruveta. Položajem zareza, odnosno vrha zamorne prsline definiše se željena struktura kroz koju se lom razvija. Na taj način se dobijaju pokazatelji uticaja heterogenosti strukture zavarenog spoja na svojstva mehanike loma. Na slici 3.17 data je pozicija zareza na epruveti za sva tri parametra zavarivanja. Izrađen je veći broj SENB epruveta sa različitim pozicijama urezanog zareza u odnosu na makrostrukturu zavarenog

spoja i to: na sredini zavarenog spoja, na strani napredovanja i to 4 mm od sredine zavarenog spoja i na povratnoj strani i to 4 mm od sredine zavarenog spoja.



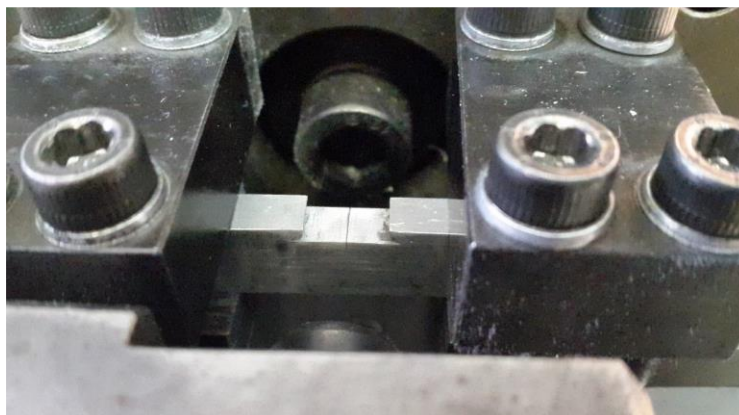
Slika 3.17. Pozicija izrade-urezivanja zareza na SENB epruvetama

U tabeli 3.4. su date oznake epruveta za određivanje parametara mehanike loma.

Nakon urezivanja inicijalne prslina u narednoj fazi ispitivanja stvara se zamorna prslina. Zamorna prslina se formira na visokofrekventnom pulzatoru Cractronic (slika 3.18.). Zamorna prslina je formirana sa odnosom minimalnog i maksimalnog opterećenja od $R=F_{\min}/F_{\max}=0,1$. Uređaj na kome je formirana zamorna prslina bio je RUMUL CRACKTRONIC na kome može da ostvari sinusoidalno jednosmerno opterećenje na savijanje u opsegu od -160 do 160 Nm frekvencija od 40 do 300 Hz. U fiksator mašine za zamaranje pripremljena epruveta sa mašinski urezanim zarezom se stavlja na 2 valjka na rastojanju 40 mm i opterećuje trećim valjkom na savijanje (slika 3.19).



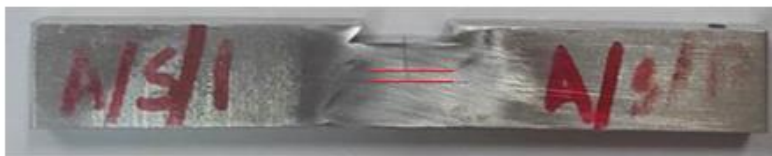
Slika 3.18. Visokofrekventni pulzator
CRACKTRONIC



Slika 3.19. Stegnuta epruveta na mašini za generisanje
zamorne prsline

Početni podaci vezani za eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma J_{Ic} i $CTOD$ su: dimenzije epruvete (širina epruvete B , visina epruvete W , dužina početnog zarez a_0) i karakteristike materijala AA 2024 T351 (granica tečenja R_e , zatezne čvrstoća R_m , modul elastičnosti E i Poasonov koeficijent ν - dati su u tabeli 3.2).

Na epruveti je mašinski napravljen zarez dužine $a_0=3,5$ mm. Odnos dužine zamorne prsline a i širine epruvete W treba da bude u granicama $0,45 \leq a/W \leq 0,55$, odnosno za veličinu $W=12$ mm, dužina zamorne prsline a treba da bude između $a_{min}=5,4$ mm i $a_{max}=6,6$ mm. Da bi se pratio rast zamorne prsline, specijalnim uređajem na epruveti se obeležavaju granice a_{min} i a_{max} (slika 3.20).



Slika 3.20. Obeležene granice između kojih treba da se nađe dužina zamorne prsline

Podlašavanje opterećenja radi stvaranja zamorne prsline na Cractronic-u: se vrši na osnovu sile [81]:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_Y}{S} \quad (3.1)$$

$$\text{gde je } \sigma_Y = \frac{R_e + R_m}{2} \quad (3.2)$$

Maksimalno opterećenje se određuje kao $F_{\max} = 0,55 \cdot F_m$, a minimalno opterećenje saglasno usvojenom faktoru opterećenja $R=0,1$, se određuje $F_{\min}=0,1 \cdot F_{\max}$.

Zamaranje radi iniciranja zamorne prsline se odvija u najmanje 2 koraka. Za prvi korak, maksimalni faktor intenziteta napona treba da bude:

$$K_{\max} = 0,063 \cdot R_e, \quad (3.3)$$

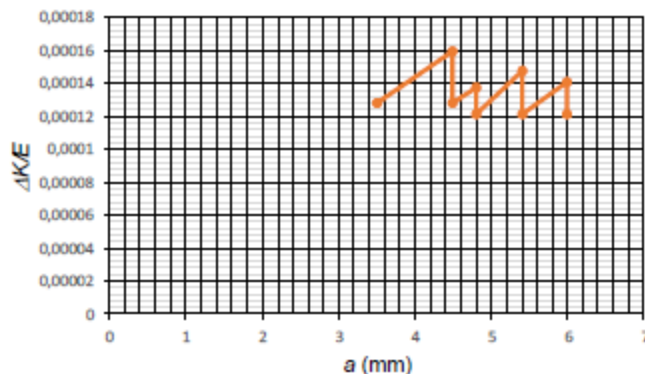
sa preporukom $K_{\max} = 0,7 \cdot 0,063 \cdot R_e$,

gde je: R_e – granica tečenja materijala.

Minimalni faktor intenziteta napona K_{\min} se određuje, saglasno faktoru opterećenja $R=0,1$, kao $K_{\min}=0,1 \cdot K_{\max}$. Raspon između minimalne i maksimalne vrednosti faktora intenziteta napona određuje se kao:

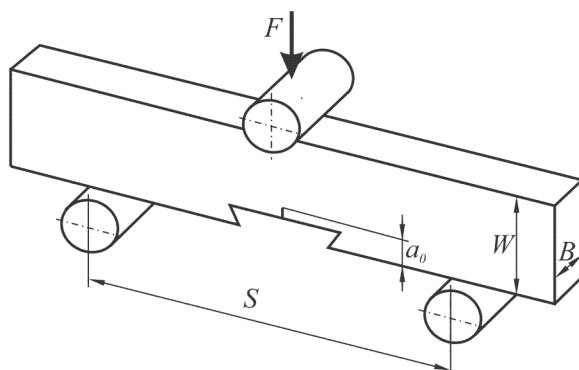
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

Prilikom iniciranja zamorne prsline, rast prsline mora biti spor i kontrolisan. Odnos između faktora intenziteta napona i modula elastičnosti u procesu zamaranja nesme da prekorači vrednost $K/E=K_{\max}/E=0,00021$. Zamaranje se vrši u više koraka, u ovom slučaju u 4 koraka, pri čemu se u prvom koraku inicira rast prsline od 1 mm, a onda 0,3 mm, 0,6 mm i na kraju 0,6 mm, respektivno. Ukupna dužina zamorne prsline iznosi $a=6$ mm, što je u definisanim granicama ($a_{\min}=0,45W=5,4$ mm, $a_{\max}=0,55W=6,6$ mm). Na slici 3.21 prikazan je proces sprovođenja širenja prsline u koordinatnom sistemu $\Delta K/E-a$. Dijagram procesa zamaranja ima testerasti oblik jer se u određenim trenucima zaustavlja ispitivanje, smanjuje se opterećenje i podešavaju se parametri ispitivanja kako bi prslina imala stabilan rast.



Slika 3.21. Širenje prsline

Po završetku stvaranja zamorne prsline, vrši se savijanje epruvete. Epruveta se postavlja na uređaj za savijanje tako da linija delovanja opterećenja prolazi sredinom uzorka sa dopuštenim odstupanjem od $\pm 1\%$ od rastojanja oslonca uzorka koji iznosi $S = 4 W = 4 \cdot 12 = 48 \text{ mm}$ (slika 3.22). Pre početka ispitivanja, na vrhu usana epruvete za utvrđivanje *CMOD* bio je postavljen ekstenziometar (slika 3.23). Uzorak se opterećuje takvom brzinom da je mera povećanja intenziteta napona unutar granice od 0,55 do 2,75 MPa·m^{1/2}/s odnosno da je brzina ispitivanja takva da je brzina otvaranja prsline od 0,05 do 1,5 mm/min. Za slučaj istraživanja u okviru disertacije brzina ispitivanja je bila 1 mm/min, što je tipično za konvencionalno kvazi-statičko ispitivanje.

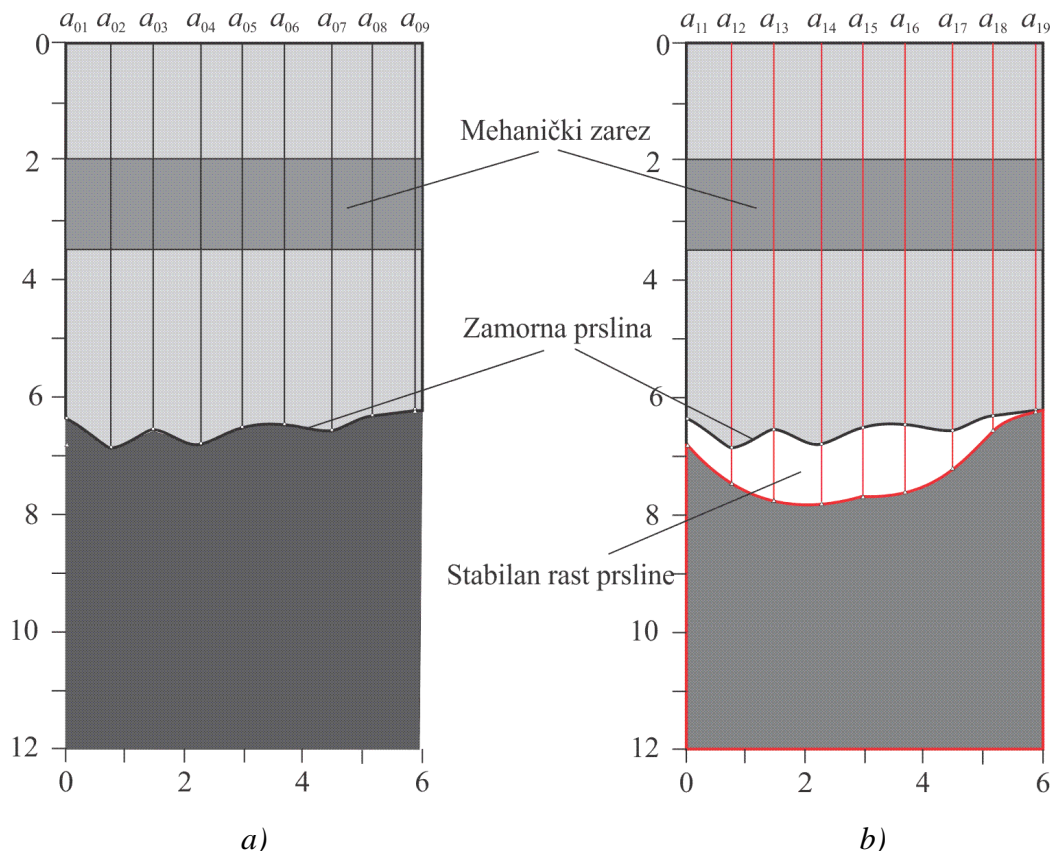


Slika 3.22. Šematski prikaz savijanja SENB epruvete do loma



Slika 3.23. Savijanje SENB epruvete sa postavljenim ekstenziometrom na vrhu usana epruvete

Po završetku savijanja SENB epruvete radi se fraktografija prelomne površine. Na površini preloma (slika 3.24) uočava se zamorna prsline nastala zamornom probom. Dužina zamorne prsline se meri optičkim uređajem na devet mesta u preseku ($a_{01}, a_{02}, \dots, a_{09}$), slika 3.24.



Slika 3.24. Prelomna površina epruvete a) merenje zamorne prsline u 9 tačaka; b) merenje dužine stabilnog rasta prsline u 9 tačaka [81]

Prosečna vrednost zamorne prsline se određuje na osnovu merenja zamorne prsline optičkim uređajem za obe strane (strana napredovanja i povratna strana) prelomne površine, izrazom [81]:

$$a_0 = \frac{(a_{01} + a_{09})/2 + a_{02} + a_{03} + a_{04} + a_{05} + a_{06} + a_{07} + a_{08}}{8} \quad (3.4)$$

Optičkim uređajem se meri i dužina stabilnog rasta prsline u istim presecima na kojima se meri zamorna prslina ($a_{11}, a_{21}, \dots, a_{91}$) i određuje prosečna vrednost prsline nastale stabilnim rastom izrazom [81]:

$$a_1 = \frac{(a_{11} + a_{19})/2 + a_{12} + a_{13} + a_{14} + a_{15} + a_{16} + a_{17} + a_{18}}{8}, \quad (3.5)$$

a zatim se vrši određivanje prosečne vrednosti rasta prsline Δa :

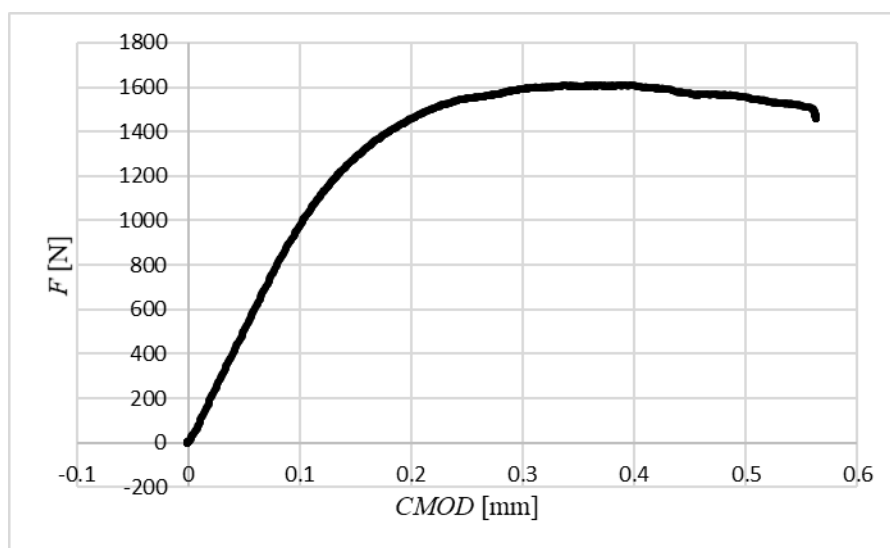
$$\Delta a = a_1 - a_0 \quad (3.6)$$

Izgled epruveta nakon završetka ispitivanja je dat na slici 3.25.



Slika 3.25. Izgled epruveta nakon završetka ispitivanja

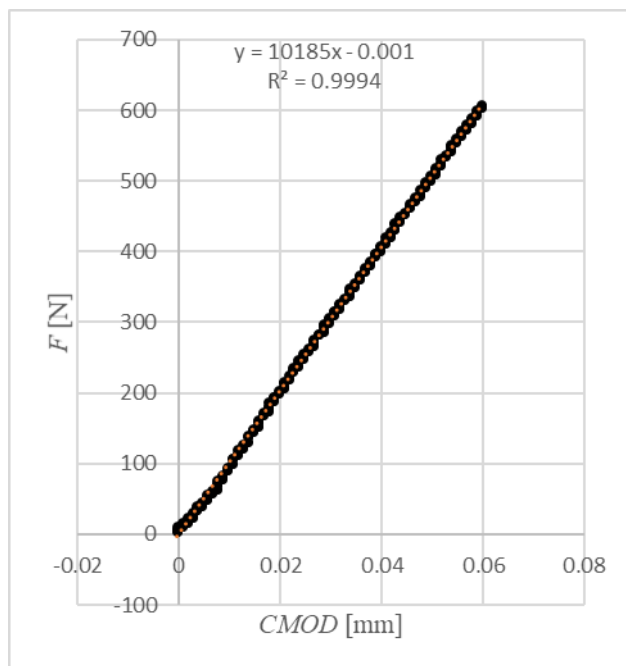
U toku ispitivanja parametara mehanike loma registruju se vrednosti opterećenja F u N i vrednost otvaranja usta prsline $CMOD$ u mm, koje su izmerene na SENB epruveti pomoću ekstenziometra. Dijagram rezultata merenja sila F – otvaranje usta prsline $CMOD$ dat je na slici 3.26.



Slika 3.26. Dijagram sila-otvaranje usta prsline F - $CMOD$

Prvi deo obrade rezultata merenja je u pravcu pomeranja početne tačke dijagrama F - $CMOD$ na nula početnu vrednost. Prvi deo dijagrama F - $CMOD$ je prava linija – linearni deo krive za koji se definiše jednačina prave u obliku:

$$F = k \cdot CMOD + n \quad (3.7)$$



Slika 3.27. Linearni deo dijagrama F-CMOD

U slučaju primera na slici 3.27 koeficijent pravca linearnog dela iznosi $k=10185$.

3.6.1. Proračun faktora intenziteta napona K

Vrednost faktora inteziteta napona za svaku tačku $K_{(i)}$ u $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ određuje se prema izrazu [83]:

$$K_{(i)} = \left[\frac{F_i \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \right] \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (3.8)$$

gde je: $f(a_0/W)$ - funkcije oblika koja se određuje prema izrazu [83]:

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a_0}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a_0}{W}\right)\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \quad (3.9)$$

F_i – sila opterećivanja epruvete u N,

S – rastojanje između oslonaca za savijanje epruvete u mm,

$B=B_N$ – debljina epruvete u mm

3.6.2. Proračun J-integrala

Kako se materijal do određene granice naprežanja ponaša elastično, a nakon toga plastično, J -integrala ima dva dela, J_{el} - elastični i J_{pl} - plastični deo [83]:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_{pl} \cdot A_{pl}}{B_N \cdot b_0} \quad (3.10)$$

gde je: K – faktor intenziteta napona prema (3.8) u $\text{N/mm}^{3/2}$

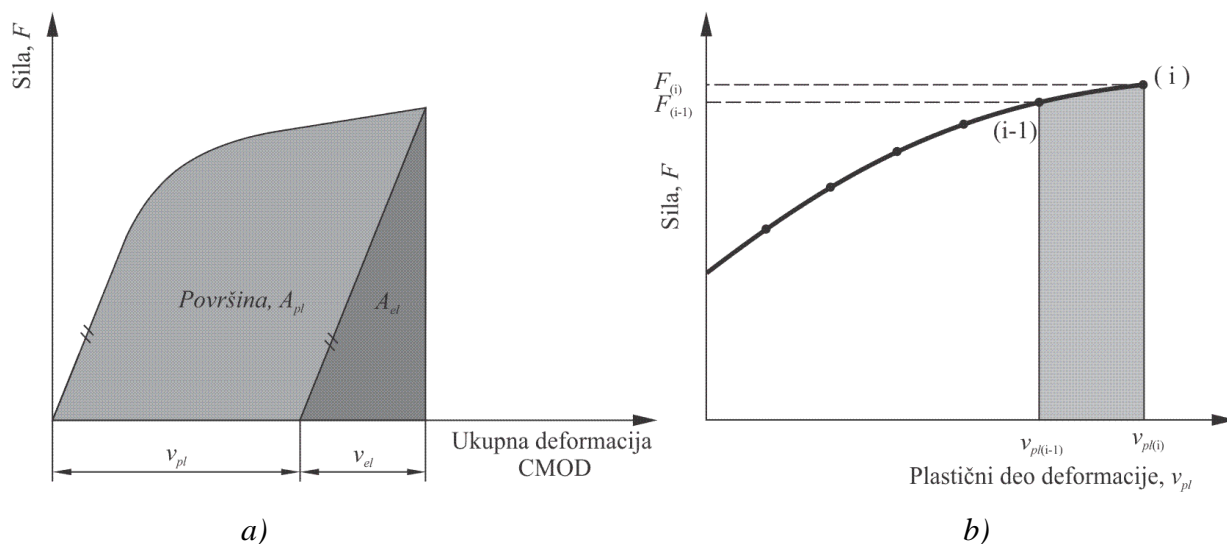
ν – koeficijent Poasona

E – modul elastičnosti u MPa

A_{pl} – deo površine ispod krive F - $CMOD$ kojim je definisan plastični deo deformacije epruvete (slika 3.28, a)

$B_N=B$ – debljina epruvete u mm

$b_0 = W - a_0$ – veličina ligamenta epruvete bez prsline u mm



Slika 3.28. Dijagram F - $CMOD$ a) Definicija površina za proračun J integral na osnovu bazične metode; b) Definicija plastičnog dela površine za krivu otpornosti pri izračunavanju J integrala [83]

Plastični deo otvaranja prsline v_{pl} u mm određuje se na osnovu izraza:

$$v_{pl} = -\frac{F - CMOD \cdot k}{k} \quad (3.11)$$

gde je: v_{pl} – plastični deo pomeranja u mm

F – sila za svaku tačku krive u N

k – koeficijent linearnog dela krive

Elastični deo pomeranja pri otvaranju prsline:

$$v_{el} = CMOD - v_{pl} \quad (3.12)$$

Na osnovu slike 3.28, b, deo površine ispod krive $F-CMOD$, koji odgovara plastičnoj deformaciji se izračunava prema izrazu:

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[F_{(i)} + F_{(i-1)}] \cdot [v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]}{2} \quad (3.13)$$

Elastični deo J-integrala se određuje prema izrazu:

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (3.14)$$

gde je: J_{el} – elastični deo J-integrala u N/mm

ν – koeficijent Poasona

E – modul elastičnosti u MPa

$K_{(i)}$ – faktor intenziteta napona za svaku tačku u $N/mm^{3/2}$

$$K_{(i)} = \left[\frac{F_i \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \right] \cdot f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3.15)$$

Funkcija oblika $f(a_i/W)$ se određuje iz izraza [83]:

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_i}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_i}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_i}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a_i}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a_i}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a_i}{W}\right) \left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad (3.16)$$

Plastični deo J-integrala se određuje prema izrazu [83]:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_{pl(i-1)} A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)} B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_{pl(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (3.17)$$

gde je: J_{pl} – plastični deo J – integrala u N/mm

A_{pl} – površina ispod krive $F-v_{pl}$ kojom se definiše plastični deo deformacije epruvete (slika 3.28, b)

b – veličina nepolomljenog dela epruvete u mm

$B=B_N$ – širina epruvete u mm

$$\eta_{pl(i-1)} = 3,667 - 2,199\left(\frac{a_{(i-1)}}{W}\right) + 0,437\left(\frac{a_{(i-1)}}{W}\right)^2 \quad (3.18)$$

$$\gamma_{pl(i-1)} = 0,131 + 2,131 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) - 1,465 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \quad (3.19)$$

3.6.3. Tehnika normalizacije podataka

Za dobijanje krive otpornosti $J-\Delta a$ potrebno je izvršiti proces normalizacije. Tehnika normalizacije opisana je u radovima Herrera i Landes [108] i Landes i dr. [109], Lee [110] i Joyce [111]. Metod normalizacije je moguć za statički opterećene epruvete, ali nije moguć za krte materijale odnosno materijale male žilavosti.

Vrednost normalizovane sile [83]:

$$F_{Ni} = \frac{F_i}{B \cdot W \cdot \left[\frac{W - a_{bi}}{W} \right]^{n_{pl}}} \quad (3.20)$$

gde je a_{bi} - korigovana veličina prsline definisana izrazom:

$$a_{bi} = a_0 + \frac{J_i}{2 \cdot \sigma_Y} \quad (3.21)$$

gde je:

J_i – vrednost J-integrala u N/mm

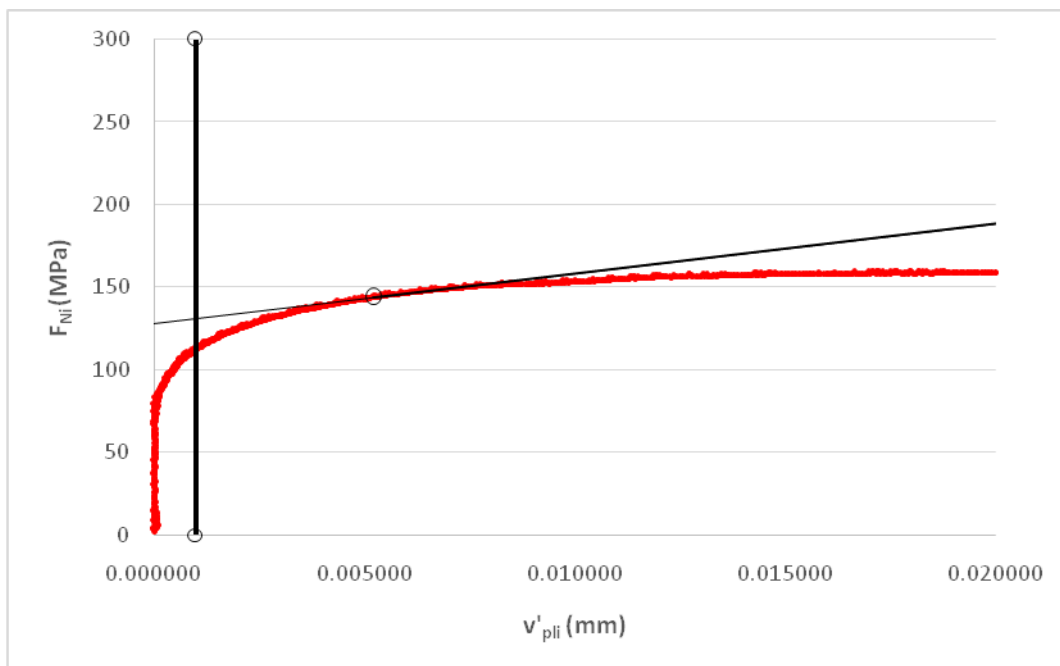
Vrednost normalizovanog plastičnog dela otvaranja prsline $CMOD$:

$$v'_{pli} = \frac{v_{pli}}{W} \quad (3.22)$$

Podaci za koje je $v'_{pli} = v_{pli}/W \leq 0,001$ se isključuju iz normalizacije funkcije. Na dijagramu (slika 3.29) se crtaju dve linije, jedna je vertikalna linija za vrednost $v'_{pli} = 0,001$, a druga kosa linija je tangenta na krivu. Tangenta polazi od poslednje tačke krive u kojoj je najveća dužina prsline. Ove dve linije definišu broj i raspon tačaka koje će se koristiti u modelu fitovanja krive. Analitička funkcija normalizacije je u obliku [83]:

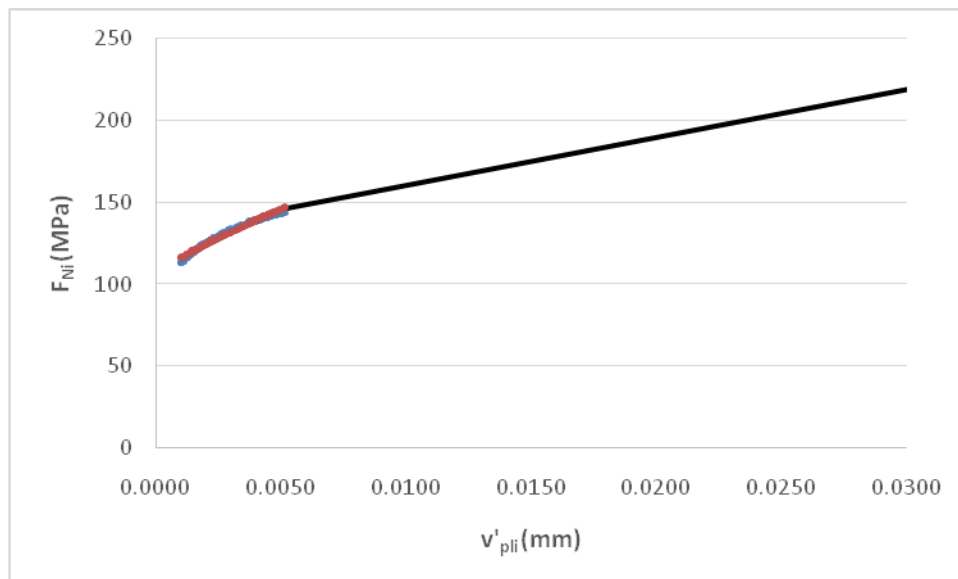
$$\text{model}(F_{Ni}) = \frac{a + b \cdot v'_{pli} + c \cdot v'_{pli}{}^2}{d + v'_{pli}} \quad (3.23)$$

gde su a , b , c i d – koeficijenti normalizacije (fitovanja).



Slika 3.29. Dijagram normalizovana sila-normalizovani plastični deo otvaranja prsline

Na slici 3.30 prikazano je fitovanje tačaka analitičkom funkcijom normalizacije.



Slika 3.30. Fitovanje analitičkom funkcijom normalizacije

Iz izraza (3.20) za normalizovanu silu i izračunate vrednosti normalizacione sile F_{Ni} određuju se nove vrednosti a_i/W za svaku tačku za koju je $v_{pli} \geq 0,002$ [54]:

$$\frac{a_i}{W} = 1 - \eta_{pl} \sqrt{\frac{F_i}{B \cdot W \cdot F_{Ni}}} \quad (3.24)$$

Odavde za svaku tačku se određuje dužina prsline:

$$a_i = \frac{a_i}{W} \cdot W \quad (3.25)$$

Vrednost promene dužine prsline Δa se određuje:

$$\Delta a = a_i - a_{(i-1)} \quad (3.26)$$

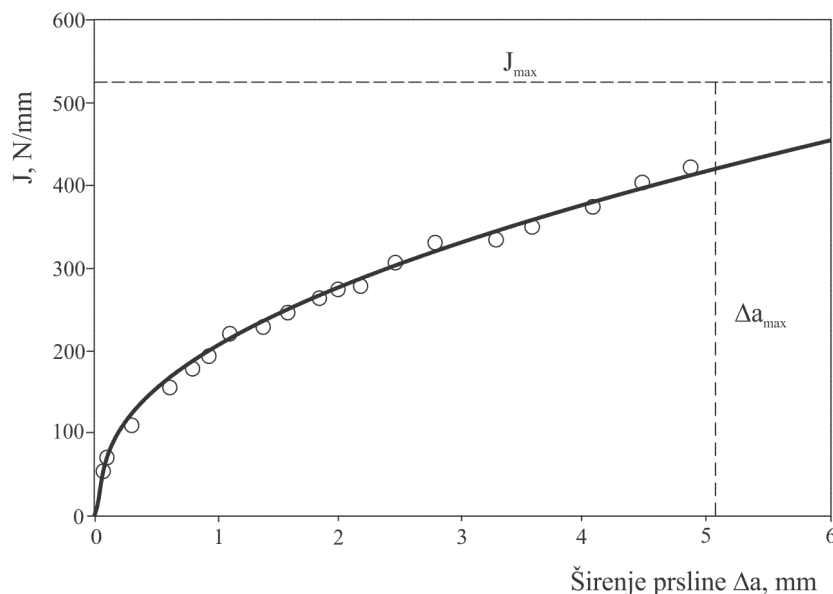
Vrednost nepolomljenog ligamenta se za svaku tačku izračunava kao:

$$b_i = W - a_i \quad (3.27)$$

Konačno, vrednost J-integrala koja se računa kao zbir elastičnog i plastičnog dela deformacije, zamenom izraza (3.14) za elastični deo i izraza (3.17) za plastični deo, dobija se [83]:

$$J = J_{el(i)} + J_{pl(i)} = \frac{K_{(i)}^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} + \left[J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_{pl(i-1)} \cdot A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)} \cdot B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_{pl(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (3.28)$$

Ako se unesu parovi vrednosti J-integrala i odgovarajuće vrednosti rasta prsline Δa dobija se kriva otpornosti J - Δa prikazana na slici 3.31.



Slika 3.31. Tipična kriva otpornosti J - Δa [83]:

Koristeći metodu najmanjih kvadrata vrši se normalizacija, odnosno aproksimacija krive $\ln(J)-\Delta a$, se vrši linearnom regresionom linijom u sledećem obliku [83]:

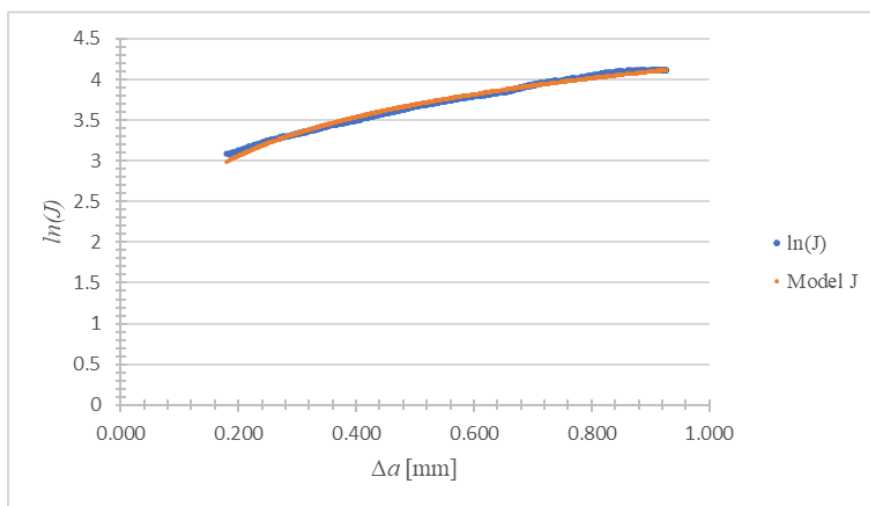
$$\text{model}(\ln(J)) = \ln(C_1) + C_2 \cdot \ln\left(\frac{\Delta a}{k}\right) \quad (3.29)$$

gde su: C_1 , C_2 i k – konstante.

Na slici 3.32 su date uporedo krive $\ln(J)-\Delta a$ i aproksimovana kriva $\text{model}(\ln(J)-\Delta a)$.

Odstupanje (devijacija) vrednosti $\ln(J)$ i $\text{model}(\ln(J))$ se računa prema izrazu:

$$D_{ev} = (\ln(J) - \text{model}(\ln(J)))^2 \quad (3.30)$$



Slika 3.32. Fitovanje krive $(\ln(J)-\Delta a)$ analitičkom funkcijom normalizacije

Na osnovu preklapanja krive $\ln(J)-\Delta a$ i aproksimovane krive se zaključuje koliko su dobro određene konstante C_1 , C_2 i k . Za određene konstante C_1 , C_2 i k određuju se vrednosti J-integrala za širenje prsline Δa [83]:

$$J = e^{\ln(C_1) + C_2 \cdot \ln(\Delta a/k)} \quad (3.31)$$

3.6.4. Kriva otpornosti J- Δa

Za dobijanje dijagrama kriva otpornosti J- Δa , nakon crtanja krive $J-\Delta a$, potrebno je:

- crtanje konstrukcione linije,
- crtanje uporednica paralelnih konstrukcionoj liniji na $\Delta a=0,15$ mm; 0,2 mm i 1,5 mm

Standardom ASTM E 813 se definiše početak rasta prsline, trenutak kada prsline napreduje za 0,2 mm u odnosu na početnu dužinu prsline a_0 . Zato, se u dijagramu krive otpornosti crta

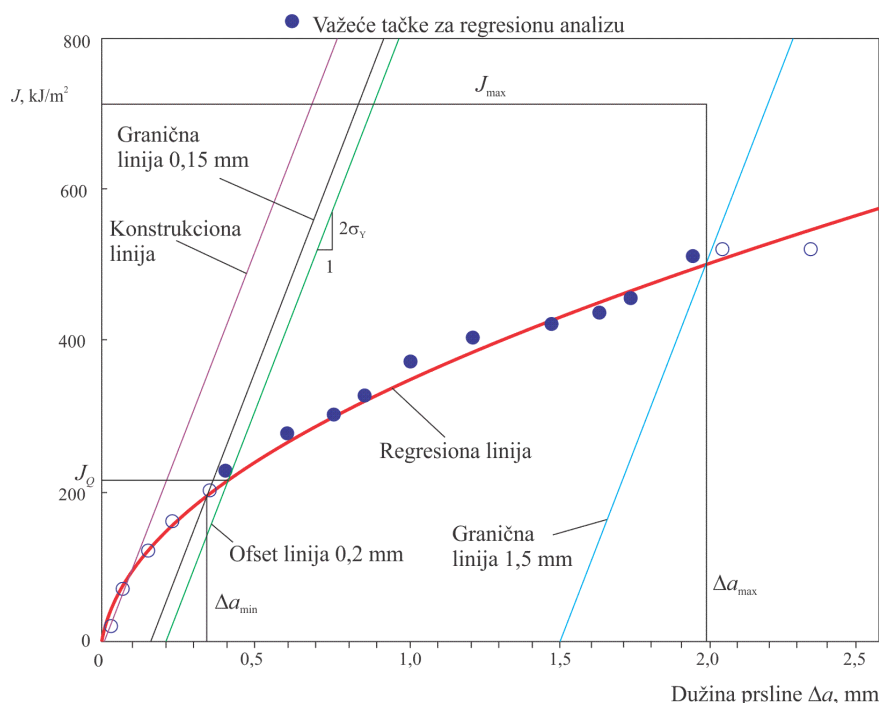
uporednica konstrukcionoj liniji na $\Delta a=0,2$ mm. Presek uporednice na $\Delta a=0,2$ mm i krive otpornosti definiše kandidovanu vrednost J_Q (slika 3.33).

Kriva otpornosti mora biti u oblasti ograničenoj koordinatnim osama i linijama J_{\max} i Δa_{\max} (slika 3.33). Maksimalna vrednost J_{\max} se definiše izrazom [83]:

$$J_{\max} = \frac{b_0 \cdot \sigma_Y}{7,5}, \quad (3.32)$$

a maksimalna vrednost za Δa se definiše izrazom [83]:

$$\Delta a_{\max} = 0,25 \cdot b_0 \quad (3.33)$$



Slika 3.33. Prikaz postupka za određivanje kandidovane vrednosti J_Q prema standardu ASTM E 1820 [83, 112, 113]

Da bi kandidovana vrednost J_Q važila kao kritična vrednost J_{Ic} , moraju da budu ispunjeni uslovi:

$$B > 25 \cdot J_Q / \sigma_Y \text{ i } b_0 > 25 \cdot J_Q / \sigma_Y \quad (3.34)$$

gde je: B – debljina epruvete

$b_0 = W - a_i$ – ligament

J_Q – kandidovana vrednost J-integrala

σ_Y – napon prema izrazu (3.2)

Na osnovu kritične vrednosti J_{Ic} , može da se odredi žilavost loma K_{Jlc} iz jednačine (2.36).

3.6.5. Kriva otpornosti $CTOD$ (δ)- Δa

Vrednost otvaranja prsline $CTOD$ (δ) određuje se prema standardu ASTM E1820 i direktno je povezana sa vrednošću J-integrala [83]:

$$CTOD_i = \delta_i = \frac{J_{(i)}}{m_{(i)} \cdot \sigma_Y} \quad (3.35)$$

gde je:

σ_Y - srednja vrednost granice tečenja i zatezne čvrstoće, prema izrazu (3.2).

m – faktor koji se određuje iz jednačine [83]:

$$m = A_0 - A_1 \cdot \left(\frac{R_e}{R_m}\right) + A_2 \cdot \left(\frac{R_e}{R_m}\right)^2 - A_3 \cdot \left(\frac{R_e}{R_m}\right)^3 \quad (3.36)$$

u kojoj se vrednosti za A_0, A_1, A_2, A_3 računaju prema jednačinama [83]:

$$A_0 = 3,18 - 0,22 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3.37)$$

$$A_1 = 4,32 - 2,23 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3.38)$$

$$A_2 = 4,44 - 2,29 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3.39)$$

$$A_3 = 2,05 - 1,06 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3.40)$$

Za proračun otvaranja prsline δ neophodno je ispunjenje uslova $R_e/R_m \geq 0,5$.

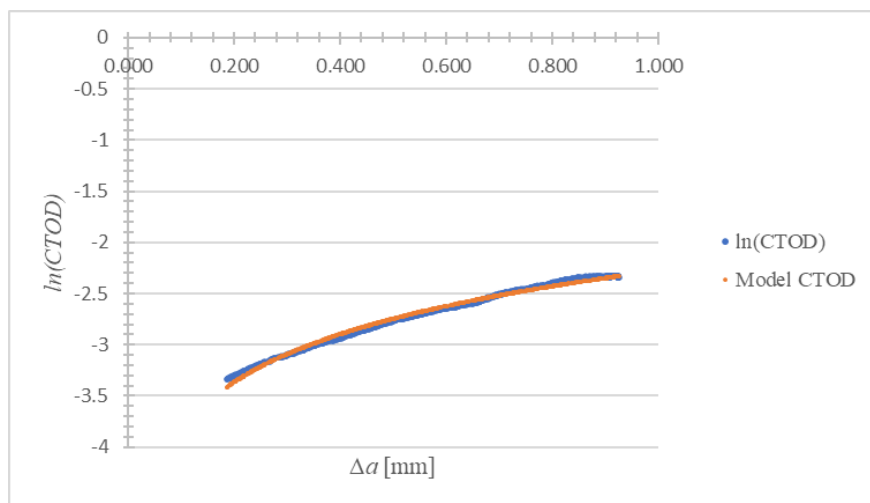
Za crtanje se krive otpornosti $\ln(CTOD)$ - Δa , postupak je sličan kao kod krive otpornosti J - Δa , (slika 3.33), vrši se normalizacija, tako što se određuje izraz aproksimativne krive u obliku [83]:

$$model(\ln(\delta)) = \ln(C_1) + C_2 \cdot \ln\left(\frac{\Delta a}{k}\right) \quad (3.41)$$

Na slici 3.34 su date uporedo krive $\ln(CTOD)$ - Δa i aproksimovana kriva $model(\ln(\delta)$ - Δa).

Određuje se odstupanje (devijacija) vrednosti $\ln(\delta)$ i $model(\ln(\delta))$ prema izrazu:

$$D_{ev} = (\ln(\delta) - model(\ln(\delta)))^2 \quad (3.42)$$

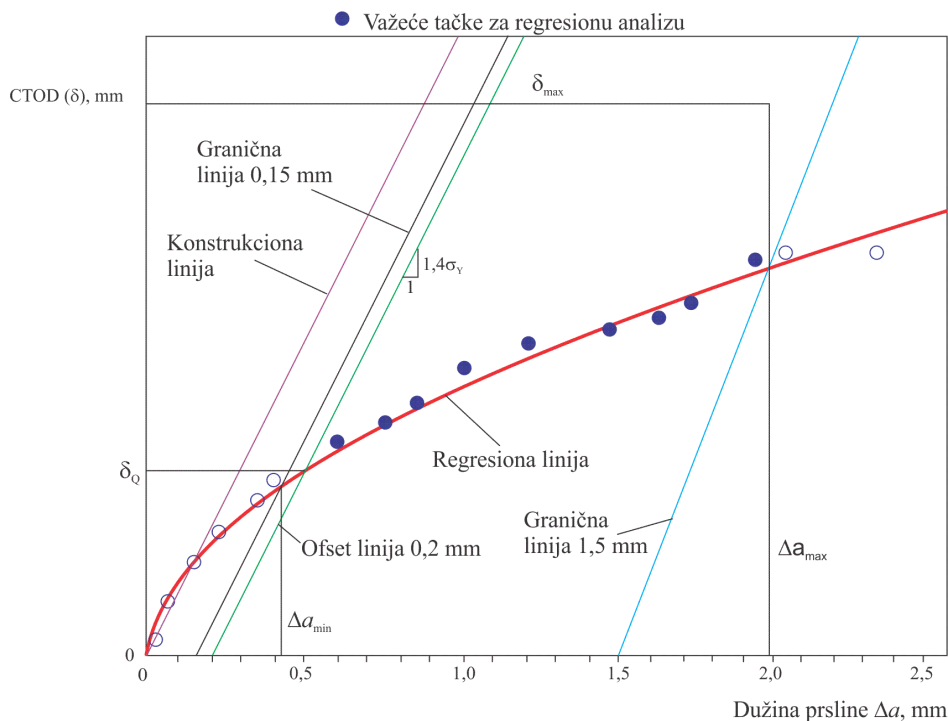


Slika 3.34. Fitovanje analitičkom funkcijom normalizacije

Za određene konstante C_1 , C_2 i k određuju se vrednosti otvaranja prsline δ za širenje prsline Δa [83]:

$$\delta = e^{\ln(C_1) + C_2 \cdot \ln(\Delta a/k)} \quad (3.43)$$

Kriva otpornosti $\delta - \Delta a$, je data na slici 3.35.



Slika 3.35. Prikaz postupka za određivanje vrednosti δ_0 prema standardu ASTM E 1820 [83]

Na dijagramu je definisana konstrukciona linija u skladu sa sledećim izrazom: $\delta = 1,4 \cdot \Delta a$.

Paralelno sa konstrukcijskom linijom povučene su linije sa apscise za vrednost $\Delta a = 0,15$ i $0,2$ mm.

Maksimalna vrednost δ_{\max} se definiše izrazom [83]:

$$\delta_{\max} = \frac{b_0}{7,5 \cdot m}, \quad (3.44)$$

Iz preseka krive otpornosti i linije paralelne konstrukcionoj na udaljenju $0,2$ mm, dobija se kandidovana vrednost otvaranja prsline δ_Q . Da bi kandidovana vrednost otvaranja prsline važila kao kritična, odnosno $\delta_Q = \delta_c$ mora biti ispunjen uslov: $b_0 \geq 10m \cdot \delta_Q$ gde je:

m – faktor određen izrazom (3.36),

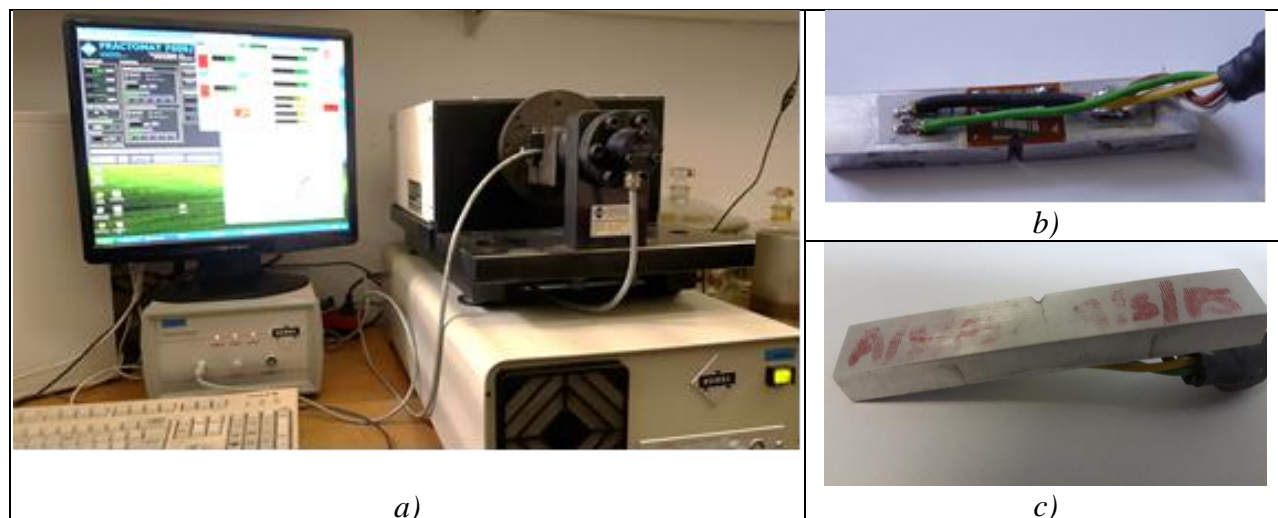
$b_0 = W - a_i$ – ligament.

3.7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE BRZINE RASTA ZAMORNE PRSLINE

Ekperimentalno određivanje brzine rasta zamorne prsline da/dN se vrši prema standardu ASTM E647 [89]. Za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline neophodan je: visokofrekventni pulzator Cracktronic (slika 3.19), uređaj za merenje dužine prsline Fractomat i adekvatan softver za kontrolu procesa zamaranja. Ispitivanje se izvodi sa kontrolom sile. Za ispitivanje se koriste Šarpi epruvete na kojima su zalepljene merne trake RUMUL RMF A-5, merne dužine 5 mm. Na slici 3.36 je prikazana pripremljena epruveta sa zalepljenom mernom trakom za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline.

Standardom ASTM E647 [89] je propisano da brzina rasta mora biti veća od 10^{-8} m/ciklus da bi se izbeglo područje praga opsega intenziteta napona ΔK_{th} , i opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

Prag opsega intenziteta napona ΔK_{th} je granična vrednost. Ispod ove vrednosti, brzina rasta zamorne prsline da/dN je približno nula. Za većinu materijala data je operativna, mada proizvoljna definicija ΔK_{th} , kao ΔK kojoj odgovara brzini rasta zamorne prsline od 10^{-10} m/ciklus [42].



Slika 3.36. a) Mašina za zamaranje- cracktronic sa fraktomatom, b) epruveta sa zalepljenom mernom trakom, c) epruveta nakon završenog ispitivanja

U fiksator mašine za zamaranje – Cracktronic, pripremljena epruveta sa mašinski urezanim rezom i zalepljenom mernom trakom se stavlja na 2 valjka na rastojanju 40 mm i opterećuje trećim valjkom na savijanje. Raste zamorne prsline ispod merne trake se prati, teko što merna traka puca prateći vrh zamorne prsline. Sa promenom dužine prsline događa se promena otpora merne trake linearno.

Brzini rasta zamorne prsline da/dN se određuje u funkciji opsega faktora intenziteta napona, ΔK .

Opseg faktora intenziteta napona ΔK se određuje izrazom [89]:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \cdot \sqrt{W^3}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.45)$$

gde je:

$\Delta F = F_g - F_d$ - opsega promenljive sile

L – rastojanje između oslonaca u mm

B – debljina epruvete u mm

W - širina (visina) epruvete u mm

a – dužina prsline

$f(a/W)$ – funkcija oblika prema izrazu (3.16)

Na osnovu toka ispitivanja i dobijenih zavisnosti dužina prsline a i broj ciklusa N , izračunava se brzina rasta zamorne prsline da/dN . Standard ASTM E647 [89], u oblasti II,

preporučuje dva načina proračuna brzine rasta prsline: metodom sečice i inkrementalnim polinomom.

Metoda sečice je tehnika od tačke do tačke. Za proračun brzine rasta prsline metod sečice koristi se nagib prave linije koja povezuje dve susedne tačke na liniji krive $a-N$ prema izrazu [89]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3.46)$$

gde je:

a_{i+1}, a_i - dužina prsline pri $i+1$ i i -tom ciklusu opterećenja,

N_{i+1}, N_i - broj ciklusa $i+1$ i i -tom ciklusu opterećenja

Brzina rasta zamorne prsline da/dN u funkciji promene opsega faktora intenziteta napona ΔK , crta se u koordinatnom sistemu $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$.

3.8. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI

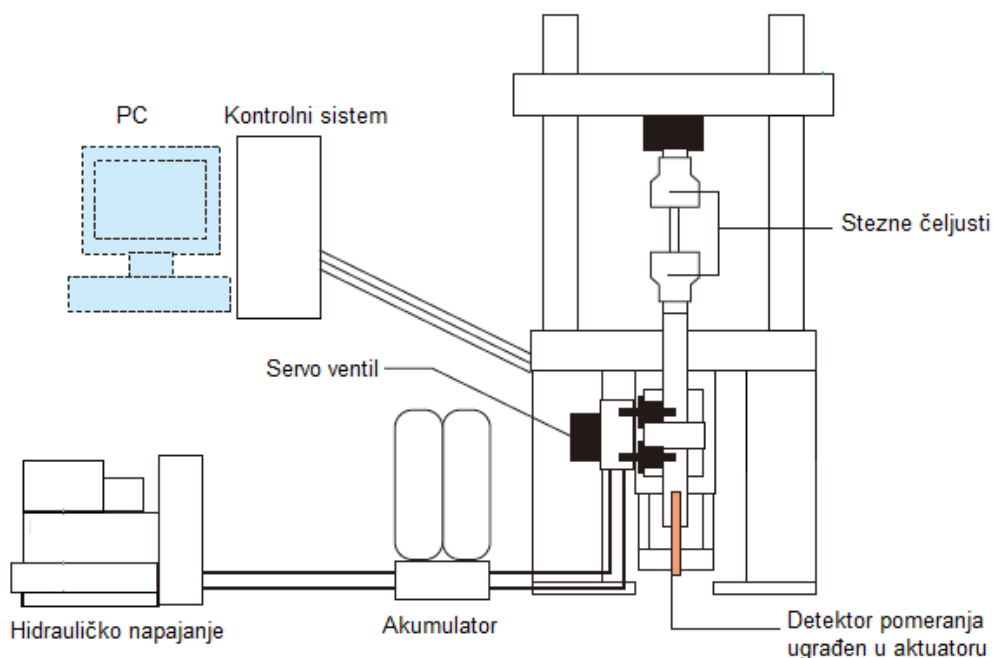
3.8.1 Ispitivanje dinamičke izdržljivosti na servo-hidrauličnom pulzatoru

Ekperimenti zamaranja epruveta sa ZTM zavarenim spojevima su sprovedeni na opremi „Shimadzu Servopulser E100kN, Shimadzu Co., Kyoto, Japan “. Radi se o servo-hidrauličnoj mašini (pulzatoru) za zamaranje materijala (slika 3.37), dinamičkog i statičkog aksijalnog opterećenja do 100 kN.



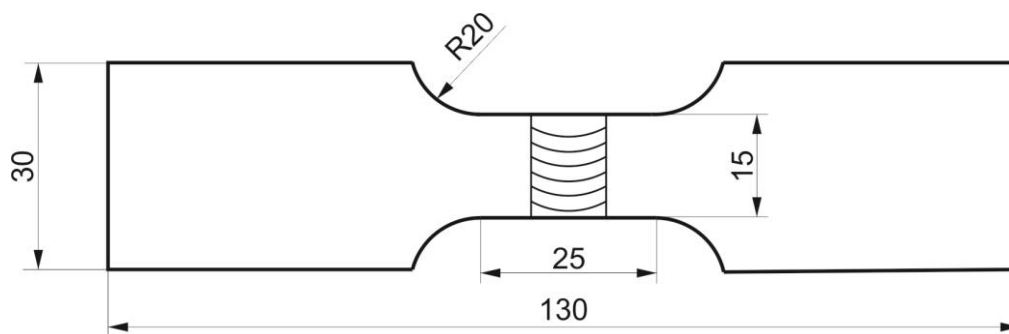
Slika 3.37. Servohidraulički pulzator SHIMADZU EHF-EV101k3-070-OA

Šematski prikaz servohidrauličnog pulzatora, koji se sastoji od računara, kontrolnog sistema, hidrauličnog agregata i hidrauličnog pulzatora dat je na slici 3.38.



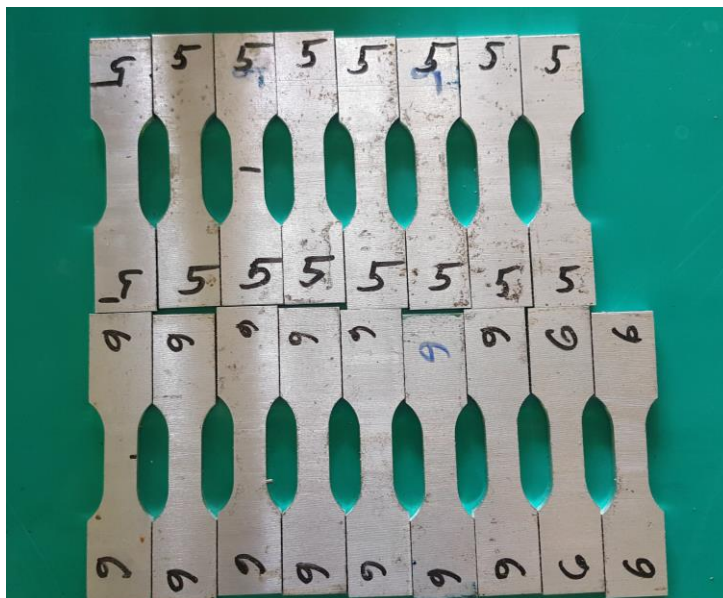
Slika 3.38. Šematski prikaz servohidrauličkog pulzatora [114]

Oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje na zamaranje data je na slici 3.39, a na slici 3.40 deo izrađenih epruveta spremnih za ispitivanje.



Slika 3.39. Dimenzije epruveta za ispitivanje na zamaranje

Ispitivanje na zamaranje je rađeno sa odnosom opterećenja odnosno napona $R = F_{\min}/F_{\max} = 0.1$ i frekvencijom opterećenja 35 Hz. Pripremljeno je ukupno 48 epruveta (deo epruveta prikazan na slici 3.40). Za svaki parametar zavarivanja trenjem sa mešanjem (750/73; 750/116 i 750/150) bilo je spremno po 16 epruveta.



Slika 3.40. Deo izrađenih epruveta spremnih za ispitivanje na zamaranje

Kriterijum otkaza je bio lom epruvete. Tokom ispitivanja se snimao broj ciklusa opterećenja do loma za svaku ispitivanu epruvetu. Kriterijum za određivanje trajne dinamičke izdržljivosti je bio broj 10×10^6 ciklusa.

Prva epruveta je statički opterećena da bi se odredila granica tečenja, na osnovu koje je definisana šema ispitivanja na zamaranje. Epruveta je sve vreme ispitivanja zategnuta sa odnosom opterećenja $R=0,1$. U tabeli 3.5 su date vrednosti opterećenja F_{\max} i F_{\min} .

Tabela 3.5. Definisana šema ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja (750/73; 750/116; 750/150) na servohidrauličnom pulzatoru

750/73		750/116		750/150	
F_{\max}	F_{\min}	F_{\max}	F_{\min}	F_{\max}	F_{\min}
kN	kN	kN	kN	kN	kN
12	1.2	14	1.4	16	1.6
11	1.1	13	1.3	14	1.4
10	1	11	1.1	12	1.2
9.5	0.95	10	1	11	1.1
9.5	0.95			10.5	1.05
9	0.9			10	1

3.8.2. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti na elektro-dinamičkom vibracionom stolu

Dinamička izdržljivost ZTM zavarenih spojeva je ispitivana i na elektro-dinamičkom vibracionom stolu. Primena elektrodinamičkog vibracionog stola šejkera za određivanje dinamičke izdržljivosti materijala nije standardom definisana jer u osnovi visokofrekventne mašine (šejkeri) služe za modalna ispitivanja [115]. Ispitivanja dinamičke izdržljivosti materijala na visokofrekventnim mašinama su prikazana u radovima [116, 117].

Za potrebe istraživanja u okviru ove disertacije je korišćen visokofrekventni elektro-dinamički vibracioni sto (šejker) SENTEK DYNAMICS serije M (slika 3.41) na Mašinskom fakultetu u Nišu. Elektro-dinamički vibracioni sto, prvenstveno je namenjen ispitivanju komponenata i sistema automobila, testiranje elektronskih sklopova, računarske opreme, komponenti satelita, aviona i vojne opreme, ispitni proizvodi težine do 1000 kg.



Slika 3.41. Elektro-dinamički vibracioni sto SENTEK DYNAMICS serije M

Vibracioni sto se može podesiti sa vertikalnim hodom za testiranje i do 51 mm. U ovom istraživanju vertikalni hod platforme je iznosio 1mm. Frekvencija oscilacija vibracionog stola može se podesiti u rasponu od 5 Hz do 3000 Hz. U ovom istraživanju frekvencija je varirana u intervalu od 29 Hz do 34 Hz.

Akceleracija platforme zavisi od veličine vertikalnog pomeraja i frekvencije, a može se izračunati prema izrazu (3.47) u kojoj je izražena kroz akceleraciju zemljine sile teže g :

$$g \text{ (vrednost)} = 2,012 \cdot 10^3 \cdot D_p \cdot f^2 \quad (3.47)$$

gde je: g – akceleracija platforme izražena u vidu zemljine sile teže,
 D_p – vertikalno pomeranje platforme vibro stola u mm,
 f – frekvencija platforme vibro stola u Hz.

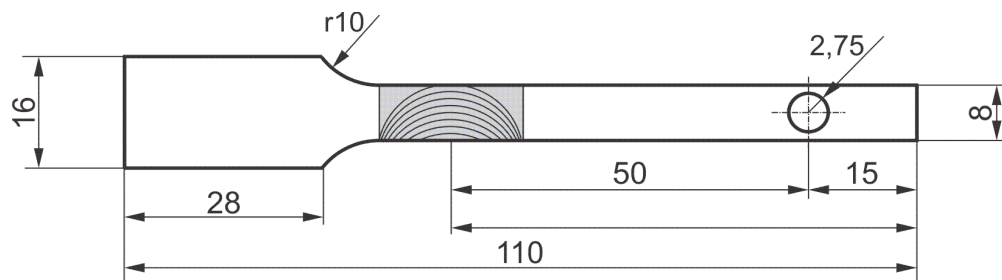
Veća frekvencija uzrokuje veću akceleraciju platforme, pa tako i veće napone u epruveti, odnosno povećanje napona dobija se povećanjem frekvencije platforme.

Ispitivanje na zamaranje primenom elektrodinamičkog vibracionog stola nije standardom definisano, a saglasno tome nije definisana metodologija ispitivanja, ni oblik epruveta, ni alat za učvršćivanje epruveta. Saglasno tome, trebalo je za ovakvo ispitivanje definisati oblik epruvete, oblikovati fiksator za istovremeno ispitivanje većeg broja epruveta, način pričvršćivanja fiksatora za vibro sto šejkera. A najvažnija stvar za ovo ispitivanje je definisanje metodologije ispitivanja. Za pobudne vibracije epruvete, na kraju epruvete, koja je konzolno stegnuta u fiksator, treba postaviti teg određene mase, te je stoga neophodno odrediti masu tega, i saglasno osmišljenom fiksatoru na kome je moguće stegnuti istovremeno 12 epruveta, treba izraditi za svaku epruvetu teg iste mase.

Variran je veliki broj mogućih oblika epruveta saglasno načinu učvršćivanja u fiksator. Za stezanje epruveta sa fiksatorom razmatrane su dve varijante. Prva varijanta je stezna veza svake epruvete pojedinačno sa zavrtanjskom vezom za fiksator, i druga varijanta stezna veza svih epruveta postavljenih u posebno oblikovane žlebove fiksatora ostvarena pritiskom pločom, a pritisna ploča grupnom zavrtanjskom vezom povezana sa fiksatorom.

Konačna odluka izbora načina stezanja epruveta je bila druga varijanta, stezni spoj ostvaren pritiskom pločom.

Usvojeni oblik i dimenzije epruvete je dat na slici 3.42. Debljina epruvete odgovara debljini zavarenih uzoraka – 6 mm. Na 15 mm od slobodnog kraja epruvete je otvor prečnika 5,5mm za postavljanje tega. Sredina zavara je na 50 mm od centra tega.



Slika 3.42. Oblik i dimenzije epruvete

Epruvete su izrađene na numeričkoj glodalici poprečno u odnosu na zavareni spoj. Jedan set izrađenih epruveta je dat na slici 3.43.

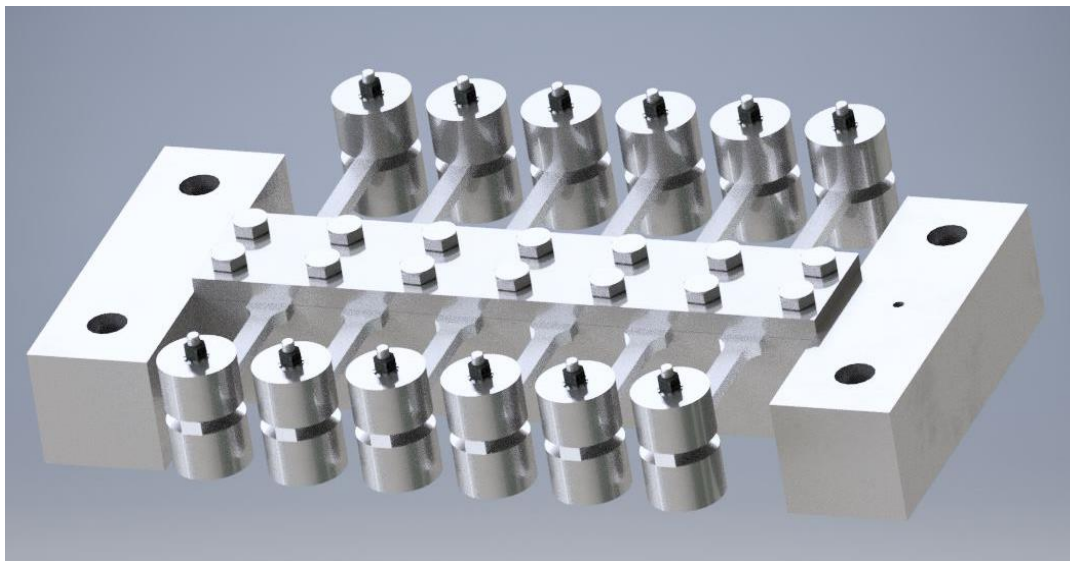


Slika 3.43. Set izrađenih epruveta [117]

Fiksator predstavlja interfejs između vibracione mašine - šejkera i epruveta koje služe za određivanje dinamičke izdržljivosti zavarenog spoja. Fiksator je proširenje armature test mašine u obliku vrlo krute strukture koja može preneti potrebnu silu na željenu frekvenciju.

Fiksator se učvršćuje zavrtnajskom vezom za sto šejkera. Sto šejkera ima u određenom rasporedu već pripremljene rupe sa navojem koje služe za fiksiranje dela koji se testira. Razvijeni fiksator za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ima otvore za fiksiranje koji su prilagođeni rasporedu rupa stola šejkera.

Naleganje glave epruveta i žlebovi fiksatora je mali preklop. Radionička dokumentacija nosača epruveta – fiksatora je data u prilogu C (slika P.C.1), a pritisne ploče za ostvarivanje steznog spoja je data u prilogu C (slika P.C.2). Fiksator i pritisna ploča su urađeni od čelika S275 JR (Č1530). Na slici 3.44 dat je virtuelni model sklopa fiksatora i 12 epruveta opterećenih tegovima.

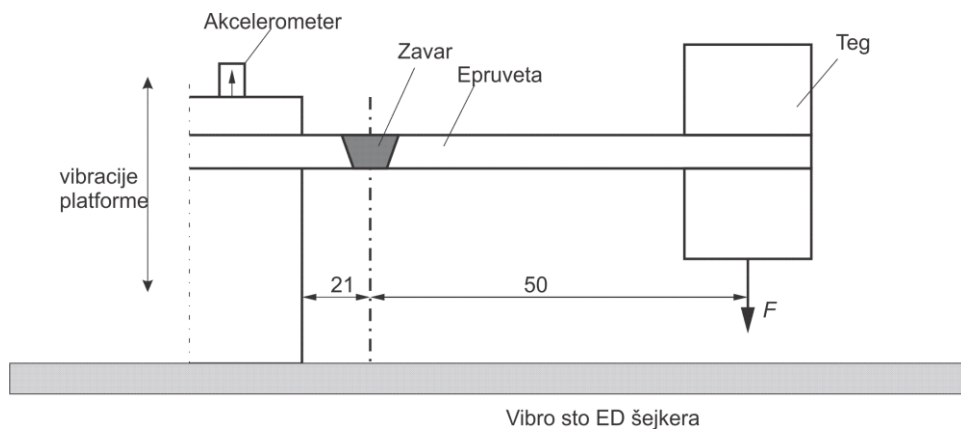


Slika 3.44. Virtualni model sklopa fiksatora i epruveta opterećenih tegovima [118, 119]

Različitim masama tegova se ostvaruju željena naponska stanja u zavaru epruvete. Kako istovremeno može da se ispituje do 12 epruveta, bitan preduslov realizacije eksperimenta ja da svi tegovi, za taj slučaj opterećenja budu istih dimenzija odnosno istih masa. Svi tegovi, zbog jednobraznosti su brušeni. Mase 6 različitih izrađenih tegova su 1-118 g, 2-107 g, 3-188 g, 4-244 g, 5-314g i 933g [118]. Tegovi su sastavljeni iz dva dela spojena zavrtanjskom vezom.

Konačna usvojena varijanta je teg mase 933g saglasno mogućnostima elektro-dinamičkog šejkera.

Šematski prikaz stegnute epruvete u fiksatoru sa tegom na slobodnom kraju je data na slici 3.45.



Slika 3.45. Šematski prikaz fiksirane epruvete opterećena tegom mase 933g [119]

Za definisanje eksperimentalnog istraživanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva primenom elektrodinamičkog vibracionog stola neophodno je odrediti frekvencije sopstvenih modova oscilovanja i oblike oscilovanja epruvete sa tegom. Određivanje sopstvenih frekvencija oscilovanja je veoma važno zbog mogućeg rezonantnog stanja sistema koje nastaje kada se poklope prirodne frekvencije oscilovanja i prinudne frekvencije oscilovanja.

Modovi oscilovanja i napon na mestu zavarenog spoja može da se dobije numeričkim i uprošćenim analitičkim postupkom.

3.8.2.1. Uprošćeni analitički proračun napona u zavarenom spoju epruvete

Sopstvene frekvencije se određuju iz modela oscilovanja bez delova spoljašnjeg opterećenja. Jednačina oscilovanja se može napisati u obliku [115]:

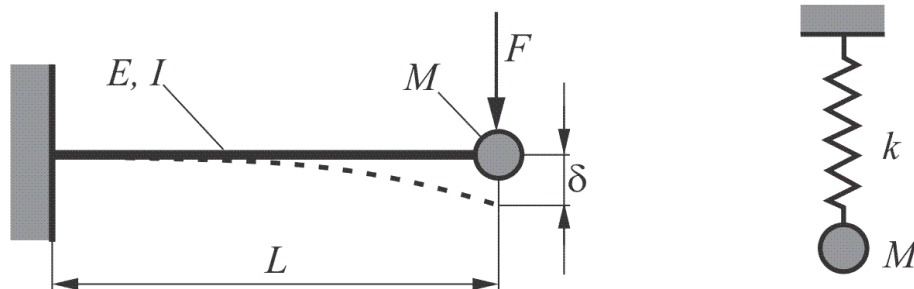
$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.48)$$

Sopstvena frekvencija epruvete konzolno učvršćene sa masom na kraju se određuje izrazom [114]:

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.49)$$

gde je: k – krutost.

Na slici 3.46 prikazana je oscilatorni model konzolno učvršćene epruvete opterećene tegom mase m , koji čini materijalna tačka mase M , spojena elastičnim štapom zanemarive mase, koji je konzolno učvršćen. Posmatraju se oscilacije materijalne tačke upravno na smer ose štapa konzolno učvršćenog.



Slika 3.46. Oscilatorni model epruvete opterećene tegom

Ako se elastična konzola zameni oprugom ekvivalentne krutosti, onda u skladu sa definicijom krutosti, sila kojom treba opteretiti konzolu na vrhu, uzimajući samo uticaj savijanja na pomeranje δ :

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3E \cdot I} = \frac{F}{k} \quad (3.50)$$

Krutost konzole k opterećene masom na kraju iznosi:

$$k = \frac{3E \cdot I}{L^3} \quad (3.51)$$

da bi ugib imao jediničnu veličinu

gde je: δ – ugib,

E – modul elastičnosti materijala konzole (epruvete),

I – moment inercije poprečnog preseka konzole (epruvete),

L – krak na kome deluje sila od mesta uklještenja (fiksiranja epruvete).

Na osnovu (3.50), određuje se sila na određenom mestu epruvete:

$$F = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{L^3} \quad (3.52)$$

Sopstvena kružna frekvencija konzole (epruvete) sa masom m na kraju:

$$\omega_v = \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot m}} \quad (3.53)$$

Za epruvetu od legure aluminijuma AA 2024 T351, modula elastičnosti $E=73100$ MPa, dimenzija epruvete $b \times h=8 \times 6$ mm sa masom $m=933$ g udaljenom od mesta uklještenja $L_{epr}=71$ mm dobija sopstvena frekvencija prvog moda oscilovanja $\omega_v=48,94$ Hz.

Prinudne vibracije

Pretpostavka je da platforma elektro-dinamičkog vibracionog stola vibrira po zakonu:

$$\delta = \delta_m \cdot \sin \omega_p \cdot t \quad (3.54)$$

gde je:

δ – trenutni položaj platforme

δ_m – amplituda platforme

ω_p – kružna frekvencija platforme

t – vreme

Jednačina ugiba epruvete može se napisati u obliku:

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = k \cdot \delta_m \cdot \sin \omega_p \cdot t \quad (3.55)$$

$$x_0 = A \cdot \sin \omega_v \cdot t + B \cdot \cos \omega_v \cdot t \quad (3.56)$$

$$x_{part} = x_m \cdot \sin \omega_p \cdot t \quad (3.57)$$

Opšte rešenje predstavlja vibracije koji će biti prigušene. Iz partikularnog rešenja dobija se izraz za amplitude vibracija x_m epruvete na mestu gde se nalazi središte težine tega.

$$x_m = \frac{\delta_m}{1 - (\omega_p / \omega_v)^2} \quad (3.58)$$

Stvarni ugib epruvete usled vibracija Δx jednak je razlici amplitude težišta tega x_m i amplitude platforme δ_m

$$\Delta x = x_m - \delta_m \quad (3.59)$$

Maksimalni ugib epruvete:

$$x_c = x_{stat} + \Delta x \quad (3.60)$$

Statički ugib epruvete x_{stat} usled težine tega $G=m \cdot g$:

$$x_{stat} = \frac{m \cdot g \cdot L_{epr}^3}{3E \cdot I} \quad (3.61)$$

Maksimalna sila:

$$F_{max} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot x_c}{L_{epr}^3} \quad (3.62)$$

Napon (na mestu zavora) σ_z se računa iz sledeće jednačine:

$$\sigma_z = \frac{F_{max} \cdot L_{zav} \cdot e}{I} \quad (3.63)$$

e – udaljenost od neutralne ose

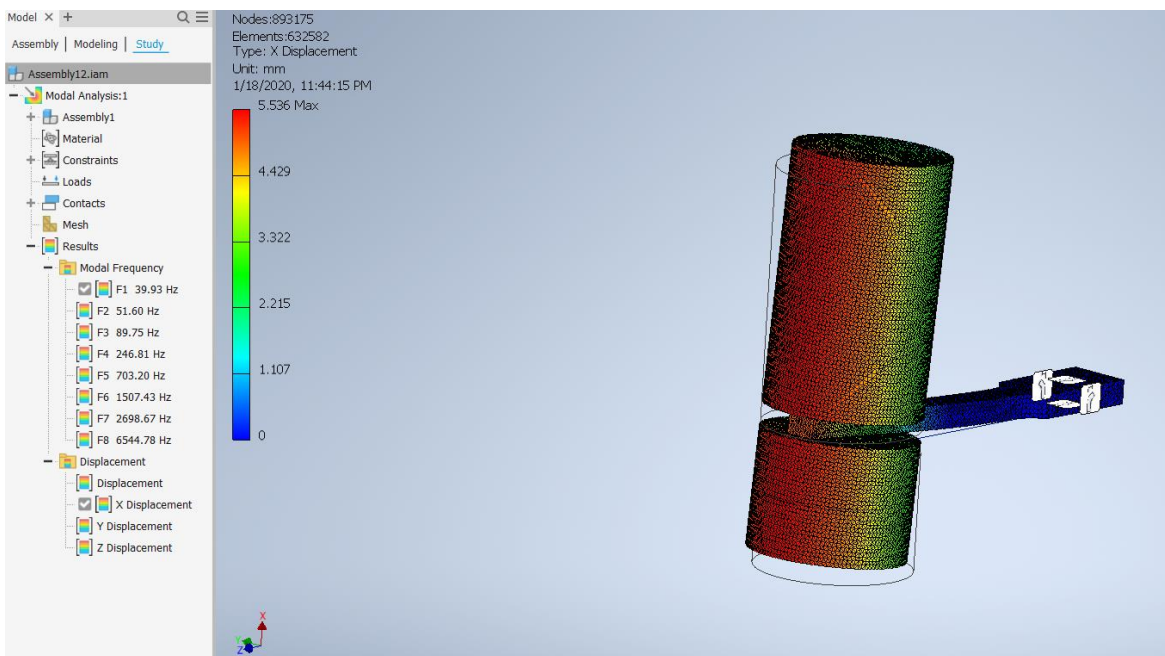
3.8.2.2. Numerička analiza napona u zavarenom spoju epruvete

CAD modeli fiksatora, stezne ploče, epruvete, tegova i zavrtnjeva, kai i sklop ovih modela koji čine neophodno okruženje za ispitivanje na zamaranje zavarenih spojeva je urađeno u integrisanom CAD/CAE okruženju Autodesk INVENTOR 2020. Izvršenom modalnom analizom u integrisanom CAD/CAE okruženju Autodesk INVENTOR 2020 [119], dobijeno je 8 sopstvenih modova oscilovanja koji su dati u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Sopstveni modovi oscilovanja dobijeni numeričkim putem u Hz

1. mod	2. mod	3. mod	4. mod	5. mod	6. mod	7. mod	8. mod
39,93	51,60	89,75	246,81	703,20	1507,43	2698,67	6544,78

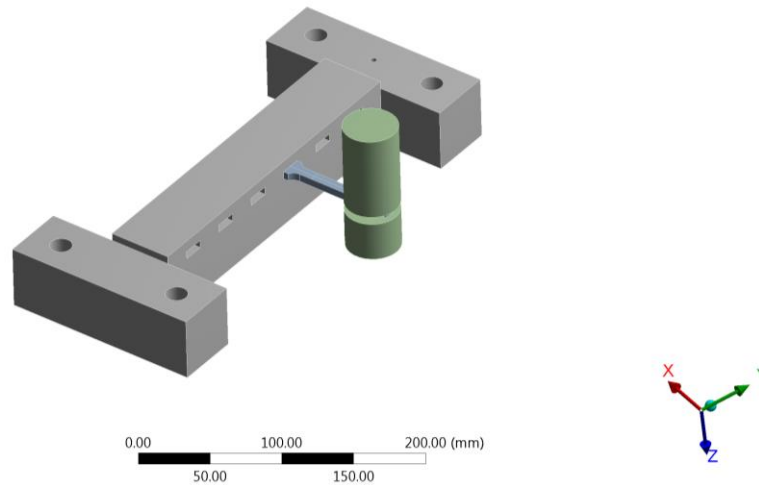
Na slici 3.47 je dat prvi oblik sopstvenih oscilacija epruvete opterećene tegom.



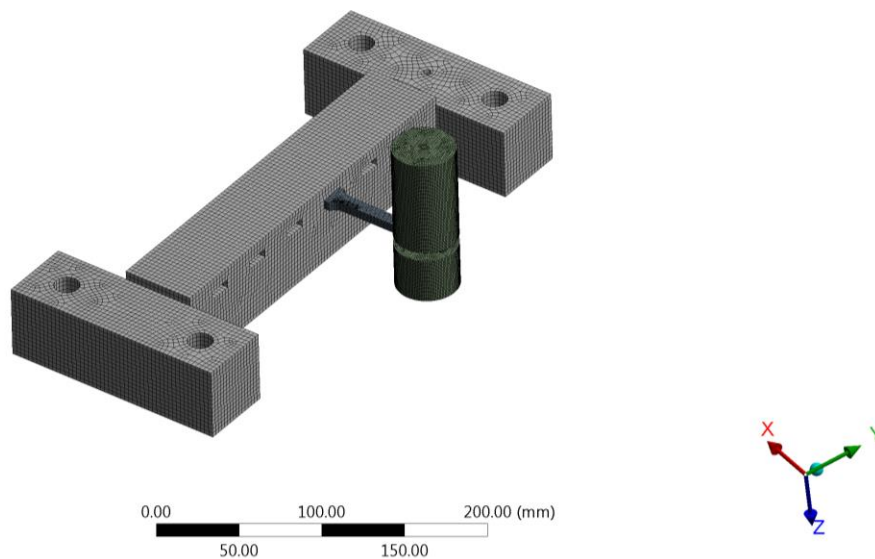
Slika 3.47. Prvi oblik sopstvenih oscilacija epruvete opterećene tegom

Da bi se definisali parametri ispitivanja izvršena je u FEA softveru ANSYS sekvencijalno uparena statička strukturalna, modalna i harmonijska analiza. Glavni cilj ovih analiza bio je određivanje naponskog stanja u zavarenom spoju epruvete pri različitim frekvencijama i definisanog pomeranja stola elektro-dinamičkog šejkera. Za ovu simulaciju pripremljeni su uprošćeni 3D geometrijski model sklopa fiksatora, epruveta, tegova i sklop su urađeni u softveru Autodesk Inventor. Na slici 3.48 dat je uprošćen geometrijski model jedne epruvete stegnute u fiksatoru, a na slici 3.49 dat je diskretizovan model. Geometrijski model sklopa fiksatora, epruvete i tege je transformisana u diskretizovani model (FE model) primenom napredne metode za automatsko generisanje mreže konačnih elemenata. Diskretizovani model ima 81395 konačnih elemenata sa 339822 čvorova.

I: 1
Solution
Frequency: 0. Hz
1/22/2020 1:45 PM



Slika 3.48. 3D model fiksatora sa 1 epruvtom



Slika 3.49. Diskretizovani model fiksatora sa 1 epruvtom

Kako se uprošćeni model sastojao od tri elementa: fiksatora, epruvete i tega, to je bilo potrebno definisati kontakte između navedenih elemenata. Postoje tri kontaktne površine, jedna između epruvete i fiksatora i dve između epruvete i gornjeg dela tega, odnosno epruvete i donjeg dela tega. Svi kontakti su definisani kao „zalepljeni“ spojevi („Bonded“ tip kontakta). „Bonded“ tip kontakta ne dozvoljava klizanje ili razdvajanje ivica i površina koji su u kontaktu.

Na slici 3.50 prikazan je simulacioni model sa definisanim ograničenjima, i opterećenjima sile zemljine teže, tj opterećenje usled sopstvene težine tega i pomeranje platforme elektro-dinamičkog vibracionog stola od 1 mm sa amplitudom od 0,5 mm.

B: Static Structural

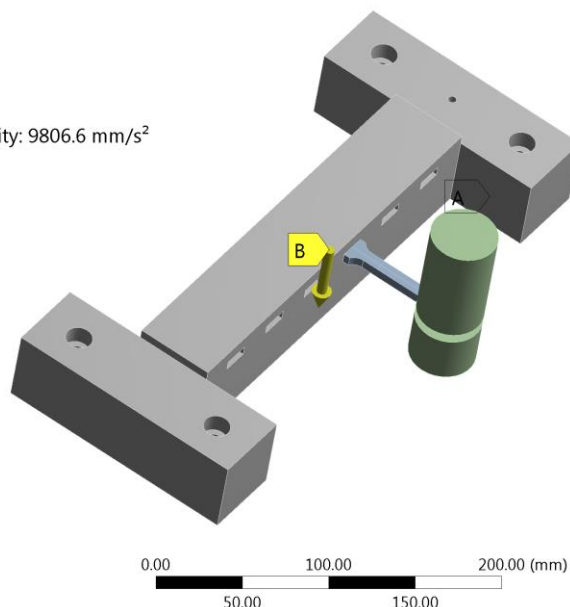
Static Structural

Time: 1. s

1/28/2020 8:43 AM

A Fixed Support

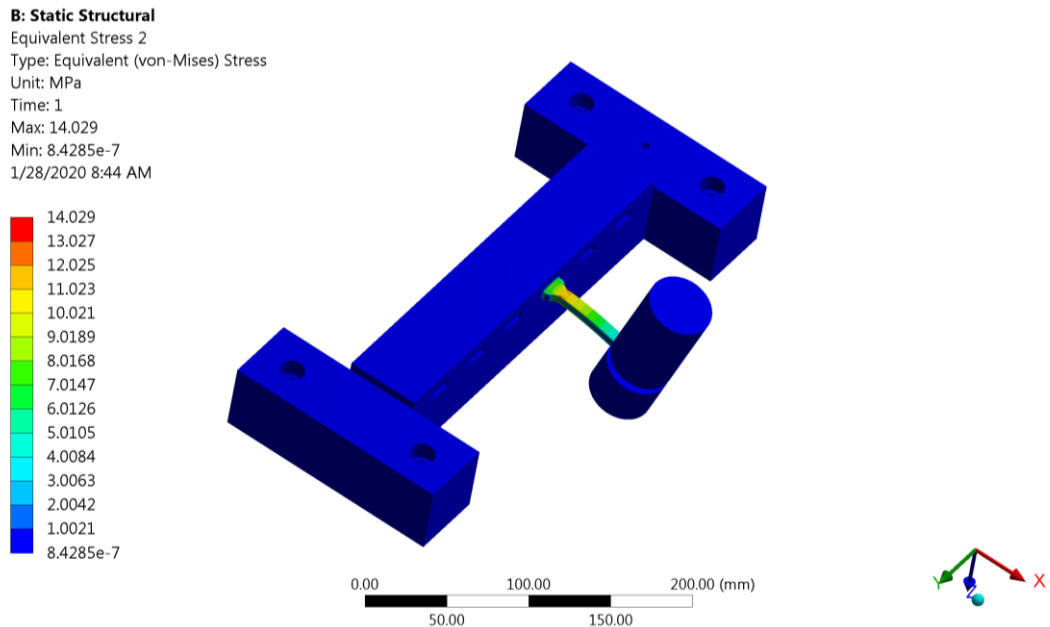
B Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²



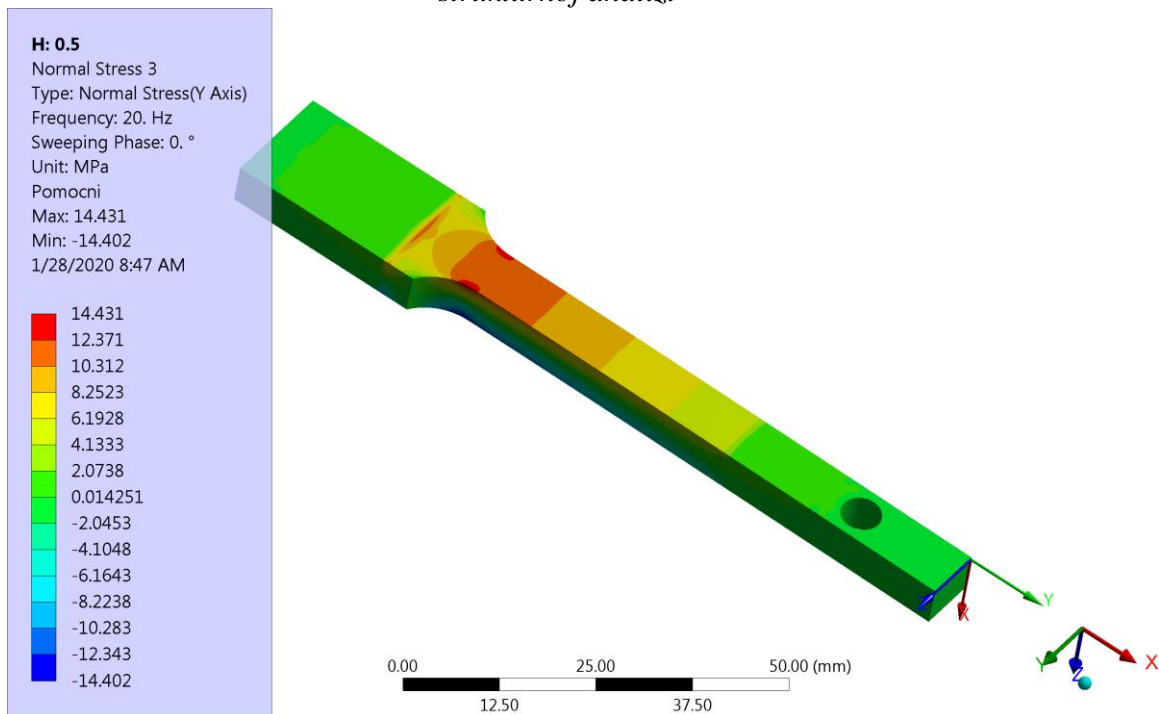
Slika 3.50. Definisano ograničenje i pomeranje platforme elektro-dinamičkog vibracionog stola

Potrebno vreme za rešavanje harmonijske analize po pomeranju iznosilo je 10min 38s, za rešavanje modalne analize po pomeranju 3min 52s, a za rešavanje statičke-strukturne analize 4min 42s.

Na slici 3.51. prikazana je raspodela Von Mises napona sklopa fiksatora, epruvete i tega, a na slici 3.52 raspodela normalnog napona epruvete.

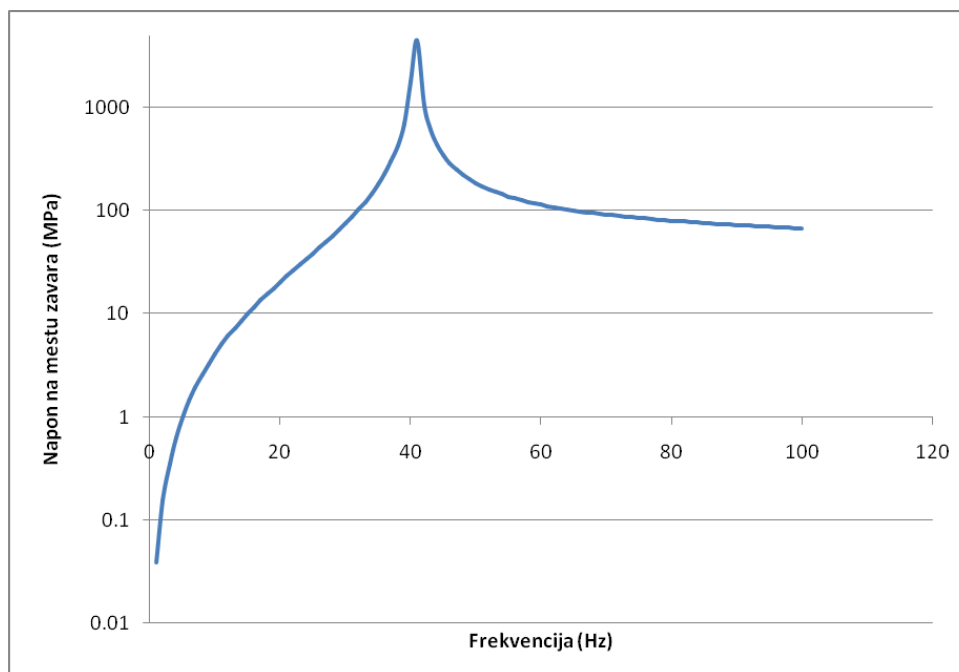


Slika 3.51. Raspodela Von Mises napona sklopa fiksatora, epruvete i tega pri statičkoj strukturnoj analizi



Slika 3.52. Raspodela normalnog napona epruvete pri oscilacijama frekvencije 20 Hz

Na osnovu rezultata numeričke simulacije na slici 3.53 dat je dijagram normalnih napona na sredini zavarenog spoja epruvete u zavisnosti od frekvencije vibracionog stola.



Slika 3.53. Dijagram normalnih napona na sredini zavarenog spoja u zavisnosti od frekvencije

Na bazi rezultata numeričke analize određivanja napona na mestu zavarenog spoja, definisano je eksperimentalno ispitivanje dinamičke izdržljivosti primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola. Izabrane su frekvencije oscilovanja vibracionog stola između 29 Hz i 34 Hz, koje su ispod sopstvene frekvencije prvog moda oscilovanja koja iznosi 39,93 Hz.

U tabeli 3.7 su za izabrane frekvencije ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva dati normalni naponi na sredini zavarenog spoja, određeni analitičkim putem (poglavlje 3.8.2.1) i numeričkom analizom.

Tabela 3.7. Definisana šema ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja (750/73; 750/116; 750/150)

Frekvencija ispitivanja Hz	Normalni napon u zavarenom spoju σ MPa	
	Analitički	Numerički
29	59,18	65,581
30,5	67,78	81,67
31	71	87,739
32	78,03	102,72
33	86	121,65
34	95,08	146,29

Može da se uoči razlika između normalnih napona na mestu zavarenog spoja dobijenih numeričkom analizom i analitičkim postupkom i do 30%, zbog toga što analitički postupak određivanja napona na mestu zavara ne uzima u obzir superpoziciju oscilacija sa približavanjem rezonantnom stanju i zato što se kod analitičkog postupka podrazumeva epruveta jednostavnog prizmatičnog oblika što nije u realnosti.

Svako ispitivanje počinje sa 3 fiksirane epruvete u nosaču epruveta sa tegovima istih masa 933 g sa zavarenim spojem ostvaren različitim parametrima zavarivanja. Na slici 3.54 dat je elektro-dinamički vibracioni sto sa fiksatorom i epruvetama u toku ispitivanja.



Slika 3.54. Elektro-dinamički vibracioni sto sa fiksatorom i istovremenom zamaranju 3 epruvete

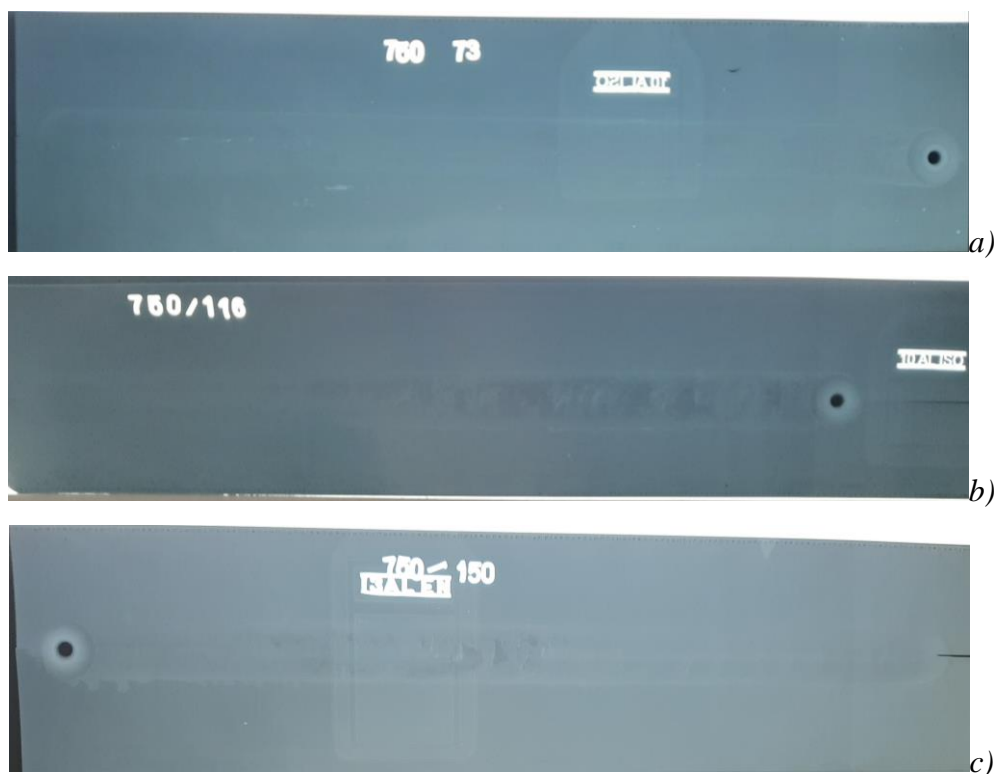
4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

4.1. VIZUELNO ISPITIVANJE

Vizuelno ispitivanje je sprovedeno 100% na svim zavarenim uzorcima. Ni na jednom zavarenom uzorku vizuelnom kontrolom, koja je obuhvatala i dimenzionu kontrolu, nisu ustanovljene nedopustive greške prema SRPS EN ISO 25239-5:2012 [103].

4.2. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

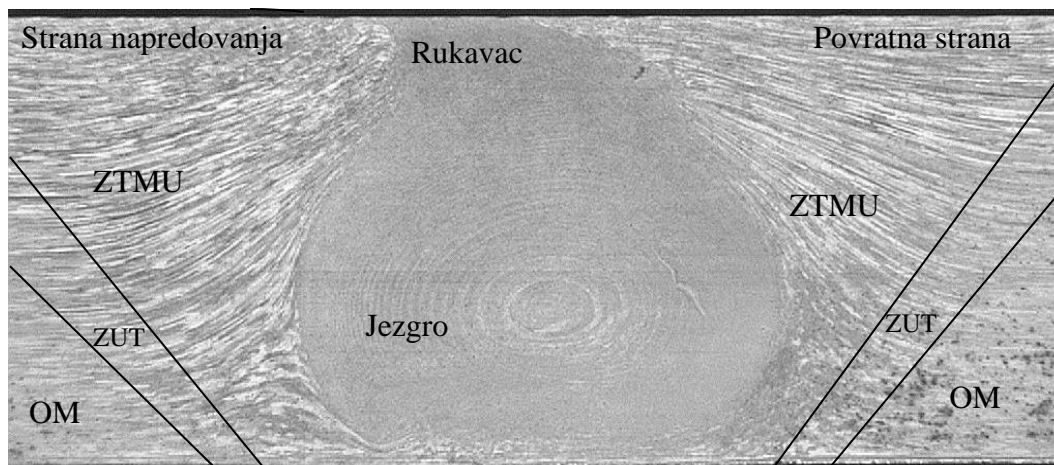
Radiografsko ispitivanje je sprovedeno na svim zavarenim uzorcima. Radiogrami su dati na slici 4.1,a-c. Ni na jednom zavarenom uzorku radiografskim ispitivanjem nisu ustanovljene greške u zavarenom spoju.



Slika 4.1. Rezultati radiografskog ispitivanja zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja a) 750/73; b) 750/116; c) 750/150

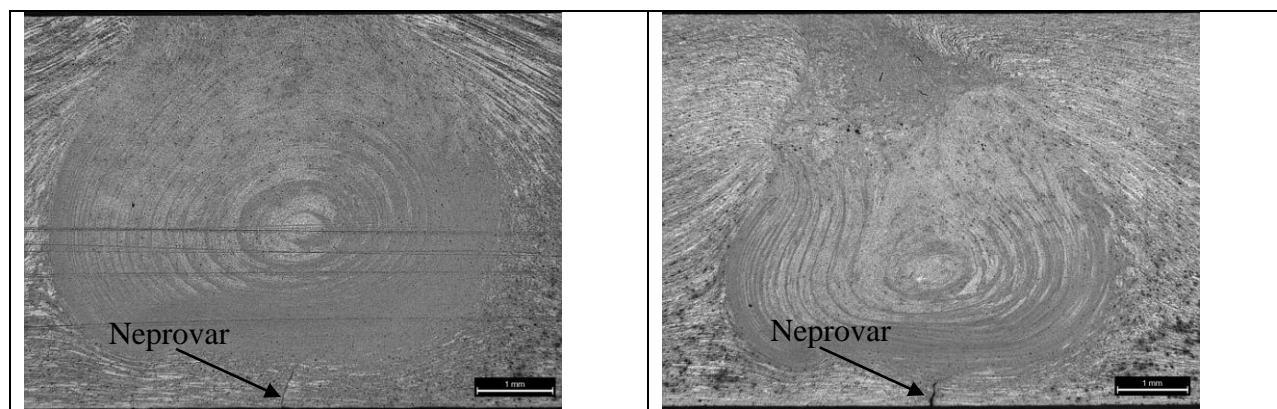
4.3. MAKROSTRUKTURA ZAVARENOG SPOJA

Tipičan makroskopski izgled poprečnog preseka zavarenih spojeva dat je na slici 4.2. Jasno se uočavaju karakteristične zone spoja, njihov položaj i oblik, kao što je jezgro, zona termomehaničkog uticaja ZTMU i rukavac.



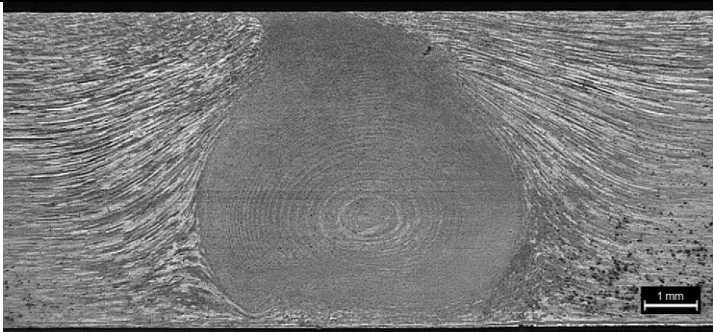
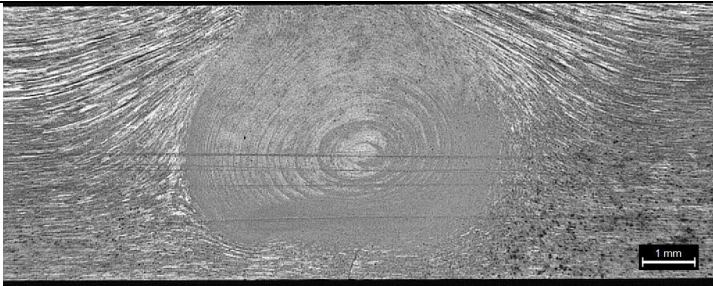
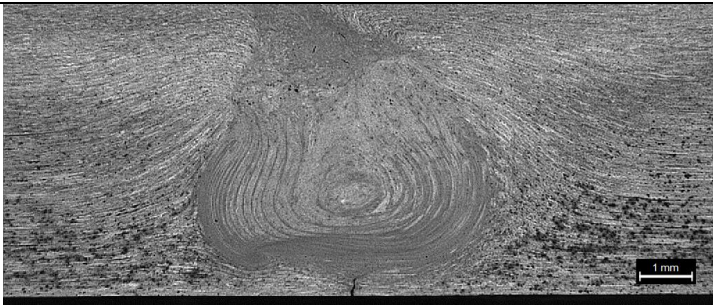
Slika 4.2. Makroskopski izgled poprečnog preseka zavarenih spojeva

Jasno izražene linije tečenja materijala ukazuju na karakter i smer toka materijala pri odvijanju procesa zavarivanja. Položaj, prostiranje i izraženost linija tečenja zavisi od količine unete energije, odnosno parametara zavarivanja. Metalografskom analizom potvrđeno je na uzorcima B-750/116 i C-750/150 postojanje skrivene greške u korenu zvara tipa neprovar (slika 4.3). Prisustvo greške je postalo uočljivo tek nakon jako intenzivnog nagrivanja uzorka. Ova greška nije bila karakteristična za druge epruvete neophodne za mehanička ispitivanja. Kako su uzorci za metalografska ispitivanja uzeti sa početka zavarenog uzorka, ova uočena greška se time objašnjava.



Slika 4.3. Skrivena greška tipa neprovar na korenoj strani spoja

Karakteristični makroskopski izgledi poprečnih preseka zavarenih spojeva dati su u odnosu na parametre zavarivanja, a prikazani su na slikama 4.4, a do 4.4, c. Uočava se da prostiranje linije tečenja u ZTMU kao i veličina i oblik jezgra zavise od parametara zavarivanja.

SN		PS	A-750/73 a)
SN		PS	B-750/116 b)
SN		PS	C-750/150 c)
SN – strana napredovanja; PS – povratna strana			

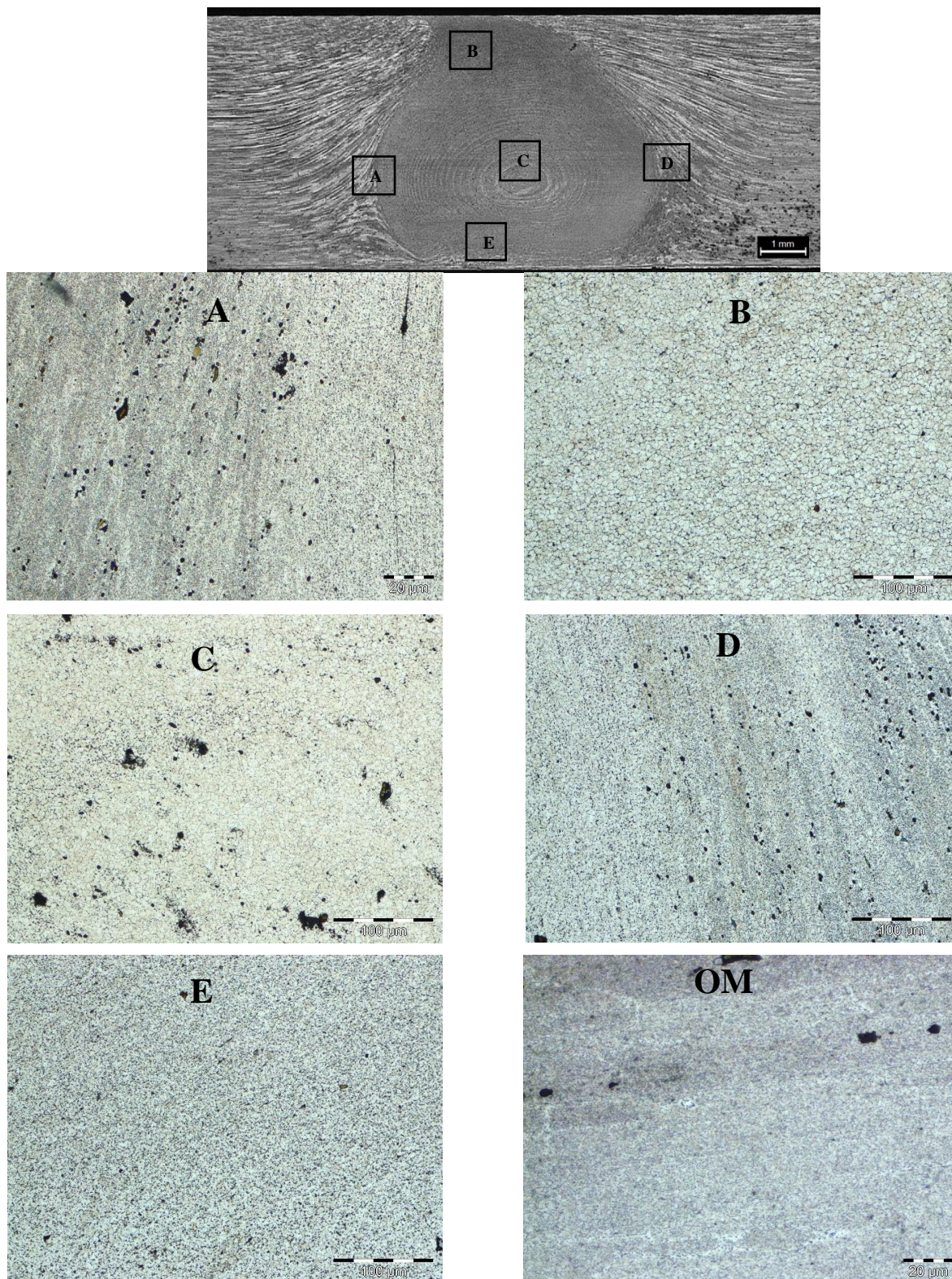
Slika 4.4. Makrostruktura poprečnih preseka spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja [98, 99, 121]

Upoređujući makrostrukture poprečnih preseka zavarenih spojeva, veličina grumena je najveća za strukturu A-750/73, za koju je najmanja brzina zavarivanja ($v=73$ mm/min), zbog najveće količine generisane toplote.

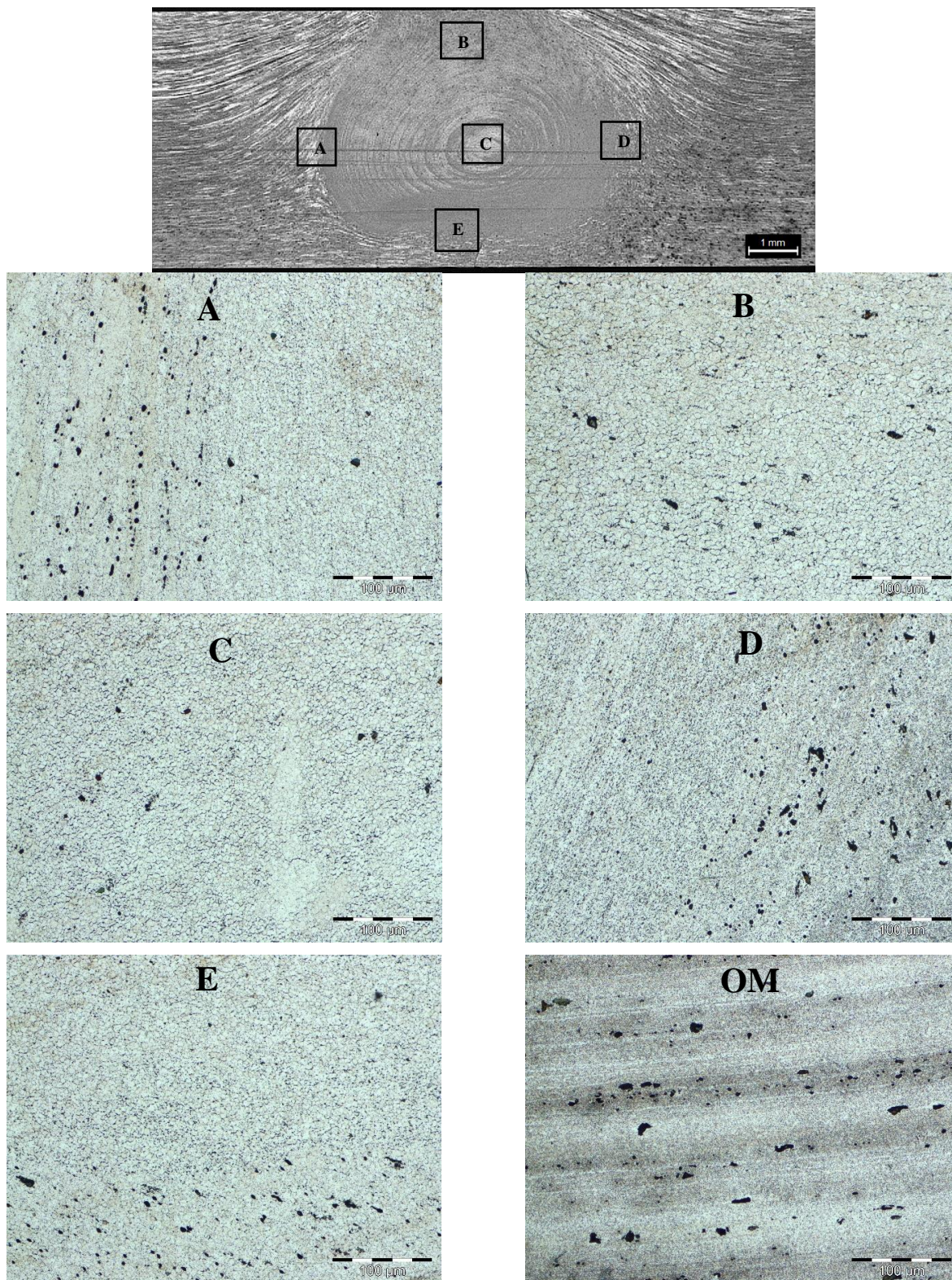
4.4. MIKROSTRUKTURA ZAVARENOG SPOJA

Izgled mikrostrukture u različitim oblastima zavarenog spoja legure 2024-T351 prikazana je na slikama 4.5 do 4.7.

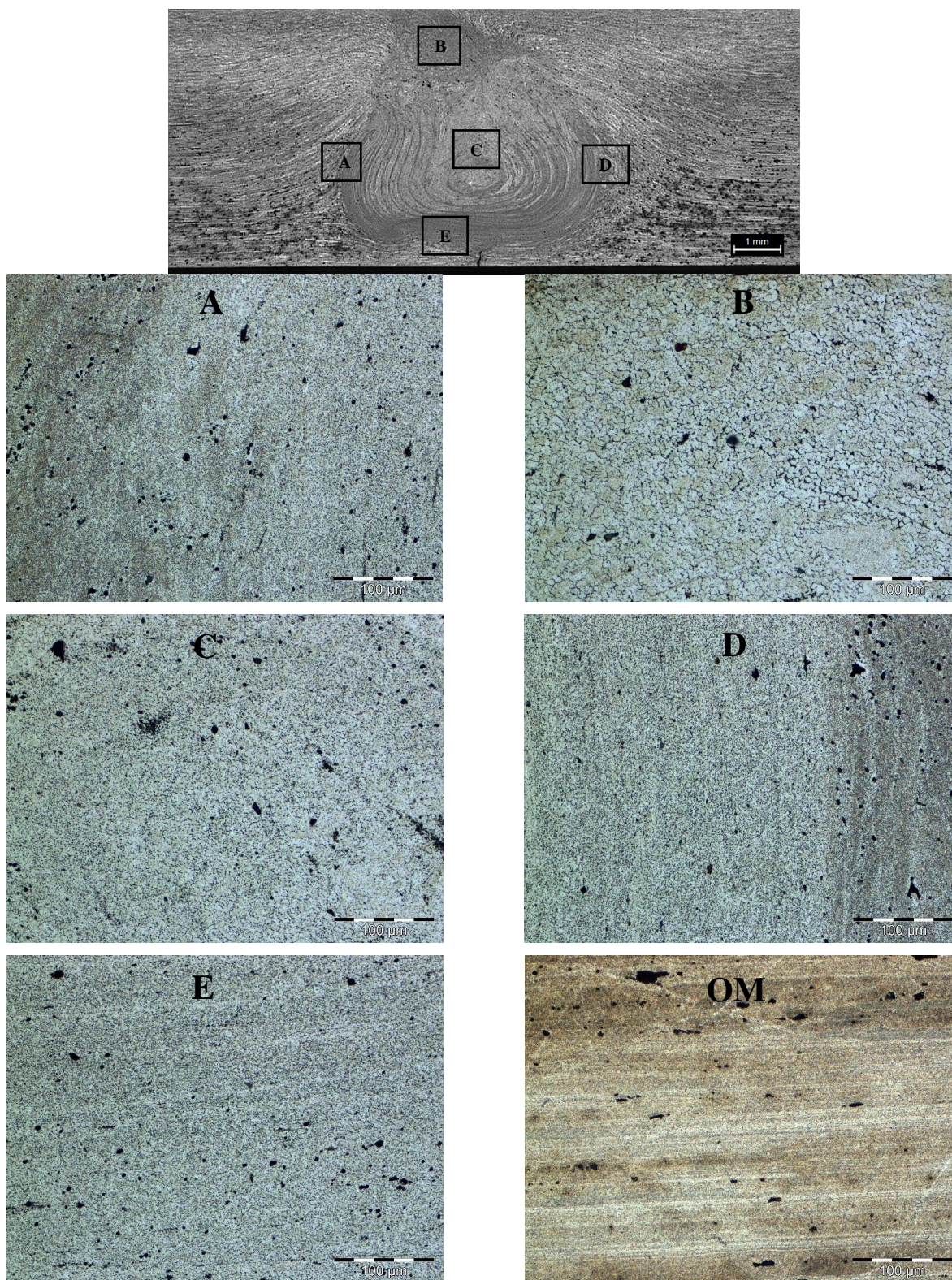
U strukturi zavarenog spoja se zapaža velika nehomogenost. Zrna su različitog oblika, od ravnoosnih do jako izduženih. U osnovnom materijalu, kao posledica prethodno sprovedenog procesa valjanja struktura se sastoji od izduženih zrna.



Slika 4.5. Mikrostruktura zavarenog spoja A- 750/73: A - granica jezgro-ZTMU na strani napredovanja; D - granica jezgro-ZTMU na povratnoj strani; C - oblast jezgra; B, E - granica jezgro-ZTMU sa gornje i donje strane; OM osnovni metal



Slika 4.6. Mikrostruktura zavarenog spoja B-750/116: A - granica jezgro-ZTMU na strani napredovanja; D - granica jezgro-ZTMU na povratnoj strani; C - oblast jezgra; B, E - granica jezgro-ZTMU sa gornje i donje strane; OM osnovni metal.



Slika 4.7. Mikrostruktura zavarenog spoja C- 750/150: A - granica jezgro-ZTMU na strani napredovanja; D - granica jezgro-ZTMU na povratnoj strani; C - oblast jezgra; B, E - granica jezgro-ZTMU sa gornje i donje strane; OM osnovni metal.

Oblast ZUT-a je slabo izražena i ne može se jasno odrediti. U različitim oblastima spoja zone termomehaničkog uticaja ZTMU, dobijena su zrna različite veličine zrna i orijentacije, dok je struktura u grumenu (zona mešanje) veoma sitnozrna. Mikrostrukturu jezgra karakterišu, veoma sitna, ravnoosna zrna (Slike 4.5-C, 4.6-C i 4.7-C), što se pripisuje dinamičkoj rekristalizaciji.

Na slikama 4.5, 4.6 i 4.7 su date mikrostrukture ZTMU, neposredno uz grumen, u različitim pozicijama zavarenog spoja. Na slikama 4.5-A, 4.6-A, i 4.7-A, data je mikrostruktura kojom je obuhvaćena zona jezgra i ZTMU na strani napredovanja. Jasno se uočava granica ove dve zone jer se nije dogodila rekristalizacija. Zrna se smanjuju prema regionu jezgra menjajući orijentaciju usled toplotnog uticaja koji neposredno zavisi od parametara i pravca zavarivanja. U ZTMU se uočava značajan broj tamnih tačkica, a to je talog u materijalu.

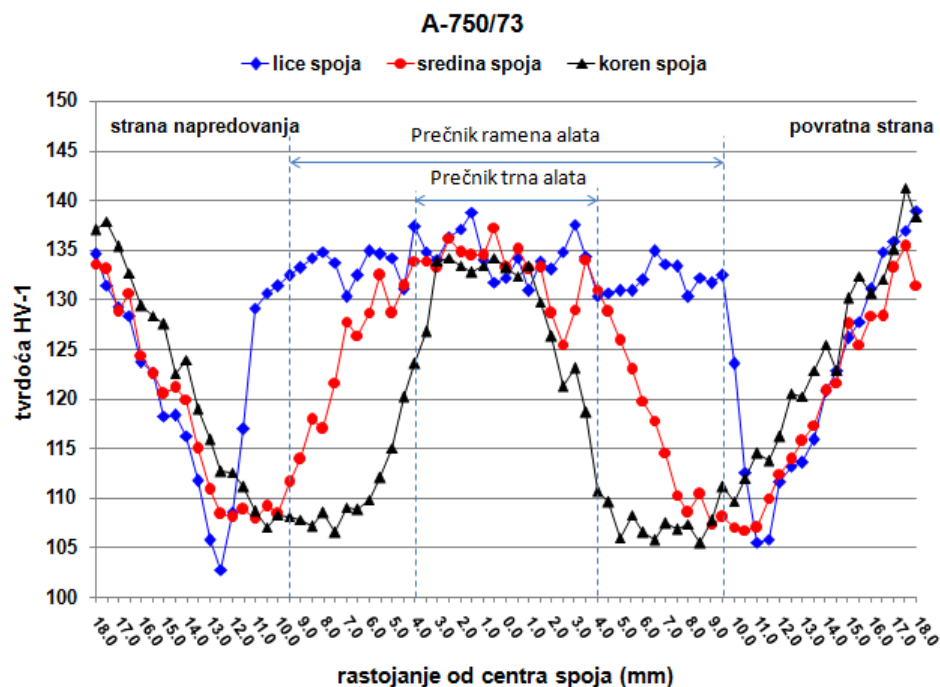
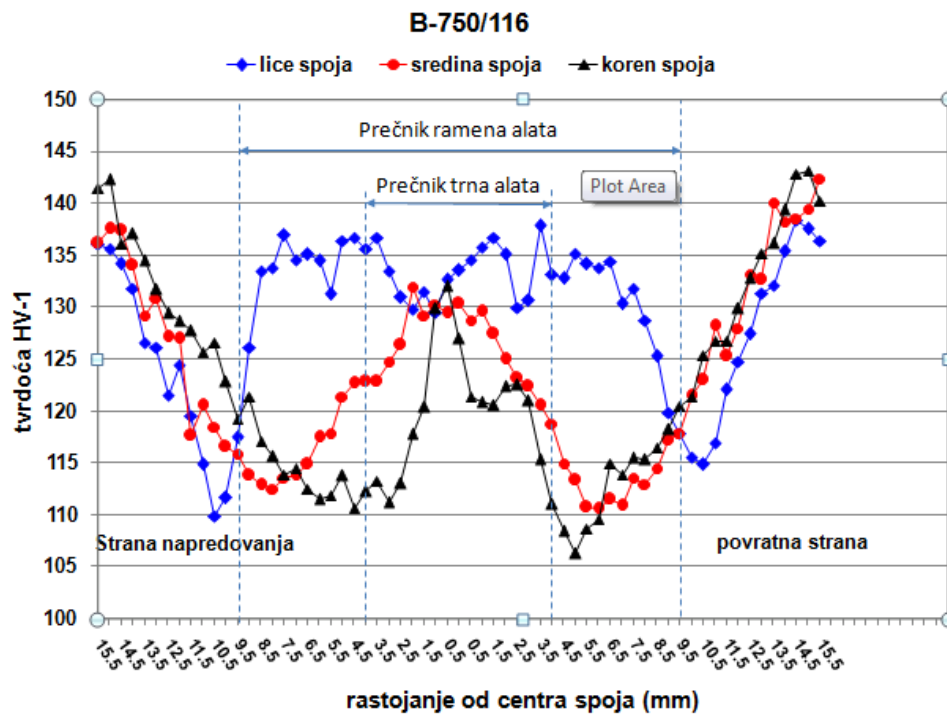
Sa druge strane, na povratnoj strani strukture zavarenog spoja, prilično je nejasna granica između zone mešanja i zone termomehaničkog uticaja (slika 4.5-D, 4.6-D, i 4.7-D).

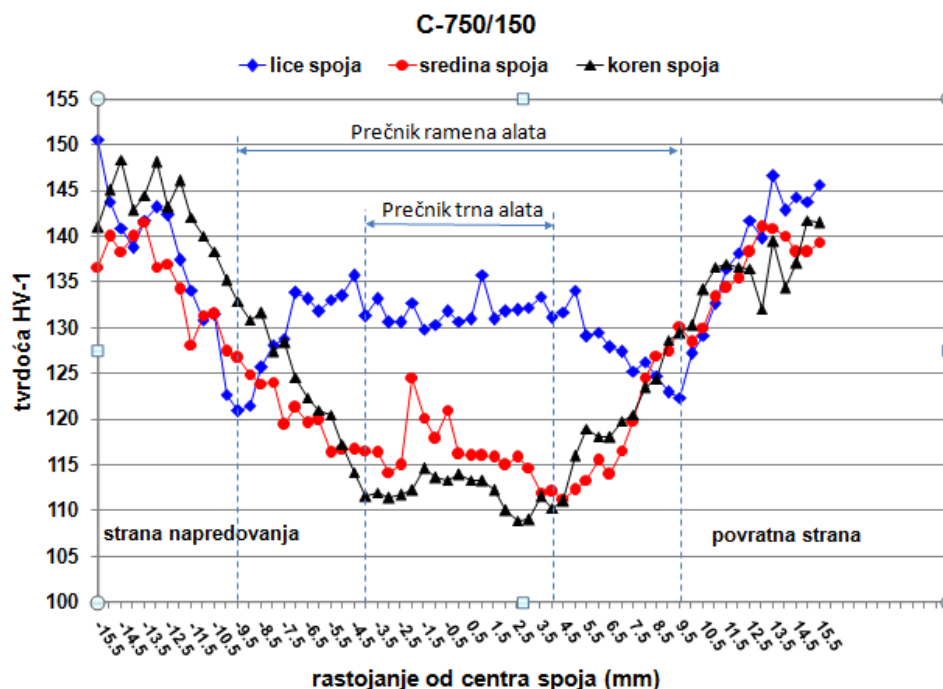
Slika 4.5-E, 4.6-E, i 4.7-E predstavlja mikrostrukturu na dnu zavarenog spoja. Sadrži dve različite mikrostrukture. Prva struktura je od finoznaste regije na gornjoj strani usled delovanja trna, a druga na donjoj strani, je izdužena mikrostruktura koja odgovara mikrostrukтури OM.

U zoni iznad jezgra (slika 4.5-B, 4.6-B, i 4.7-B), neposredno ispod ramena alata, uočava se struktura sa krupnijim zrnom.

4.5. REZULTATI ISPITIVANJA TVRDOĆE

Sa aspekta dinamičkih karakteristika lakih konstrukcija od legure AA2024 T351 ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem, tvrdoća zavarenog spoja je važna karakteristika. Rezultati izmerenih tvrdoća zavarenog spoja su prikazani na slikama od 4.8.-4.10. Profil tvrdoća ispitivan je duž tri horizontalna pravca: lice zavara (1mm od lica spoja), sredina zavara (3 mm od lica spoja) i koren zavara (5 mm od lica spoja). Razmak između otisaka je iznosilo 0,5 mm.

Slika 4.8. Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima $750 \text{ min}^{-1}/73 \text{ mm/min}$ Slika 4.9. Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima $750 \text{ min}^{-1}/116 \text{ mm/min}$



Slika 4.10. Profil tvrdoće zavarenog spoja ostvarenog parametrima $750 \text{ min}^{-1}/150 \text{ mm/min}$

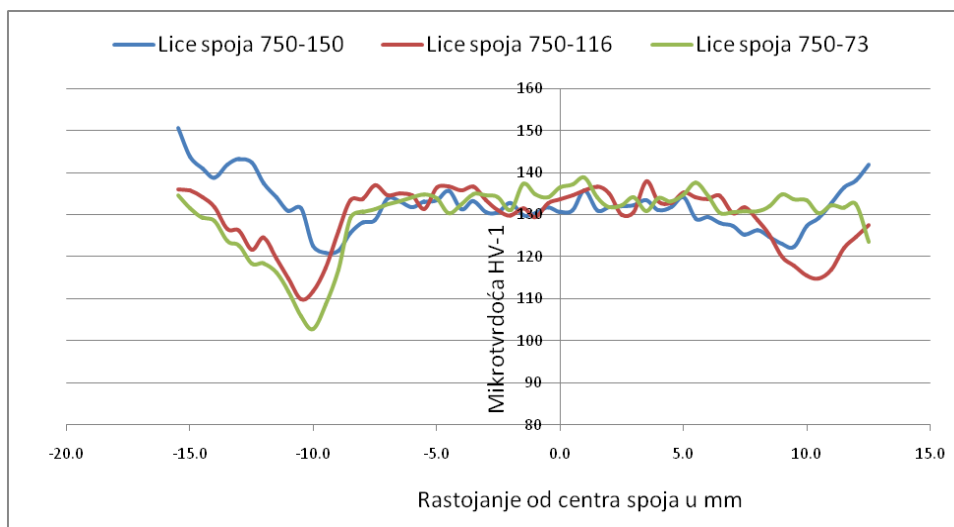
Povećanje brzine zavarivanja ima veliki uticaj na tvrdoću zone mešanja i zonu termomehaničkog uticaja, ali slabog uticaja na zonu uticaja toplote.

Mikro tvrdoća u zoni mešanja i zoni termomehaničkog uticaja opada sa porastom brzine zavarivanja. Omekšana zona termičkog uticaja (sa obe strane sredine zavarenog spoja) se lagano povećava sa povećanjem brzine zavarivanja (sa smanjenjem unete količine toplote).

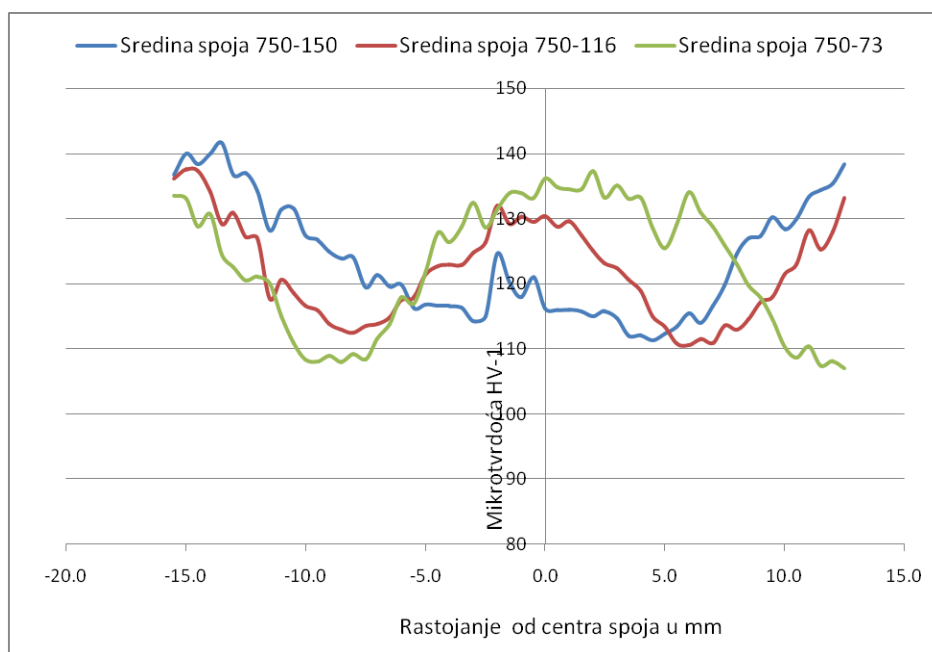
Iako je pri najmanjoj brzini zavarivanja (količina unete toplote najveća) veličina zrna u zoni mešanja najveća, tvrdoća se povećava kako se brzina zavarivanja smanjuje, bez obzira na grublje zrno u ZM. Ova tendencija sugerise da značajan porast tvrdoće sa smanjenjem brzine zavarivanja nije funkcija veličine zrna, već funkcija veličine i raspodele čestica druge faze i precipitata (taloga). Veličina zrna manje utiče na tvrdoću u zoni mešanja u poređenju sa drugim faktorima [122, 123].

Oko 16 mm od središnje linije zavarivanja, tvrdoća počinje opadati i postiže se minimalna vrednost na oko 10 mm, gde su neki precipitati (talog) mogli ogrubeti i izgubiti koherenciju zbog toplote. Iza te tačke, minimalne vrednosti tvrdoće, kako se približava liniji zavarivanja, vrednost tvrdoće ponovo se povećava i u zoni mešanja (za parametar zavarivanja 750/73) ima nešto manju tvrdoću od tvrdoće osnovnog metala (slika 4.11-4.13). To bi se moglo pripisati povećanju

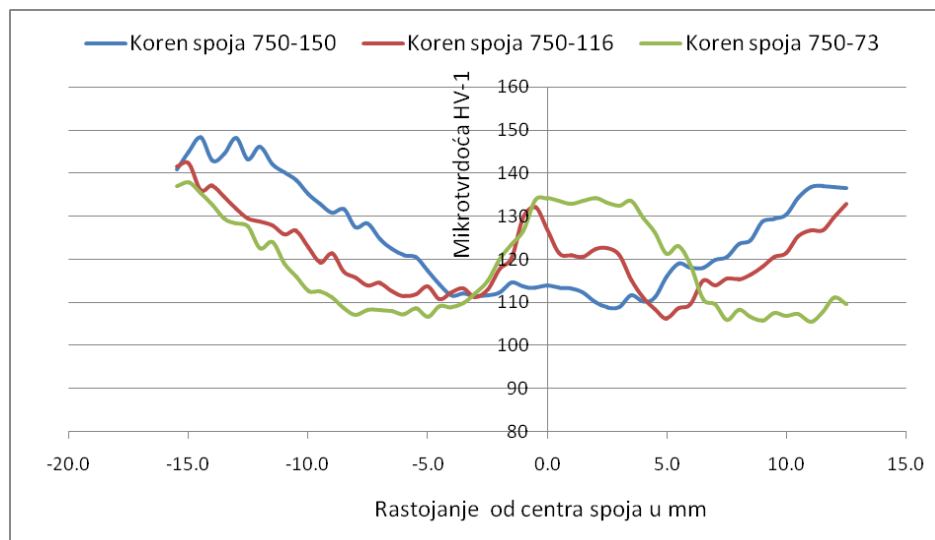
temperature koja može biti dovoljna da se veći precipitati (talog) otopi. Dakle, najmanja tvrdoća je locirana u ZTMU, tačnije u delu ZTMU neposredno uz liniju dodira ZTMU-ZM (jezgra).



Slika 4.11. Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na rastojanju 1 mm od lica spoja za različite parametre zavarivanja



Slika 4.12 Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na sredini spoja za različite parametre zavarivanja



Slika 4.13. Uporedni profil tvrdoće zavarenog spoja dobijen merenjem na rastojanju 1 mm od korena spoja za različite parametre zavarivanja

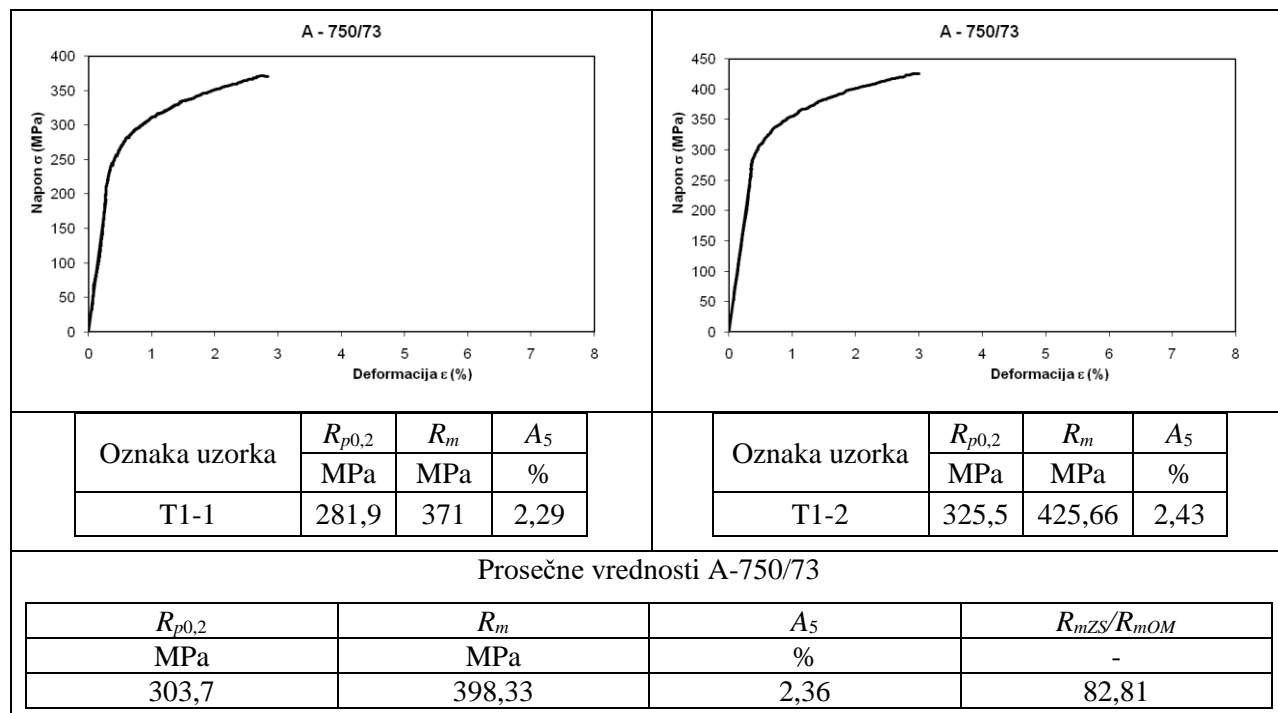
Na slici 4.11, na kojoj je profil tvrdoće dobijen merenjem na rastojanju 1 mm od lica spoja, može se uočiti da u zoni ispod ramena alata (ZTMU i ZM) za sve parametre zavarivanja je tvrdoća približno jednaka oko 135 HV.

Tvrdoća u zoni mešanja (jezgra) veoma zavisi od brzine zavarivanja (slika 4.12-4.13). Za slučaj najmanje brzine zavarivanja (najveći unos toplote [51, 52]) nivo tvrdoće u grumenu je najveći. Ovo se jasno vidi na profilu tvrdoće koji je dobijen merenjem u sredini spoja i korena zavara.

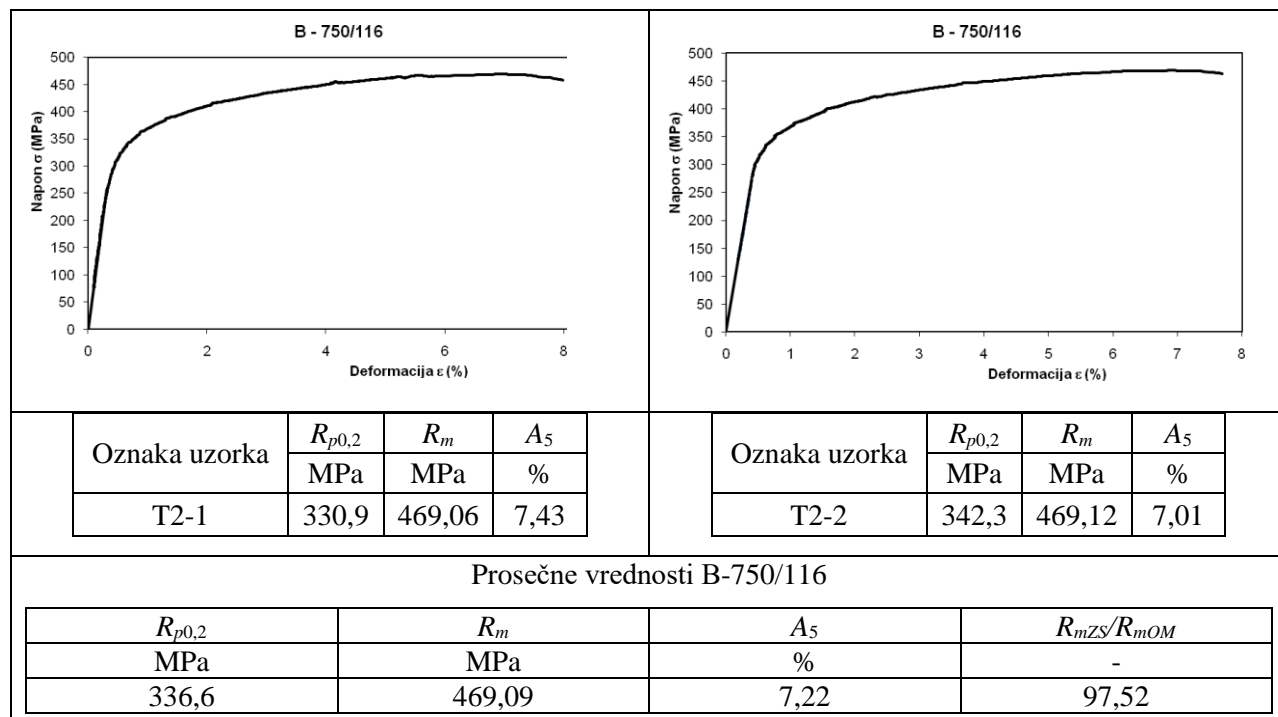
4.6. REZULTATI ISPITIVANJA ZATEZNIH SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA

Za ispitivanje zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja trenjem sa mešanjem, za svaki od parametara zavarivanja korišćene su po dve epruvete. Na slikama 4.14 do 4.16 dati su rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja u vidu dijagrama napon-izduženje, sa svojstvima granice tečenje $R_{p0,2}$, zatezne čvrstoće R_m i izduženje A_5 za svaku epruvetu i sračunate prosečne vrednosti ovih svojstava zavarenih spojeva.

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

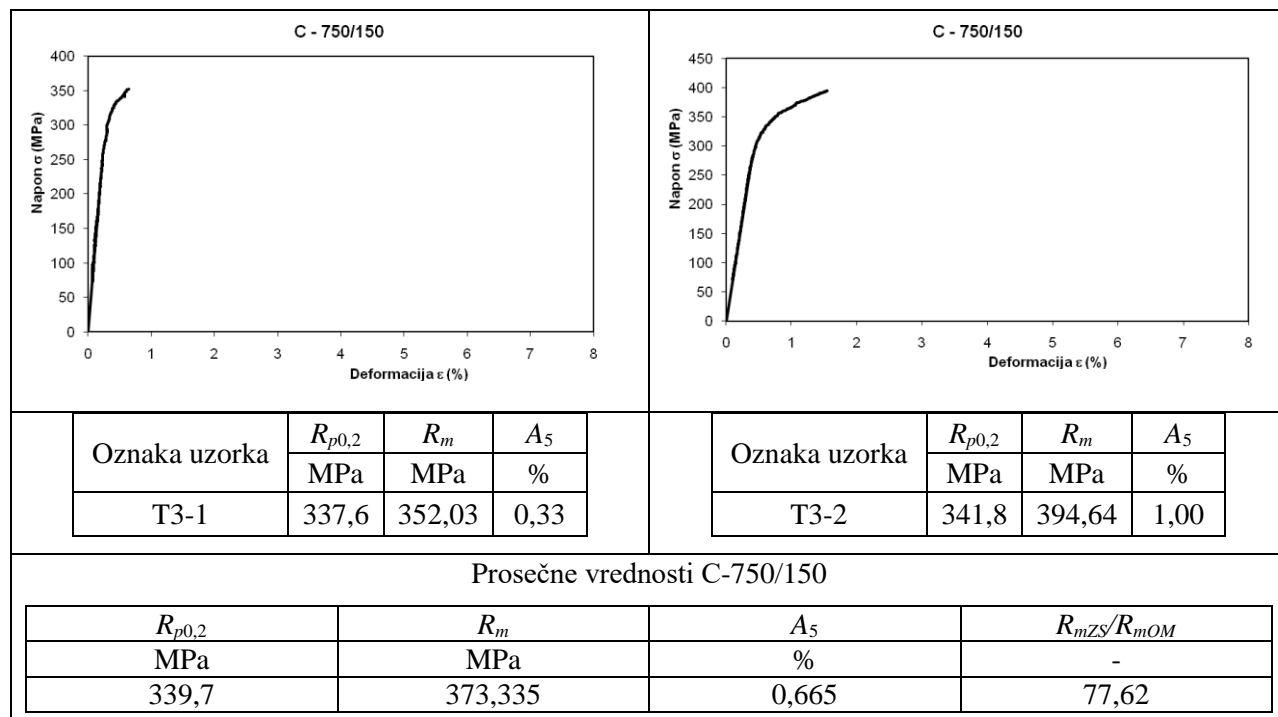


Slika 4.14. Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja A-750/73 [124]



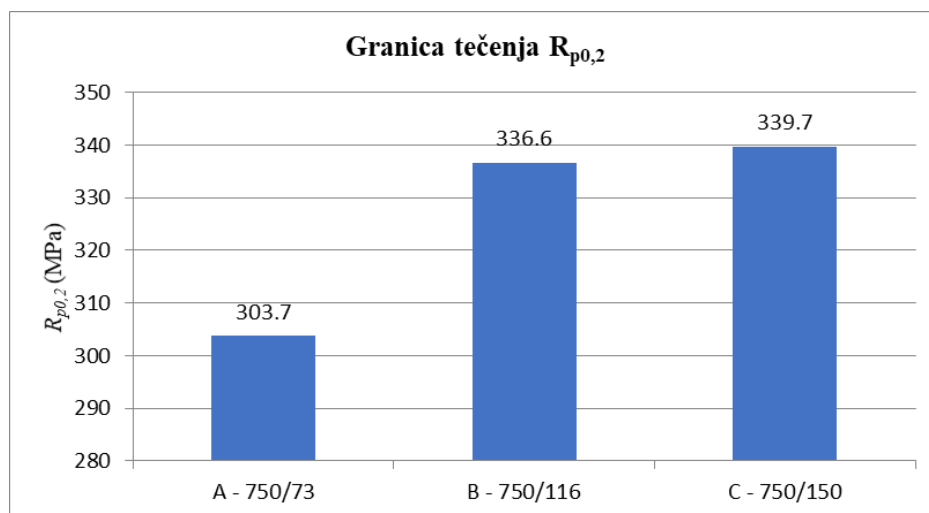
Slika 4.15. Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja B-750/116

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



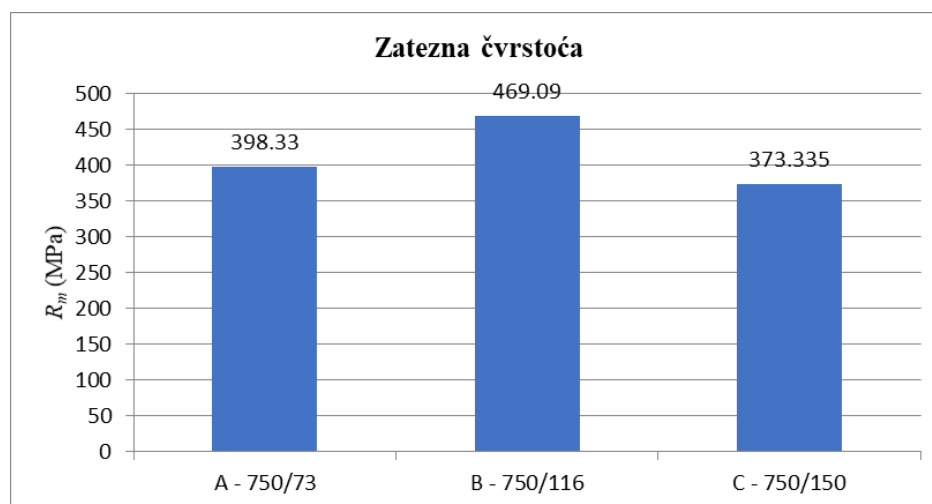
Slika 4.16. Rezultati ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja C-750/150

Za parametre zavarivanja A-750/73 i C-750/150 do prekida zateznih epruveta zavarenog spoja dolazi neposredno po dostizanju maksimalne sile, što je karakteristika krtih materijala. Saglasno tome, granica tečenja $R_{p0,2}$ zavarenog spoja C-750/150 je vrlo bliska zateznoj čvrstoći, a relativno izduženje $A_5=1\%$. Na slici 4.17 date su uporedne vrednosti granice tečenja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja. Najveću vrednost granice tečenja je kod zavarenog spoja C-750/150.



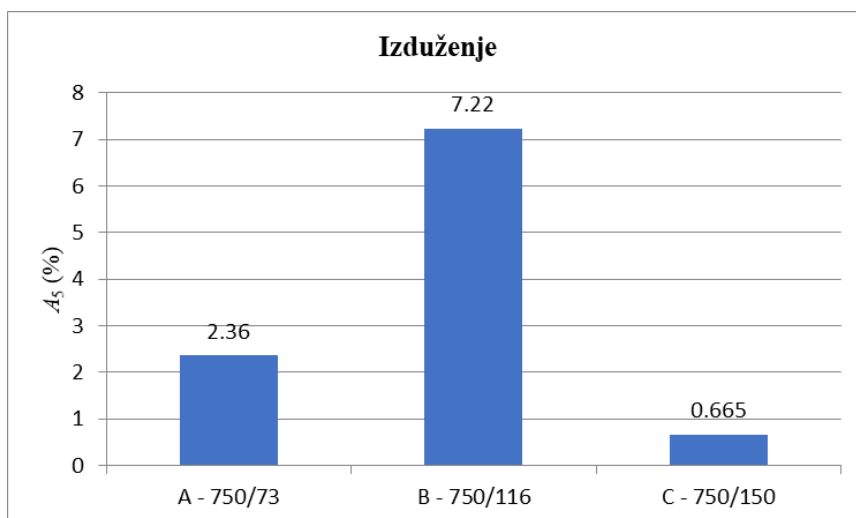
Slika 4.17. Srednje vrednosti granice tečenja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

Zavareni spoj B-750/116 ima dijagram napon - relativno izduženje koji odgovara dijagramima izduženja žilavih materijali. Najveću vrednost zatezne čvrstoće ima zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja B-750/116 (slika 4.18).



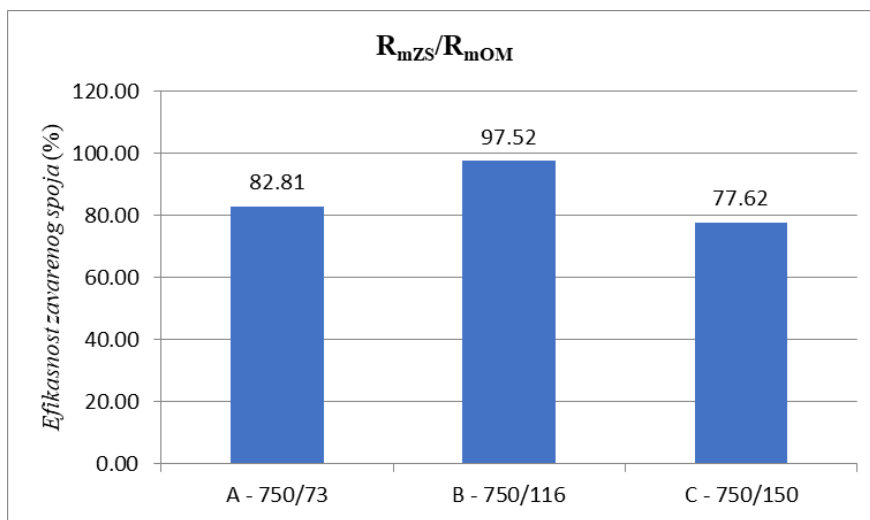
Slika 4.18. Srednje vrednosti zatezne čvrstoće za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

Relativno izduženje $A_5=7,22\%$, za parametar zavarivanja B-750/116 je znatno veće u odnosu na zavarene spojeve ostvarene parametrima zavarivanja A-750/73 i C-750/150. Na slici 4.19 date su uporedne vrednosti relativnog izduženja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja.



Slika 4.19. Srednje vrednosti relativnog izduženja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

Vrlo bitna karakteristika zavarenog spoja je efikasnost zavarenog spoja koja se definiše kao odnos zatezne čvrstoće zavarenog spoja i zatezne čvrstoće osnovnog metala R_{mZS}/R_{mOM} . Na slici 4.20 su date uporedne vrednosti ovog svojstva zavarenog spoja. Zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja B-750/116 ima najbolju efikasnost koja iznosi 97,52%, što je izuzetno visoka vrednost.



Slika 4.20. Srednje vrednosti efikasnosti zavarenog spoja za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

4.7. REZULTATI ISPITIVANJA SAVOJNIH SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA

Rezultati određivanja ugla savijanja nakon pojave prve prsline oko lica i korena šava i mesta preloma epruvete A-750/73 dati su u tabeli 4.2. U svim slučajevima je došlo do preloma

epruvete i to pri sili neznatno većoj od sile registrovane u trenutku pojave prsline. U tabeli 4.1 prikazan je tipičan izgled i lokacija prsline pri savijanju oko lica i korena. Pri savijanju oko lica je zabeležen manji ugao savijanja, a prelom se događao oko jezgra zavarenog spoja.

Tabela 4.1. Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete A-750/73

A – 750/73



Savijanje oko lica $\alpha=10,4^\circ$



Savijanje oko korena $\alpha=22,5^\circ$

Rezultati određivanja ugla savijanja nakon pojave prve prsline i tipičan izgled i lokacija prsline pri savijanju oko lica i korena šava i mesta preloma epruvete B-750/116 dati su u tabeli 4.2. Pri savijanju oko lica je zabeležen manji ugao savijanja nego u slučaju uzorka A-750/73, a prelom se takođe događao oko jezgra zavarenog spoja.

Tabela 4.2. Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete B-750/116

B-750/116



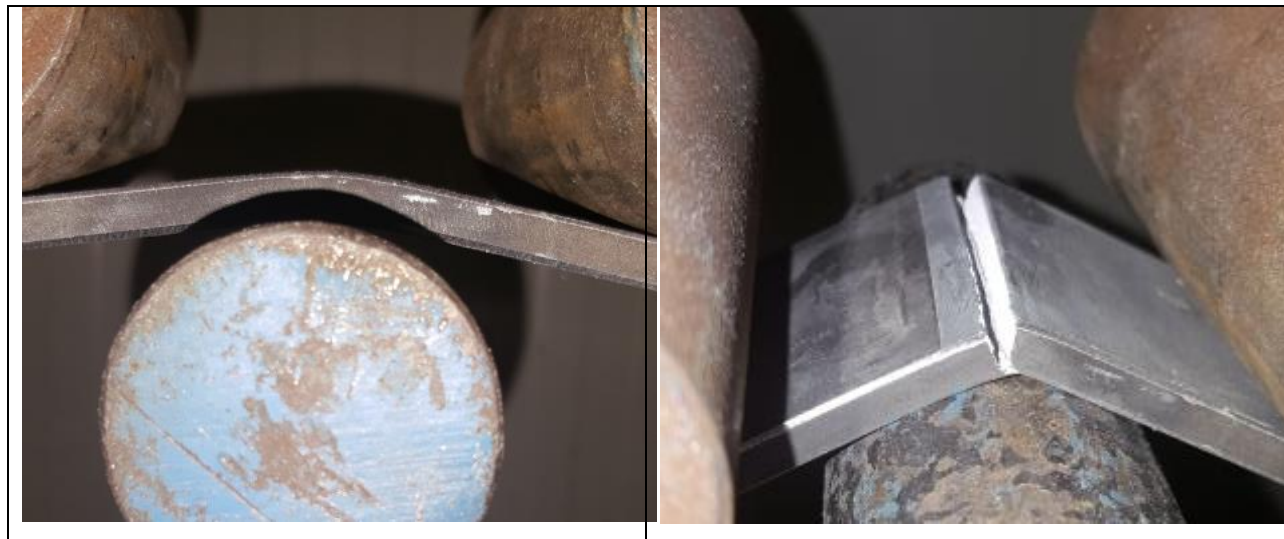
Savijanje oko lica $\alpha=9,8^\circ$



Savijanje oko korena $\alpha=40,1^\circ$

Rezultati određivanja ugla savijanja nakon pojave prve prsline i tipičan izgled i lokacija prsline pri savijanju oko lica i korena šava i mesta preloma epruvete C-750/150 dati su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Ugao savijanja oko lica i korena i izgled preloma epruvete C-750/150
C-750/150

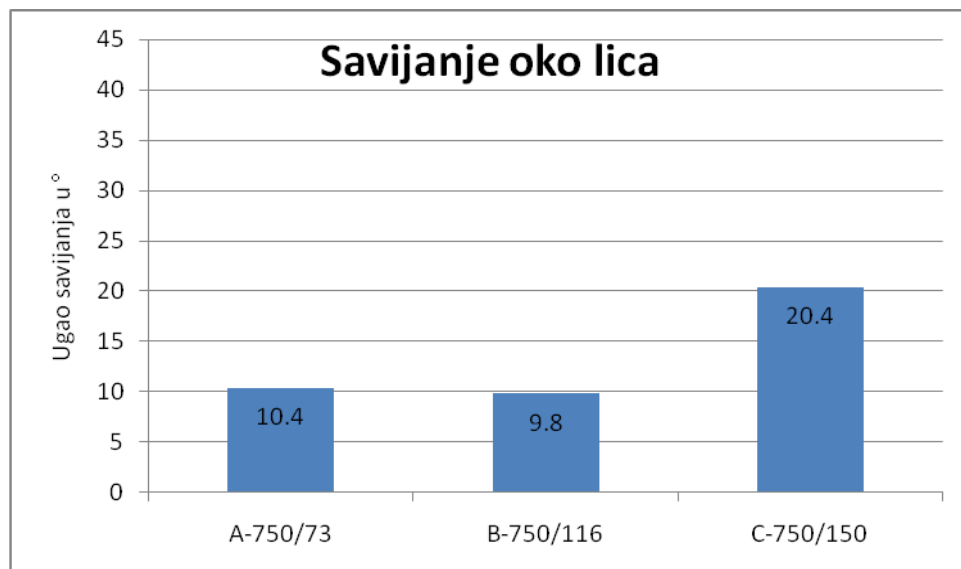


Savijanje oko lica $\alpha=20,4^\circ$



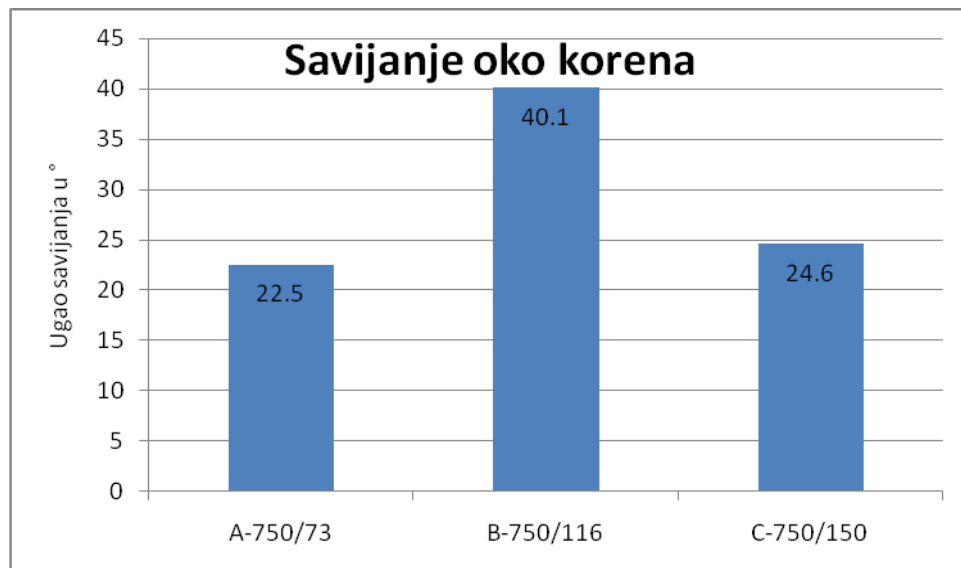
Savijanje oko korena $\alpha=24,6^\circ$

Ispitivanje savijanjem se sprovodi u cilju određivanja deformacionih sposobnosti zavarenog spoja. Rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva oko lica pokazuju veoma loše deformacione sposobnosti. Upoređujući zavarene uzorke, najbolja svojstva na savijanje oko lica imaju uzorci C-750/150 (slika 4.21.). Prva prslina se javila pri uglu savijanja $20,4^\circ$. Na zavarenim uzorcima A-750/73 i B-750/116 su se pojavile prve prsline već pri približno 10° , a uzorak se lomio oko jezgra.



Slika 4.21. Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko lica

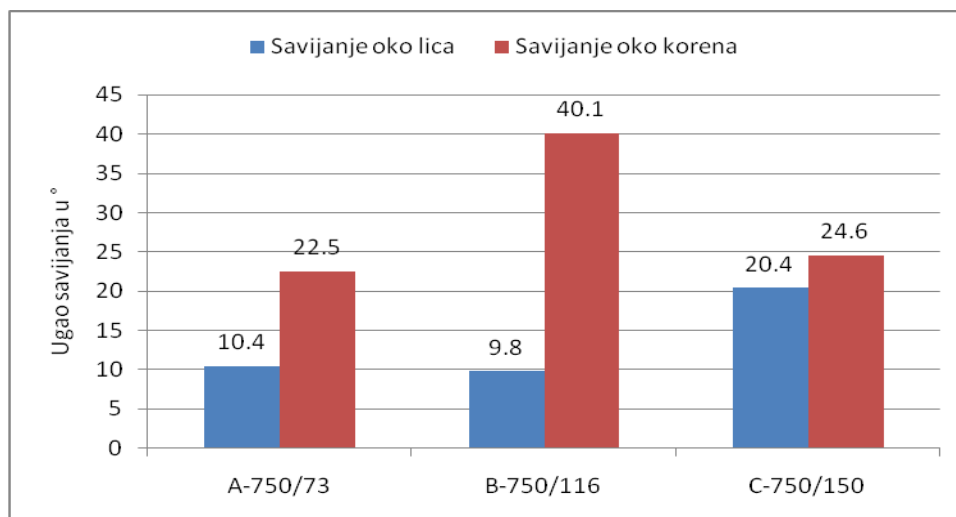
Rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva oko korena pokazuju malo bolje deformacione sposobnosti nego u slučaju savijanja oko lica. Upoređujući zavarene uzorke, najbolja svojstva na savijanje oko korena imaju uzorci B-750/116 (slika 4.22.). Prva prslina se javila pri uglu savijanja $40,1^\circ$. Na zavarenim uzorcima A-750/73 i C-750/150 su se pojavile prve prsline pri $22,5^\circ$, odnosno $24,6^\circ$ (slika 4.23).



Slika 4.22. Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko korena

Uporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko lica i oko korena dati su na slici 4.23, na kojima se uočavaju bolji rezultati savijanja oko korena kod svih uzoraka. Rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva legure 2024-T351 ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem,

moгу se smatrati zadovoljavajućim ako se ima u vidu da se radi o leguri koja je teško zavarljiva klasičnim postupcima zavarivanja.

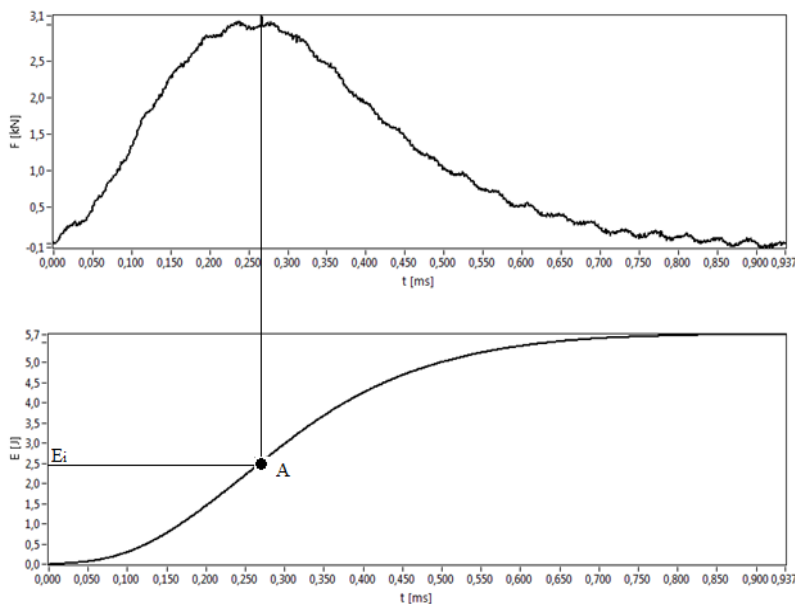


Slika 4.23. Usporedni rezultati savijanja zavarenih uzoraka oko lica i oko korena

4.8. REZULTATI ISPITIVANJA UDARNE ŽILAVOSTI ZAVARENIH SPOJEVA

U Poglavlju 2.6. je opisana primena instrumentiranog Šarpijevog klatna za ispitivanje udarne žilavosti. Kao rezultat ispitivanja dobija se promena sila-vreme (F, t), sila-put (F, s), energija udara-vreme (E, t).

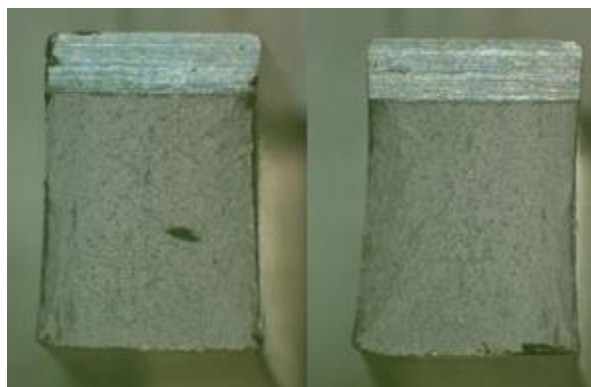
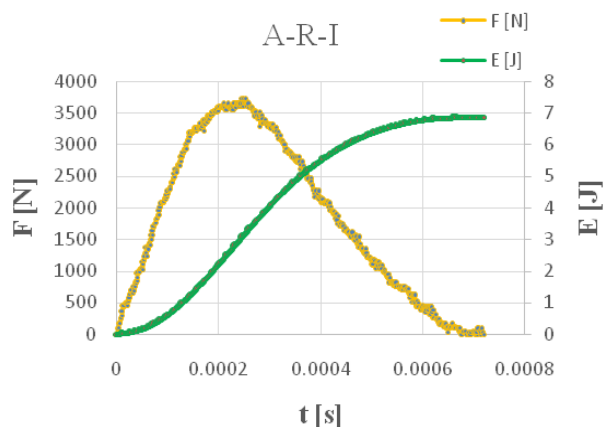
Karakterističan izgled dijagrama sila-vreme (F, t) i energija-vreme (E, t), zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem, prikazan je na slici 4.24.



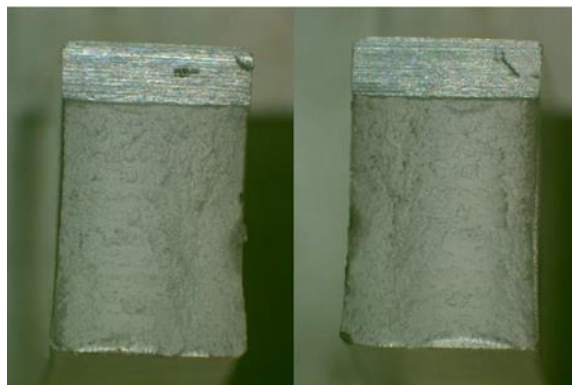
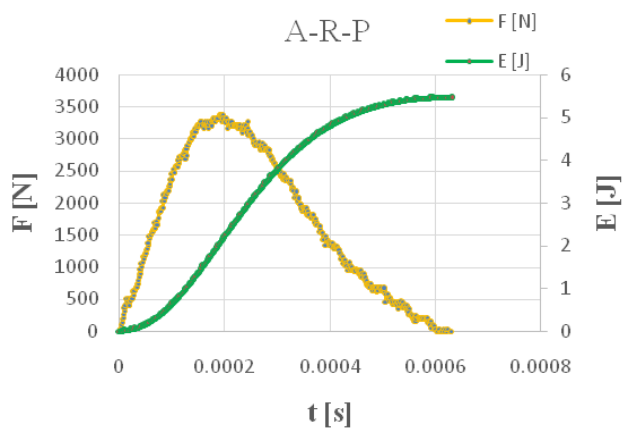
Slika 4.24. Dijagram sila-vreme i energija-vreme za zavareni spoj C-S

Kriva sila – vreme ($F-t$) prikazuje promenu sile sa vremenom i sa nje se očitava maksimalna sila. Kriva energija – vreme ($E-t$) prikazuje promenu energije sa vremenom a predstavlja količinu apsorbovane energije od strane ispitivanog uzorka, odnosno izražava sposobnost materijala da se suprostavi rastu prsline. Sa krive se očitava ukupna maksimalna količina energije E utrošena za lom uzorka. Preklapanjem dijagrama sila-vreme i energija-vreme na posredan način se određuju energije stvaranja E_i i širenja prsline E_p , a koje u svom zbiru daju ukupnu energiju udara. Potrebna energija za stvaranje prsline E_i se određuje za maksimalnu vrednost sile F . Iz maksimalne vrednosti sile (kriva sila – vreme) spuštana vertikala do krive $E-t$ daje presečnu tačku A za koju se na ordinati očitava vrednost energije potrebne za stvaranje (inicijaciju) prsline E_i . Energije širenja (propagacije) prsline E_p se dobija kada se od ukupne energije udara E oduzme energija inicijacije prsline E_i , odnosno $E_p = E - E_i$.

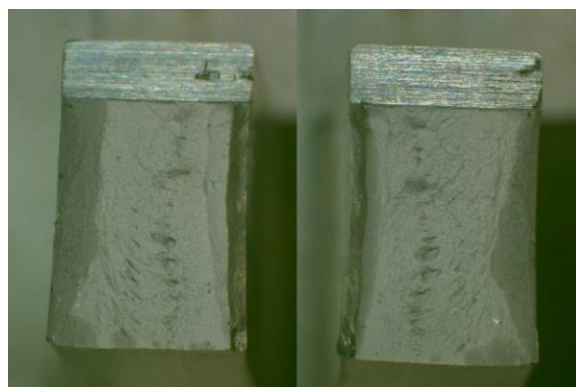
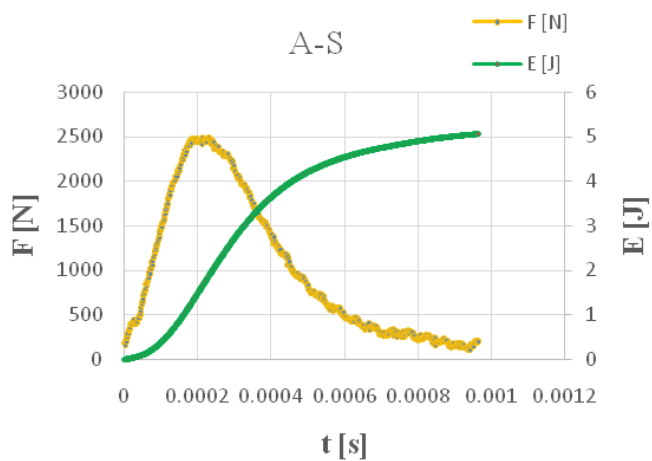
Na slikama 4.25 do 4.33 dati su uporedni dijagrami $F-t$ i $E-t$ za sve zavarene spojeve ostvarene izabranim parametrima zavarivanja (A – 750/73, B – 750/116 i C – 750/150) za inicirani zarez na sredini (S), zarez na strani napredovanja (R-P) i za zarez na povratnoj strani (R-I).



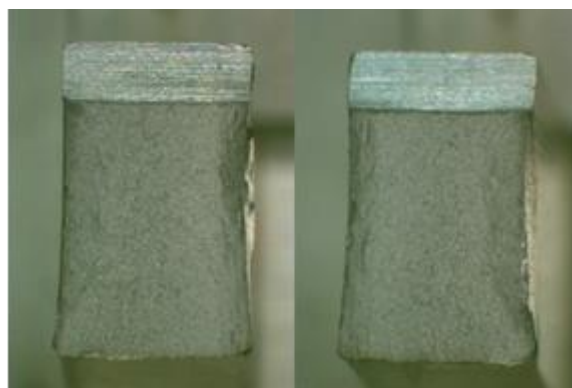
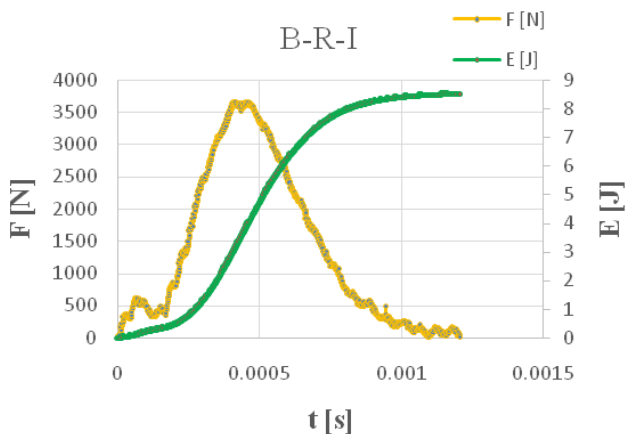
Slika 4.25. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-R-I



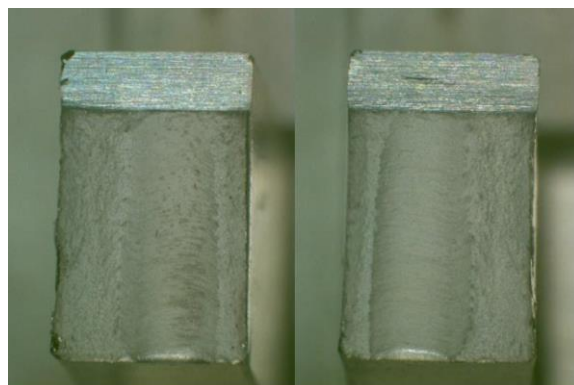
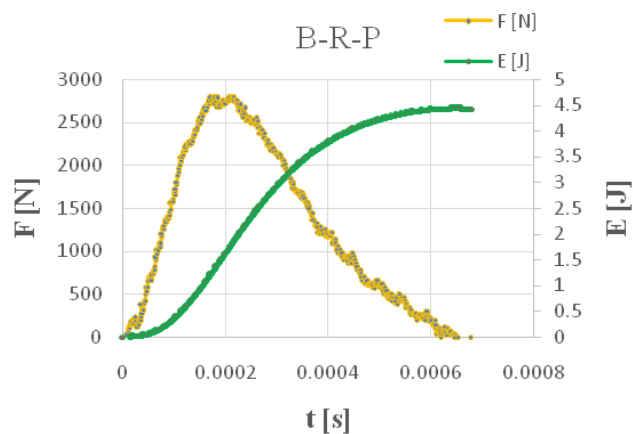
Slika 4.26. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-R-P



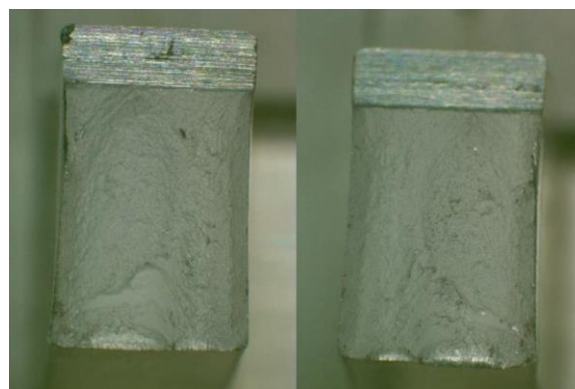
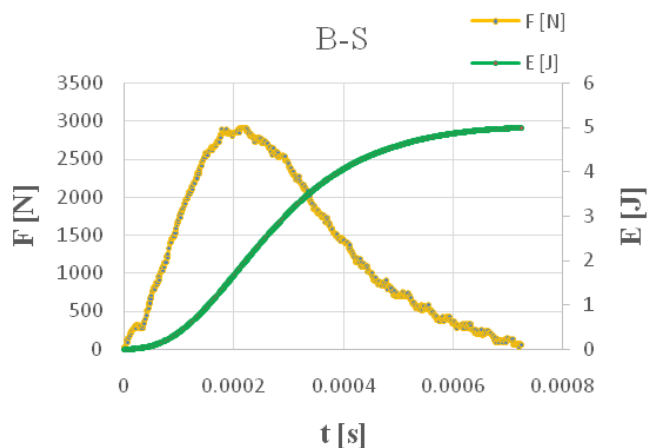
Slika 4.27. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete A-S



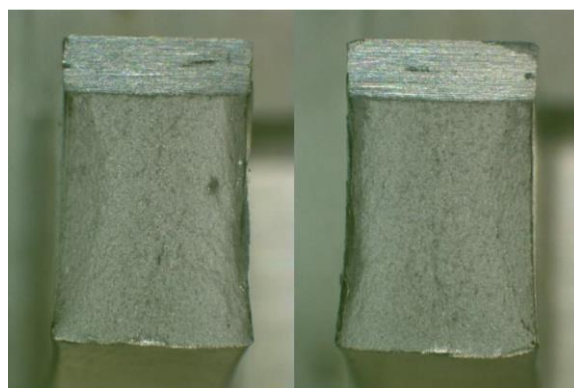
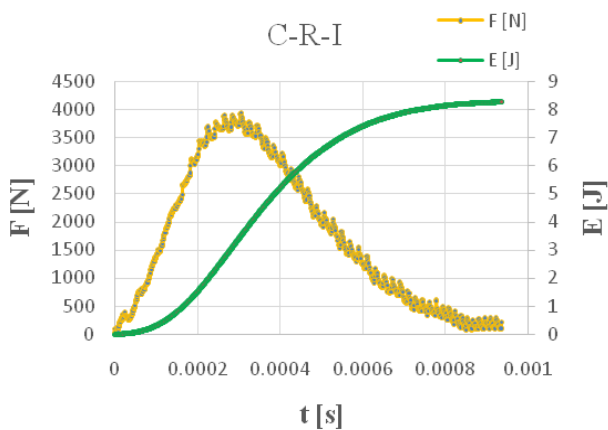
Slika 4.28. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-R-I



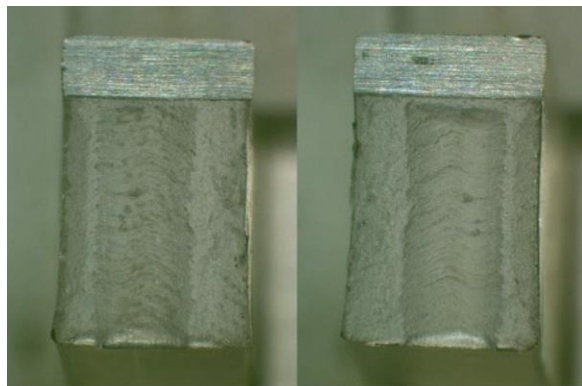
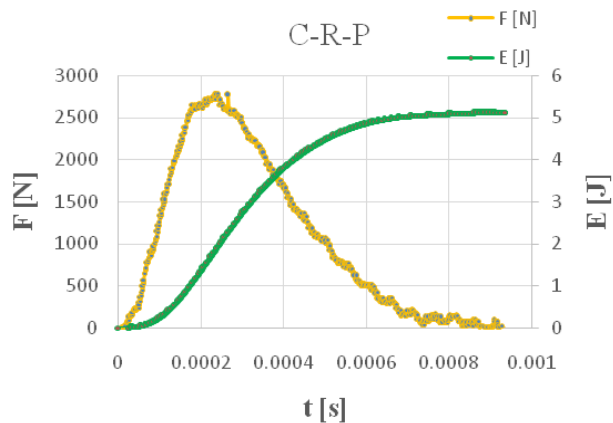
Slika 4.29. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-R-P



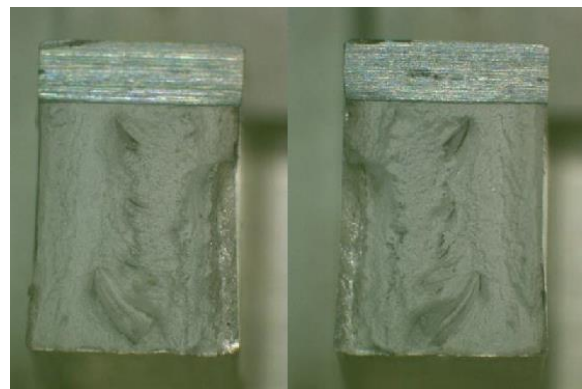
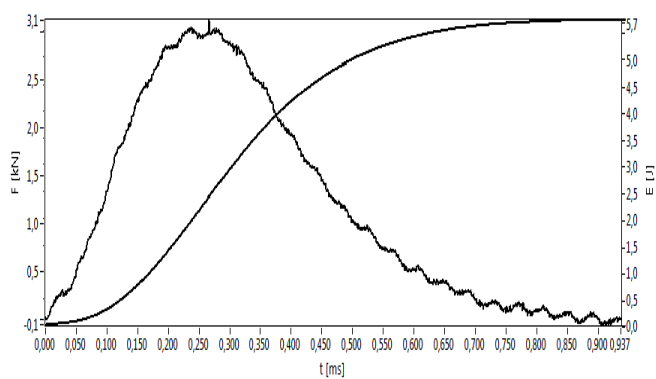
Slika 4.30. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete B-S



Slika 4.31. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-R-I

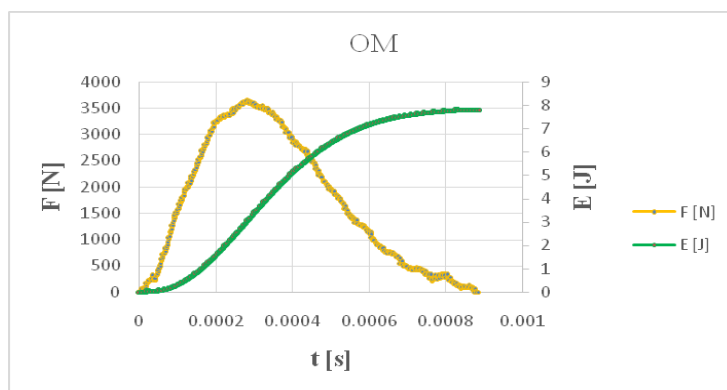


Slika 4.32. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-R-P



Slika 4.33. Grafički prikaz sila / energija – vreme sa izgledom prelomne površine leve i desne strane epruvete C-S

Na slici 4.34. dat je uporedni dijagram sila-vreme (F-t) i energija-vreme (E-t) za osnovni metal (OM).



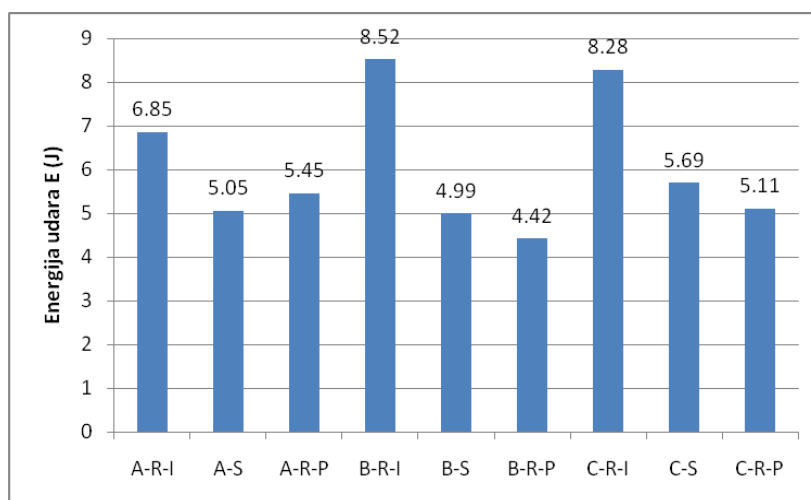
Slika 4.34. Grafički prikaz sila / energija– vreme epruvete OM

Srednje vrednosti rezultata određivanja energije udara E , udarne žilavosti KV, energije stvaranja E_i i širenja prsline E_p zavarenih spojeva i osnovnog materijala dati su u tabeli 4.4. Takođe je u tabeli 4.4 prikazan i odnos ukupnih energija udara zavarenog spoja (E_{ukZS}) i OM (E_{ukOM}), odnos energija stvaranja prsline zavarenog spoja (E_{iZS}) i osnovnog materijala (E_{iOM}), odnos energija širenja prsline zavarenog spoja (E_{pZS}) i osnovnog materijala (E_{pOM}) kao i udeo energija stvaranja i širenja u ukupnoj energiji udara (E_i/E_{uk} i E_p/E_{uk}).

Tabela 4.4. Srednje vrednosti rezultata određivanja energije udara

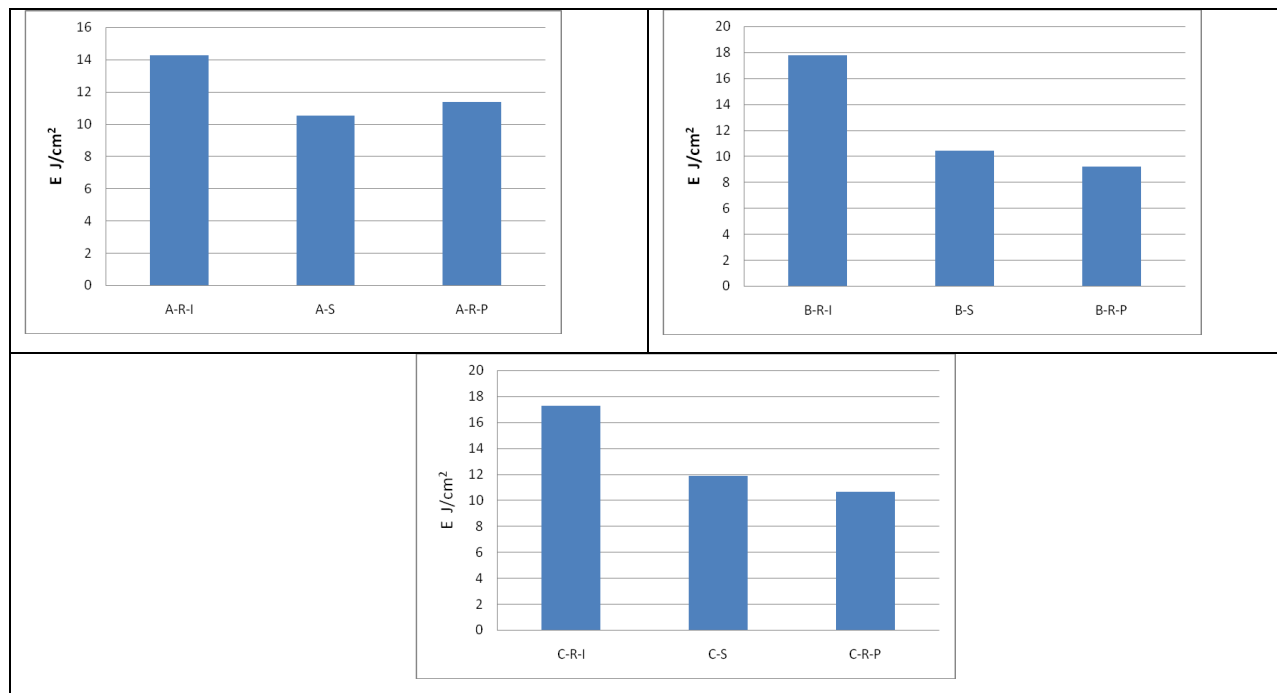
Epruveta	Energija udara E	Udarne žilavost	E_i	E_p	Odnos E_{uk} ZS/OM	Odnos E_i ZS/OM	Odnos E_p ZS/OM	E_i/E_{uk}	E_p/E_{uk}
	J	J/cm ²	J	J	%	%	%	%	%
A-R-I	6,85	14,27	3,03	3,82	87,82	100,33	79,92	44,23	55,77
A-S	5,05	10,52	1,64	3,41	64,74	54,3	71,34	32,48	67,52
A-R-P	5,45	11,35	2,04	3,41	69,87	67,55	71,34	37,43	62,57
B-R-I	8,52	17,75	3,22	5,3	109,23	106,62	110,88	37,79	62,21
B-S	4,99	10,40	1,94	3,05	63,97	64,24	63,81	38,88	61,12
B-R-P	4,42	9,21	1,4	3,02	56,67	46,36	63,18	31,67	68,33
C-R-I	8,28	17,25	3,5	4,77	106,15	115,89	99,79	42,27	57,61
C-S	5,69	11,85	2,43	3,26	72,95	80,46	68,2	42,71	57,29
C-R-P	5,11	10,65	1,86	3,24	65,51	61,59	67,78	36,40	63,41
OM	7,8	16,25	3,02	4,78	100	100	100	38,72	61,28

Energije udara (E) zavarenih spojeva sa različitim parametrima zavarivanja je u svim kombinacijama n_{rot}/v_{zav} najveća za zarez na strani napredovanja, a najmanja energija udara je bila za zavarene spojeve sa zarezom na povratnoj strani. Najveća vrednost energije udara je za zavarene spojeve ostvarene parametrima zavarivanja B-750/116, za zarez na strani napredovanja (4 mm od ose zavarivanja)– B-R-I i iznosi $E=8,52$ J (slika 4.35).



Slika 4.35. Energija udara za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja za zarez na strani napredovanja, na sredini zavarenog spoja i na povratnoj strani

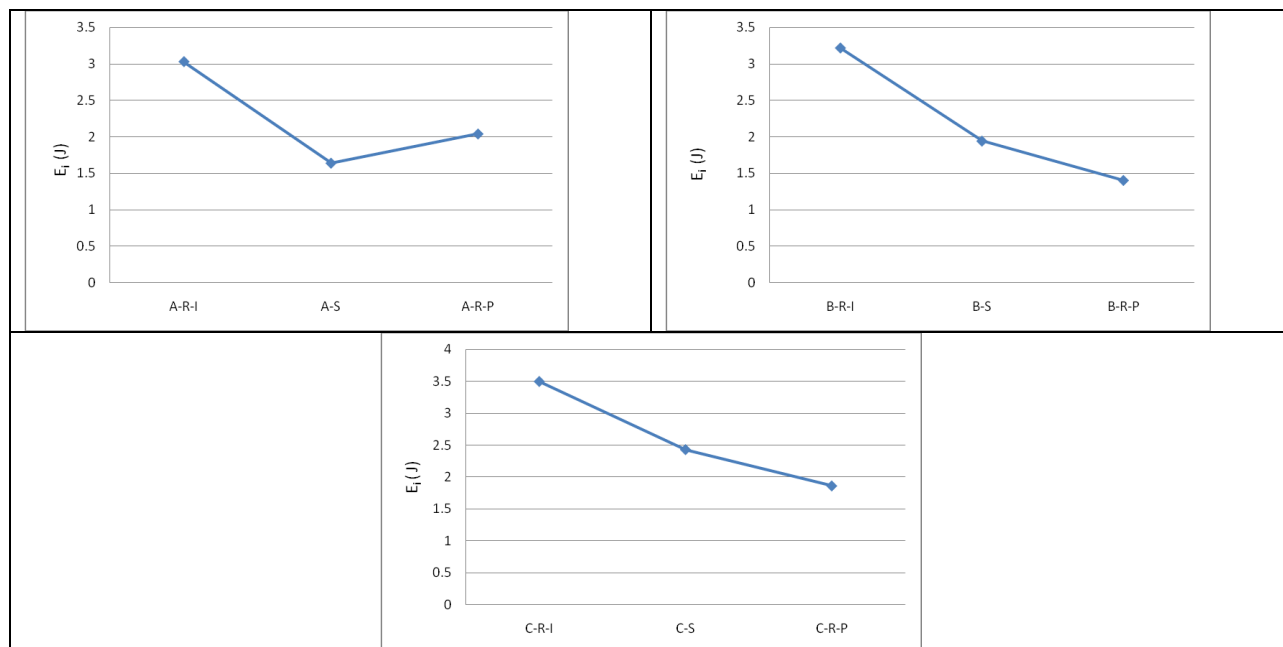
Upoređenje rezultata energije udara odnosno udarne žilavosti za različite položaje zarezaja ukazuju za sve parametre zavarivanja da je energija udara za zarez na strani napredovanja najveća: $E_{A-R-I} > E_{A-R-P} > E_{A-S}$; $E_{B-R-I} > E_{B-S} > E_{B-R-P}$; $E_{C-R-I} > E_{C-S} > E_{C-R-P}$ (slika 4.36). Ovakvo ponašanje može se objasniti ulogom, koju različita količina generisane toplote pri različitim parametrima zavarivanja ima na strukturu ZTM zavarenog spoja.



Slika 4.36. Uporedni rezultati udarne žilavosti za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150

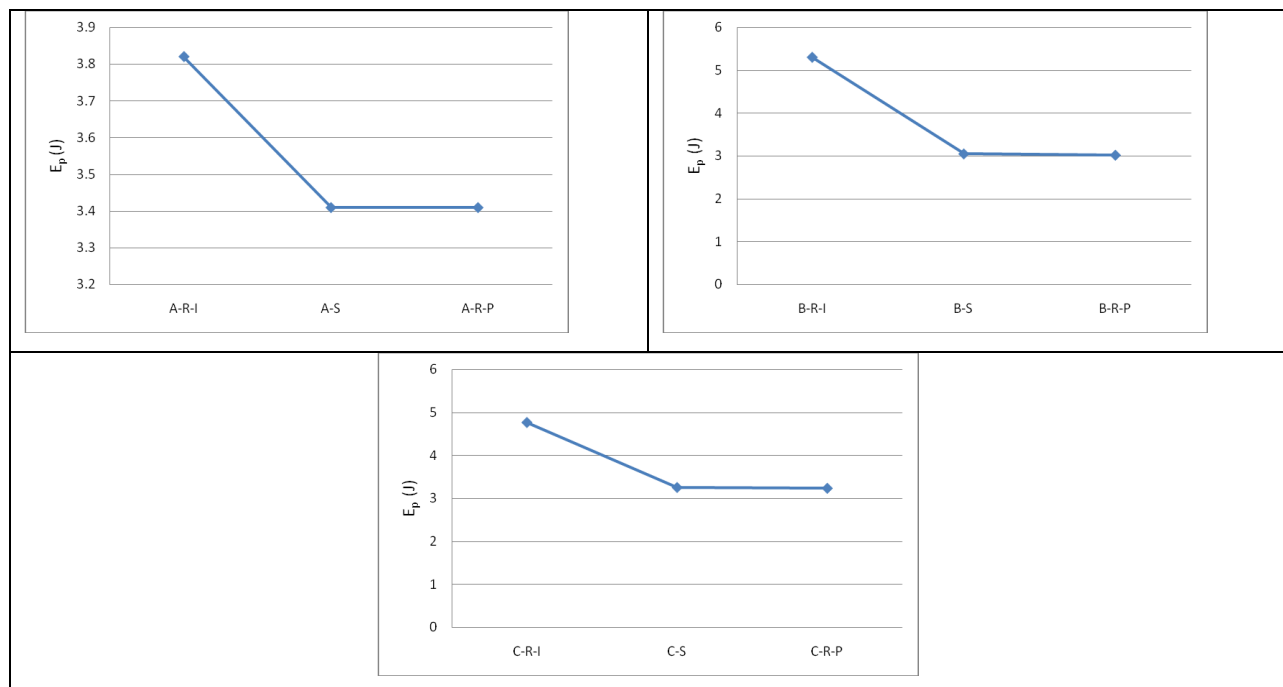
Upoređenje rezultata energije udara potrebnu za stvaranje (iniciranje) prsline E_i za različite položaje zarezaja (slika 4.37) ukazuju za sve parametre zavarivanja istu tendenciju kao uporedni rezultati udarne žilavosti E na slici 4.36.

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



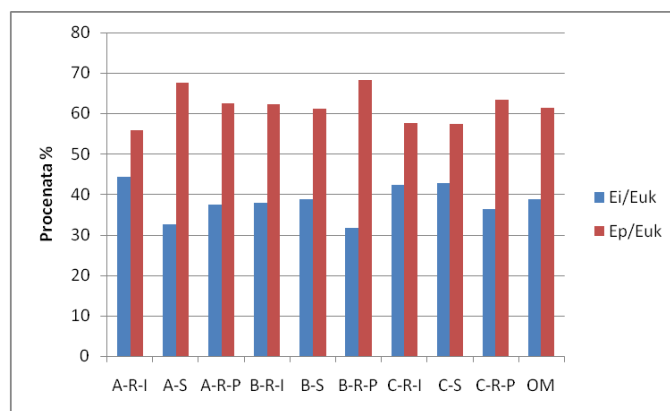
Slika 4.37. Uporedni rezultati energije iniciranja prsline za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150

Upoređenje rezultata energije udara potrebnu za razvoj prsline E_p za različite položaje zarezu ukazuju da je najveća energija za položaj zarezu na strani napredovanja, a da su energije udara potrebna za razvoj prsline na sredini i na povratnoj strani približno jednake (slika 4.38).



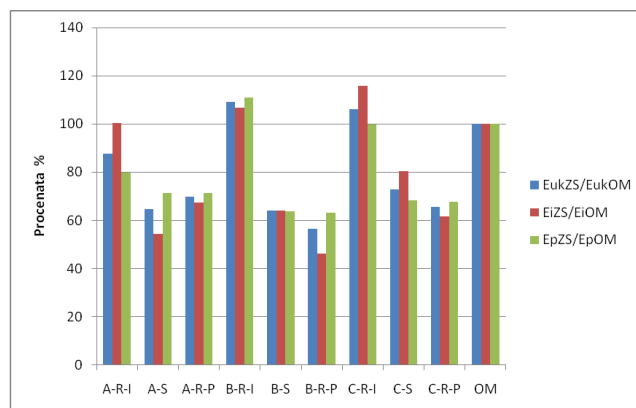
Slika 4.38. Uporedni rezultati energije razvoja prsline za parametre zavarivanja A-750/73; B-750/116 i C-750/150

Na slici 4.39 su dati procentulani rezultati udela energije za stvaranje prsline u odnosu na ukupnu energiju udara E_i/E , odnosno rezultati procentualnog udela energije potrebne za širenje prsline u odnosu na ukupnu energiju E_p/E . Najmanja odnos energija za iniciranje prsline u odnosu na ukupnu energiju je za parametre zavarivanja 750/116 i to na povratnoj strani B-R-P i to 31,67%, a najveći odnos $E_i/E=44,23\%$ za parametre zavarivanja 750/73 na strani napredovanja A-R-I.



Slika 4.39. Uporedni rezultati procentualnog udela energije za stvaranje prsline u odnosu na ukupnu energiju udara E_i/E i procentualnog udela energije potrebne za širenje prsline u odnosu na ukupnu energiju E_p/E za parametre zavarivanja

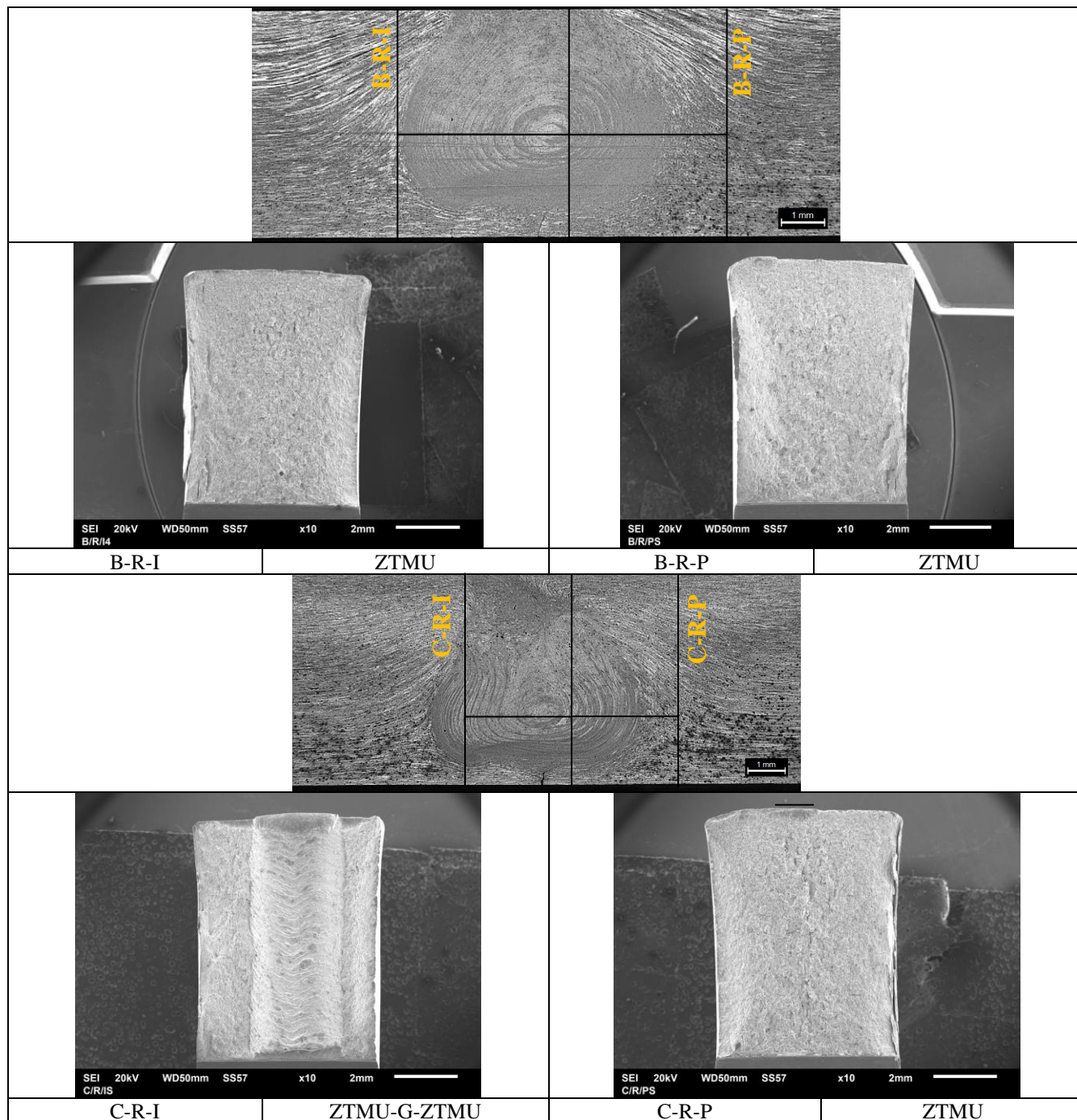
Ako se napravi upoređenje energija udara za različite strukture zavarenog spoja u odnosu na adekvatne energije udara osnovnog materijala (slika 4.40): E_{iZS}/E_{iOM} , E_{pZS}/E_{pOM} i E_{ZS}/E_{OM} , za strukture zavarenih spojeva B-R-I i C-R-I dobijaju se dati odnosi koji iznose više od 100%, bolje rečeno, karakteristike energije udara za ove strukture zavarenog spoja su bolje od strukture osnovnog metala.



Slika 4.40. Uporedni rezultati procentualnog udela ukupne energije, energije za stvaranje prsline i energije za širenje prsline u odnosu na adekvatne procentualne udele energije osnovnog metala (E_{iZS}/E_{iOM} , E_{pZS}/E_{pOM} i E_{ZS}/E_{OM}) za različite pozicije zarez u zavarenom spoju i različite parametre zavarivanja

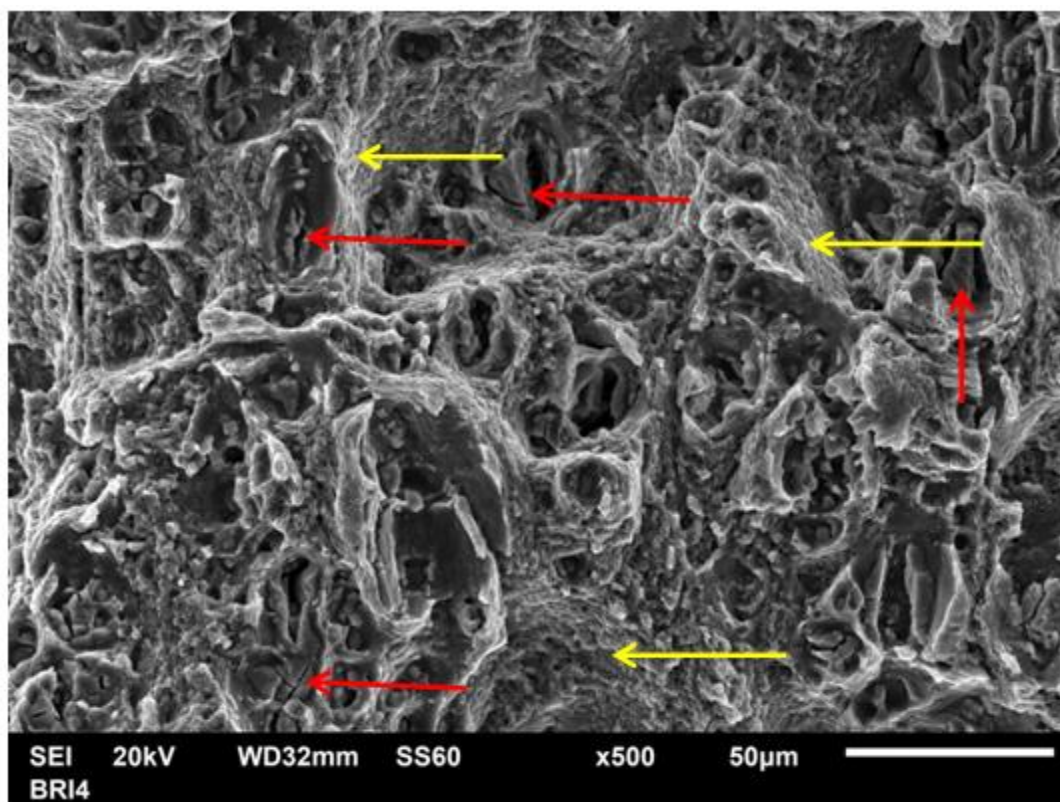
4.8.1. SEM analiza prelomnih površina

Fraktografska analiza prelomnih površina Šarpijevih epruveta je rađena za neke strukture ZTM zavarenog spoja: B-R-I, B-R-P, C-R-I i C-R-P (slika 4.41).



Slika 4.41. Strukture makrostrukturnih prelomnih površina ZTM zavarenog spoja: B-R-I, B-R-P, C-R-I i C-R-P

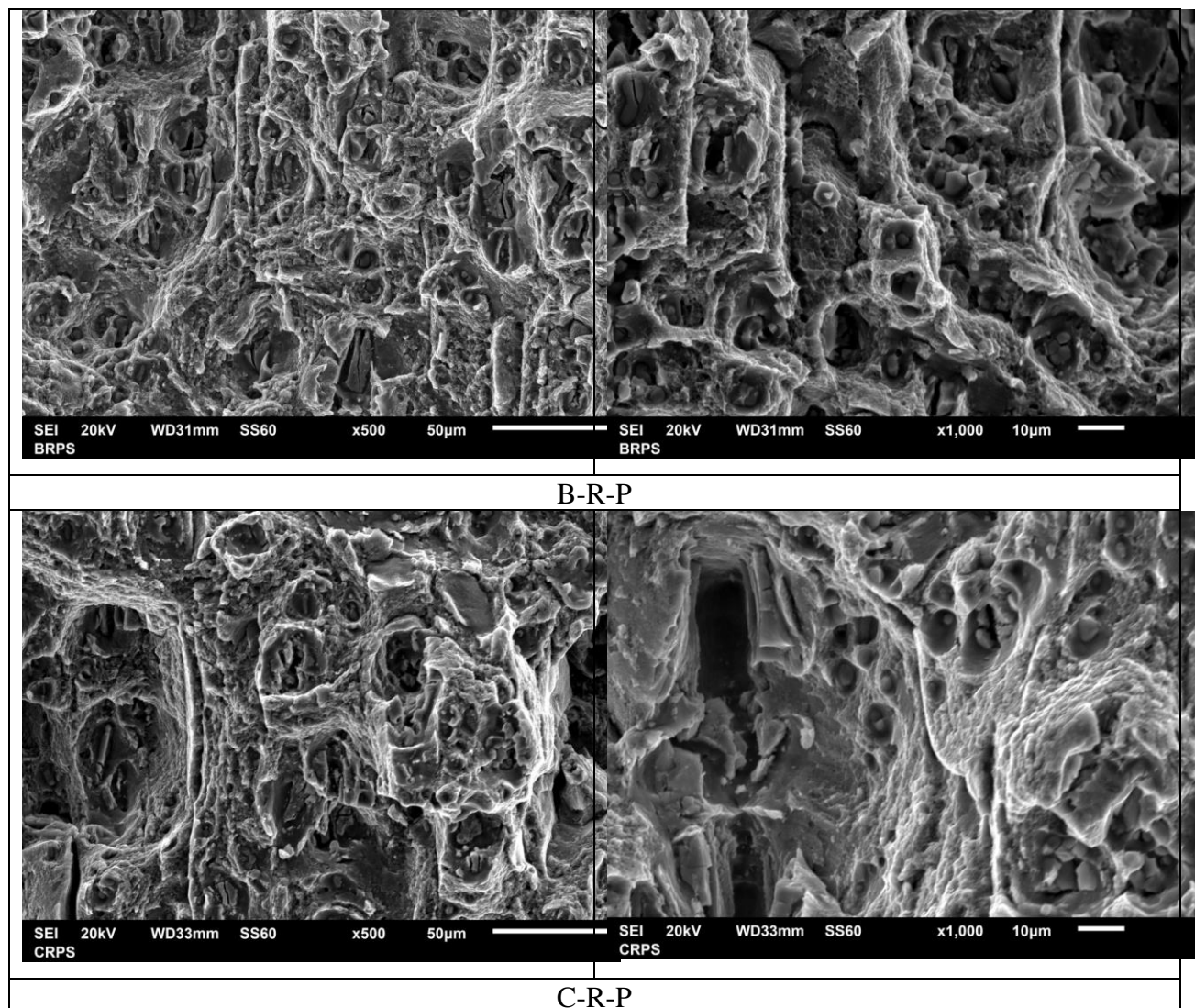
Na površinama preloma strukture B-R-I uočavaju se oblasti prekrivene jamicama koje se znatno razlikuju po veličini, što je posledica nehomogene raspodele čestica sekundarnih faza u ZTMU (slika 4.42). Postoje oblasti sa malim, plitkim jamicama, koje su nastale na finim česticama taloga (prikazano žutim strelicama). Ove čestice nastaju u procesu termičkog taloženja, tj. starenja legure AA 2024. Velike jamice su nastale na krupnijim česticama sekundarnih faza. Takođe se uočava višestruki lom (fragmentacija) krupnijih čestica sekundarnih faza u dnu jamica (kao što je prikazano crvenim strelicama).



Slika 4.42. Mikrostruktura zone termomehaničkog uticaja površine preloma B-R-I

Na slikama 4.43 date tipične površine preloma (B-R-P i C-R-P) taložno ojačane legure. Dekohezija na površini čestica/osnova i lom čestica sekundarnih faza je prisutan na površinama preloma. Kod oba uzorka je lom –transkristalni, jamičasti, sa jamicama različite veličine. Primarne (krupnije) jamice na površini preloma su nastale na krupnim česticama sekundarne faze, mehanizmom dekohezije čestica/osnova. Sitne, plitke jamice su nastale na finim česticama taloga. Unutar krupnih jamica uočen je višestruki lom (fragmentacija) krupnih čestica sekundarnih faza. Lom je iniciran na česticama sekundarne faze i istovremeno, u fazi rasta

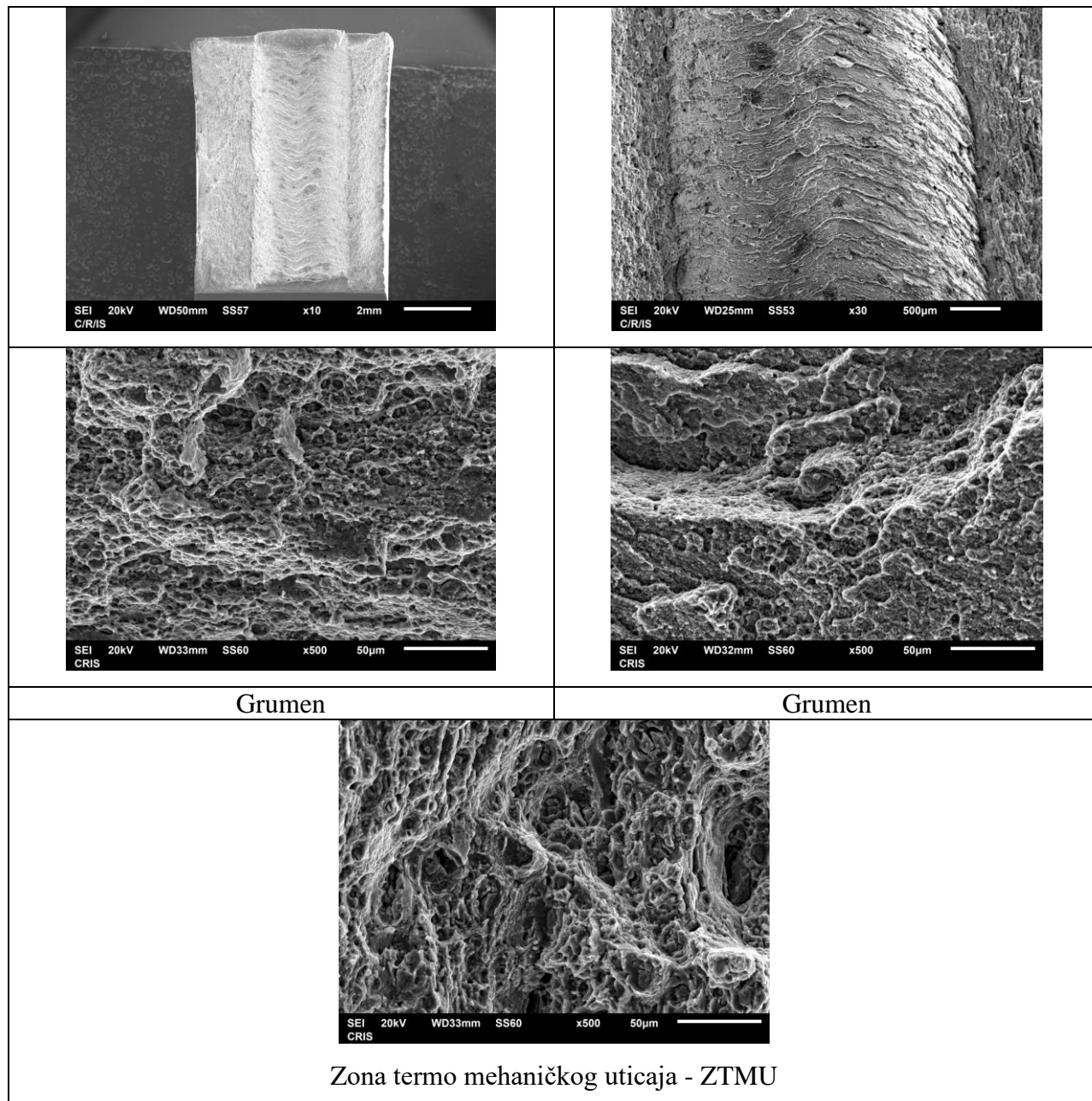
primarnih mikrošupljina koji se odvija plastičnom deformacijom osnove, odvija se i dekohezija na sitnim česticama sekundarne faze. Dalji lom se odvija mehanizmom koalescencije mikrošupljina, smicajnom dekohezijom. Primarne jamice su okružene grebenima na čijim površinama se uočavaju izdužene fine jamice.



Slika 4.43. Mikrostrukturne zone preloma B-R-P i C-R-P sa uvećanjem x500 i x1000

Kod uzorka C-R-P zarez je bio u ZTMU i prelom se odvijao kroz tu zonu, dok se kod uzorka C-R-I lom odvijao kroz ZTMU-jezgro-ZTMU (slika 4.44). Zbog toga se na makroskopskom snimku preloma C-R-I uzorka uočavaju različite zone (s leva na desno: zona ka licu-grumen-zona ka korenu). U centralnom delu je zona jezgra, koja je jasno razdvojena od zona

termomehaničkog uticaja-ZTMU. Na površini zone jezgra se uočavaju talasaste „stepenice“, koje su ustvari „onion rings“ [126] (slika 4.44). Posmatrano pri većim povećanjima ove zone takođe, imaju znatno različite karakteristike.



Slika 4.44. Mikrostrukturne zone preloma C-R-I sa uvećanjem x500 i x1000

Površina koja odgovara zoni jezgra je prekrivena sitnim jamicama, što je posledica sitnozrne strukture ove zone, tj. usitnjenih čestica sekundarne faze i finog taloga (slika 4.44).

Površina preloma ZTMU ima iste karakteristike kao i ostali uzorci kod kojih se lom odvija kroz ZTMU.

4.9. REZULTATI ISPITIVANJA PARAMETARA MEHANIKE LOMA

Efekat heterogenosti strukture i mehaničkih svojstava zavarenog spoja određuju položaj nastanka, a potom i razvoja prsline. S obzirom na heterogenu strukturu zavarenog spoja, parametri mehanike loma su određivani u različitim delovima zavarenog spoja: sredina zavarenog spoja, deo zavarenog spoja na strani napredovanja – 4mm od sredine zavarenog spoja i deo zavarenog spoja na povratnoj strani – 4 mm od sredine zavarenog spoja, jer to za zavareni spoj ostvaren trenjem sa mešanjem može da bude pokazatelj kvaliteta.

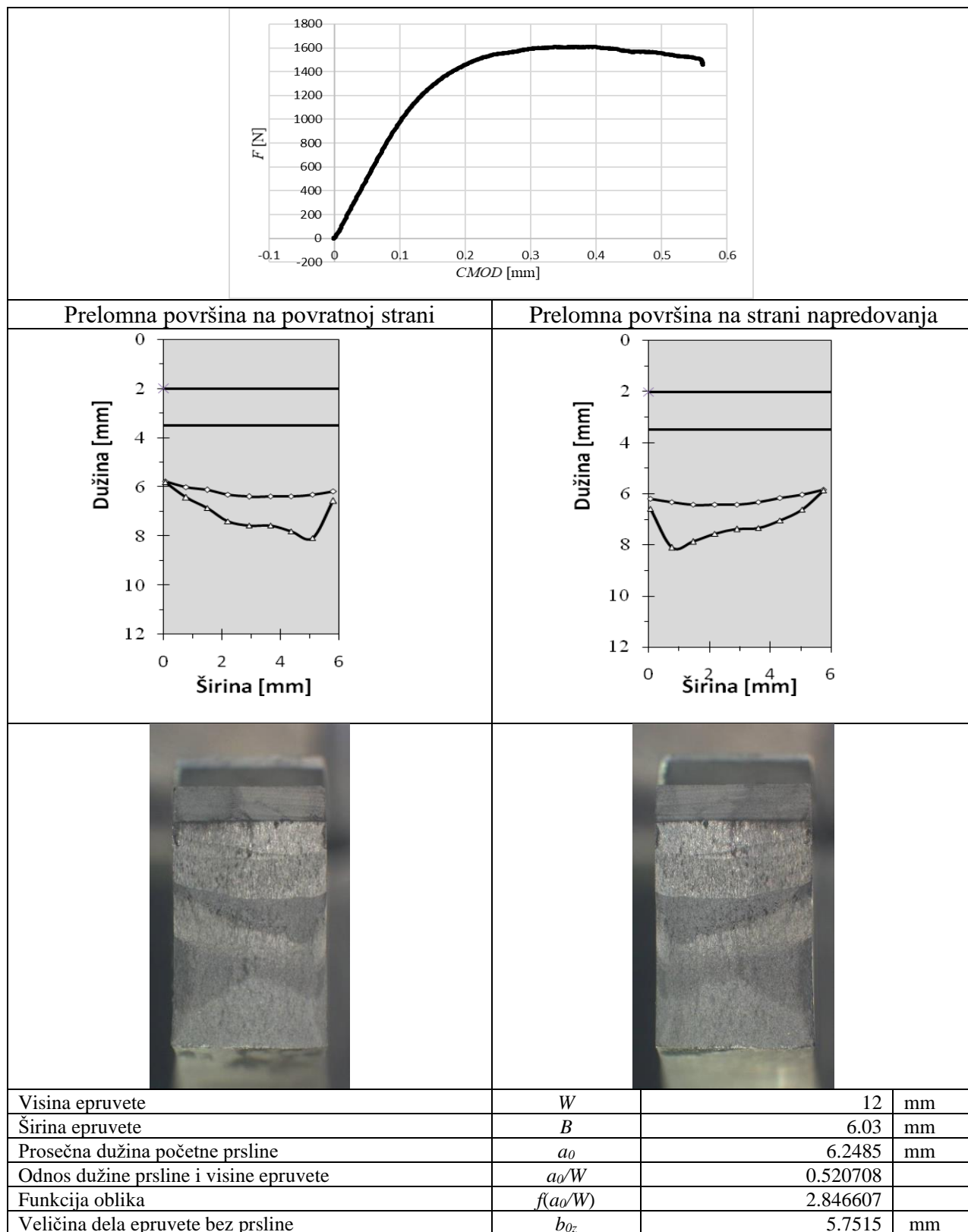
Eksperimentalna istraživanja parametara mehanike loma zavarenih spojeva ostvarenih trenjem sa mešanjem sa različitim parametrima zavarivanja su vršena prema algoritmu datom na slici 3.17. Nakon što su urađene epruvete sa mašinski urezanim zarezom u različitim položajima strukture zavara, vršeno je stvaranje zamorne prsline definisano standardom ASTM E1820, a nakon toga i konačni lom epruvete.

Na bazi merenja dužine zamorne prsline i dužine stabilnog rasta prsline u 9 položaja na istim mestima prelomne površine i to za prelomne površine na obe strane polomljene epruvete (rezultati merenja za različite strukture preloma za stranu napredovanja i povratnu stranu date su u Prilogu A), sračunata je prosečna vrednost zamorne prsline a_0 , odnos dužine zamorne prsline i visine epruvete a_0/W i funkcija oblika $f(a_0/W)$ date su u tabelama ispod slika preloma (slike 4.45-4.52). U tabeli 4.5 dati su rezultati merenja dužine zamorne prsline na dva uzorka osnovnog metala (OM1 i OM2). Na osnovu sprovedenog eksperimenta, na slikama 4.45 do 4.52 prikazani su dijagrami i fotografije stabilnog i nestabilnog rasta zamorne prsline sa izgledom površine na mestu loma.

Tabela 4.5. Rezultatima merenja dužine zamorne prsline na dva uzorka osnovnog metala

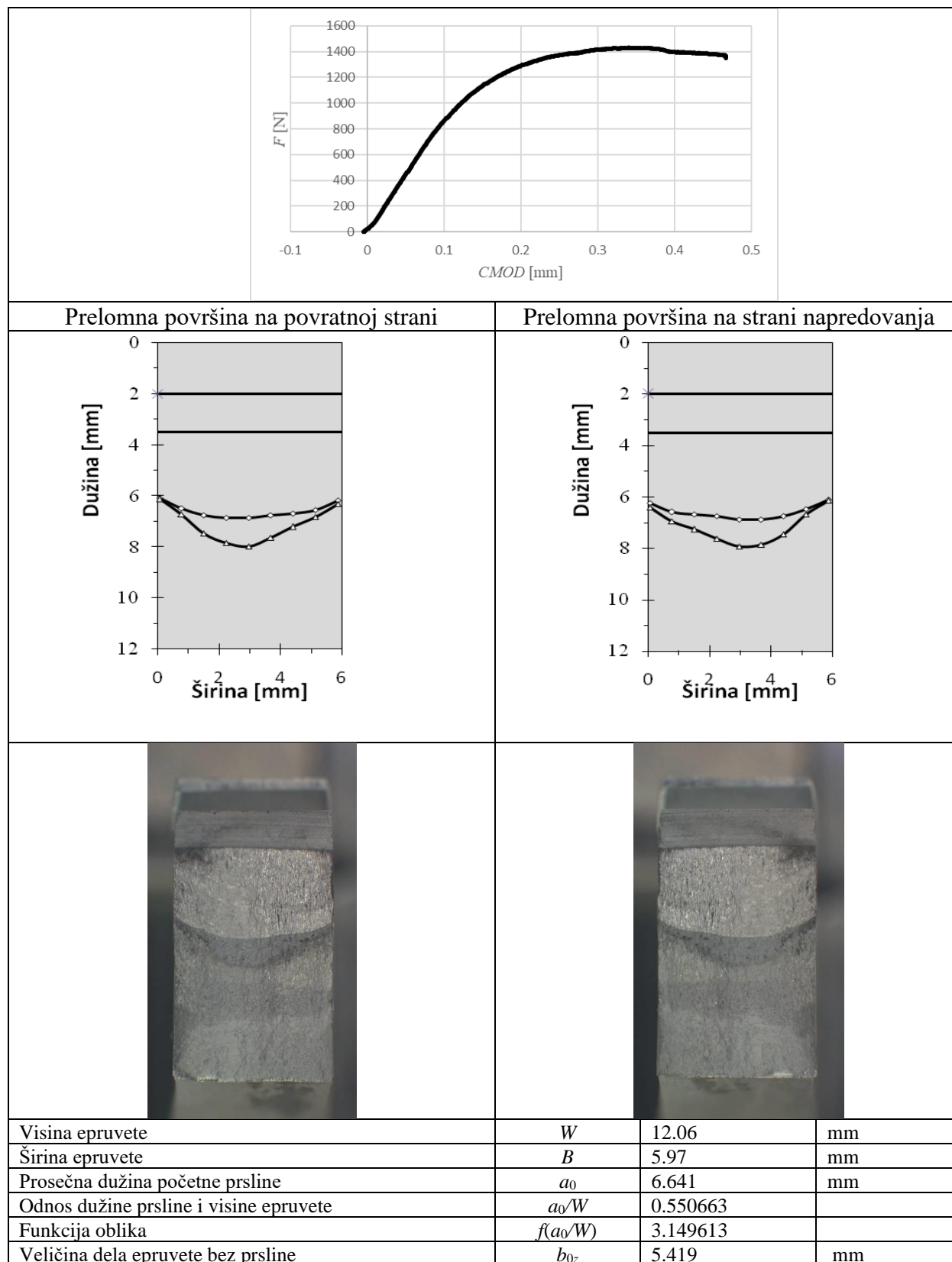
		OM1	OM2
Visina epruvete	W / mm	12.03	11.98
Širina epruvete	B / mm	5.8	5.9
Prosečna dužina početne prsline	a_0 / mm	6.4415	6.5215
Odnos dužine prsline i visine epruvete	a_0/W	0.535453	0.544366
Funkcija oblika	$f(a_0/W)$	2.989847	3.081894
Veličina dela epruvete bez prsline	b_0z / mm	5.5885	5.4585

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



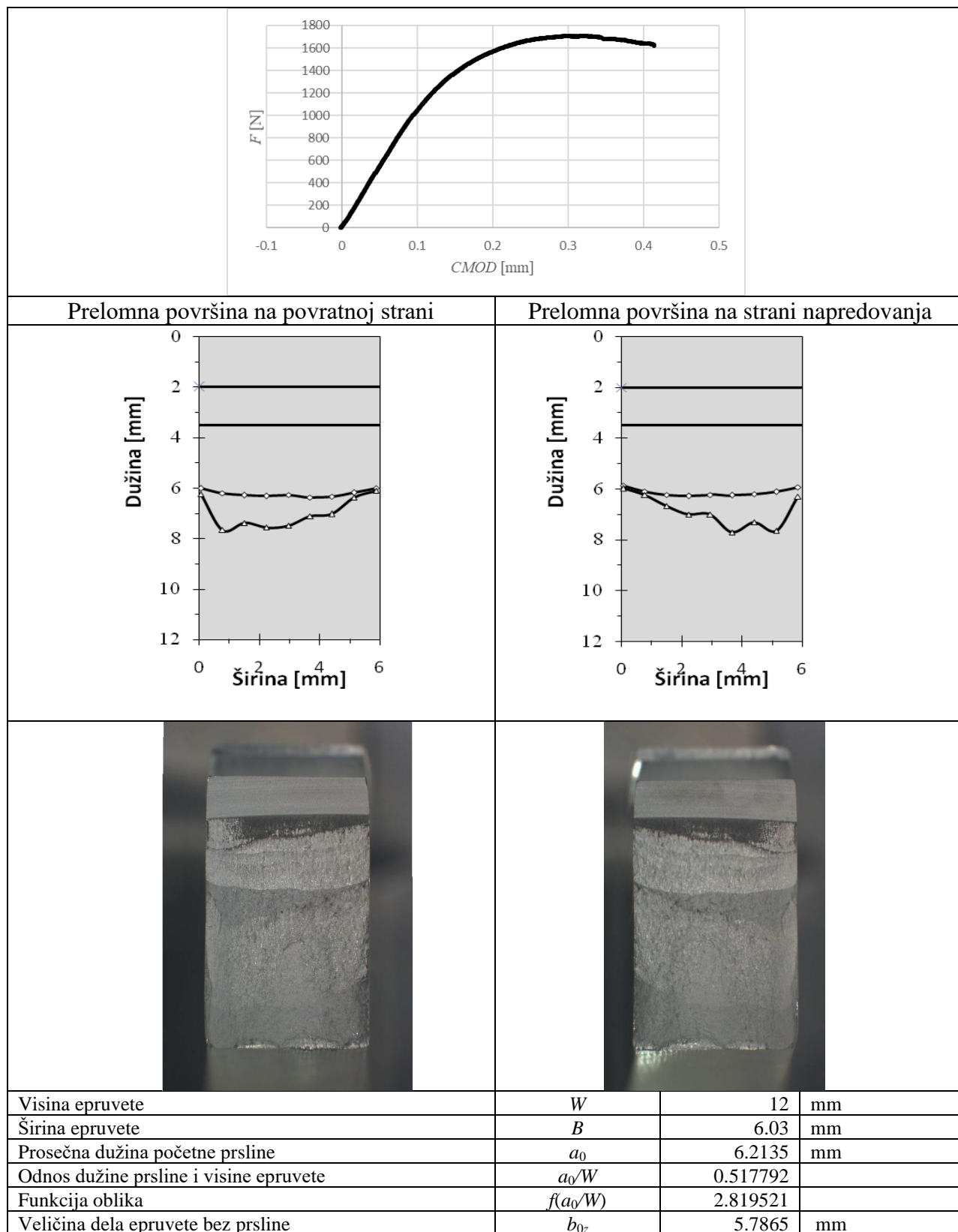
Slika 4.45. Epruveta A-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



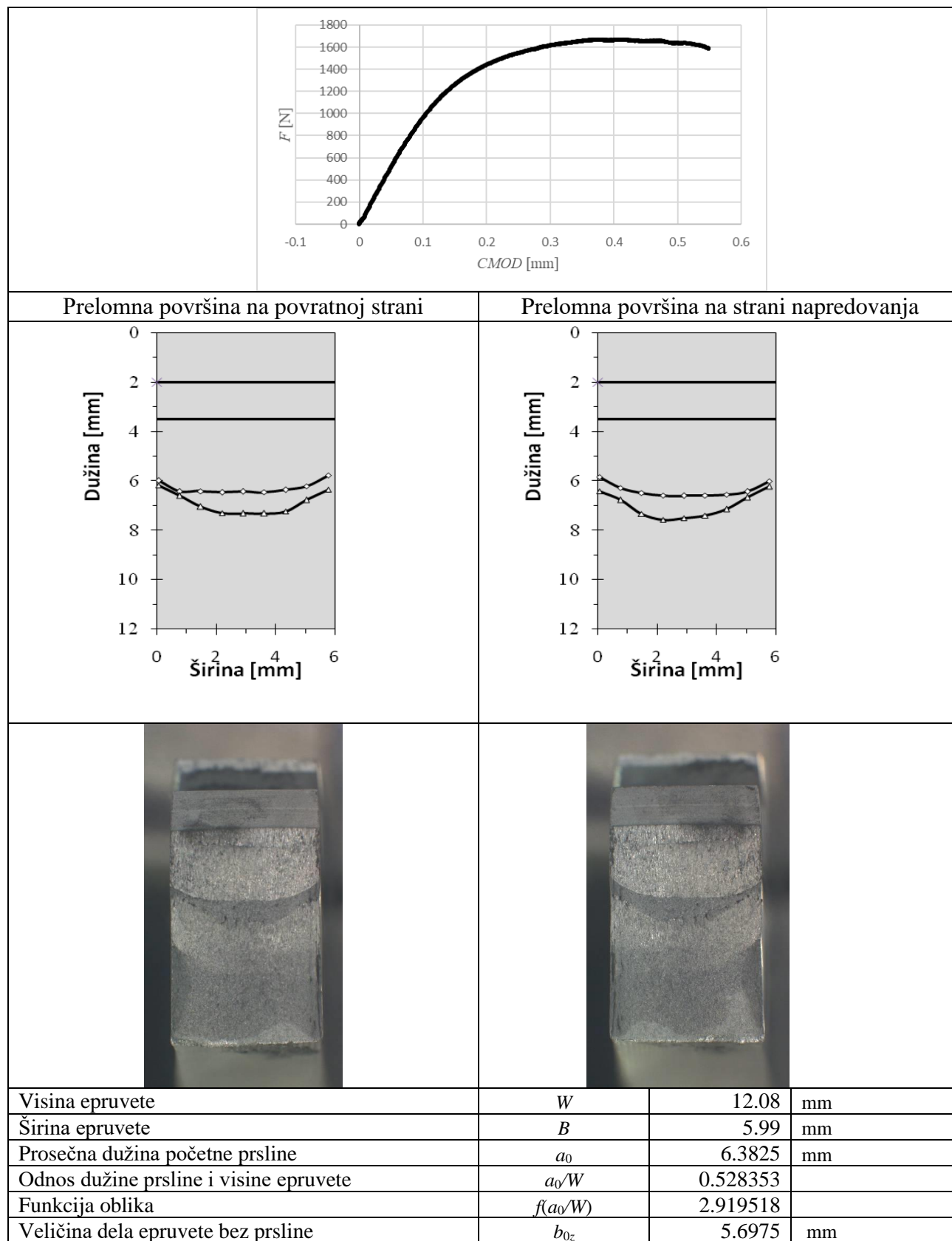
Slika 4.46. Epruveta A-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



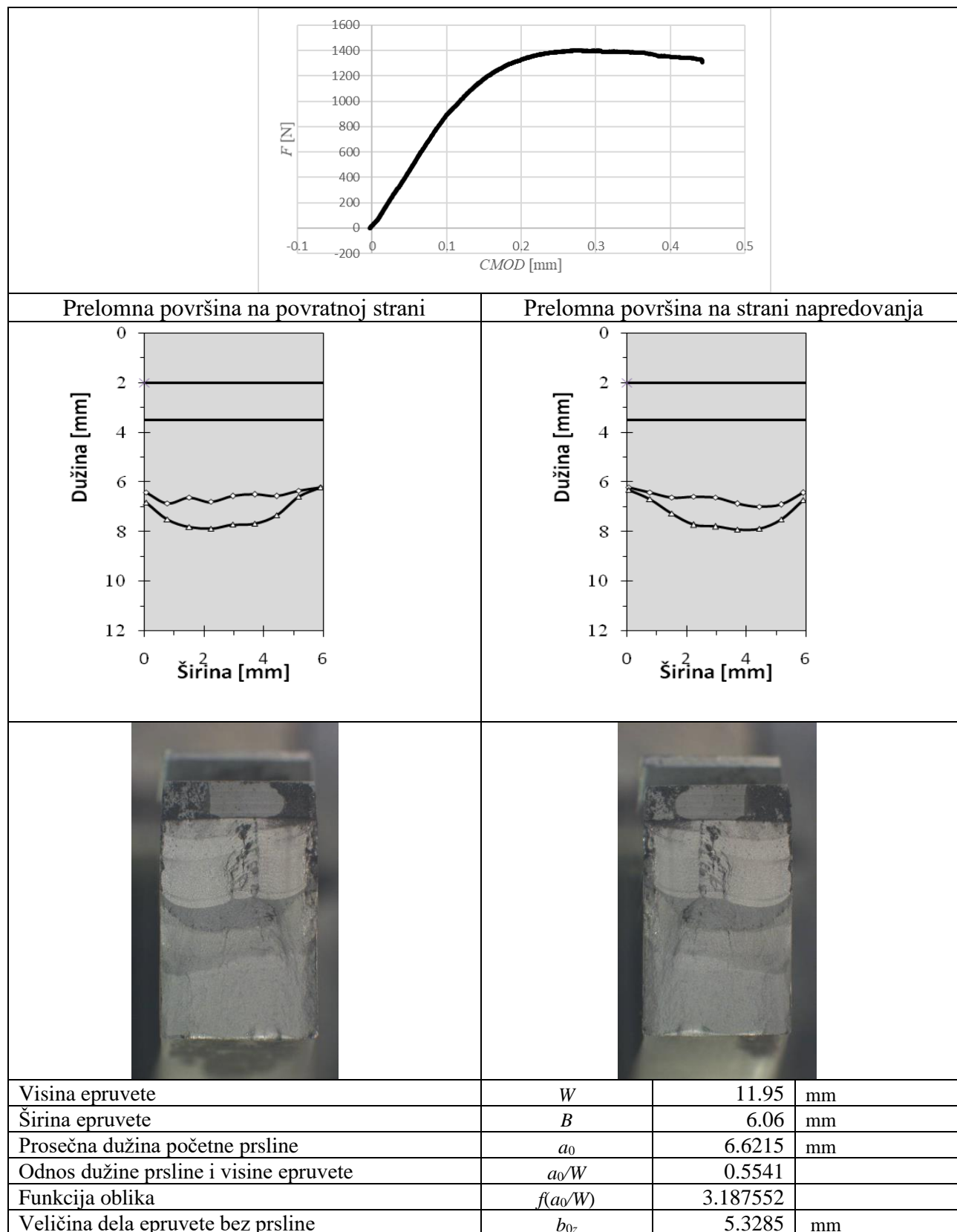
Slika 4.47. Epruveta B-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



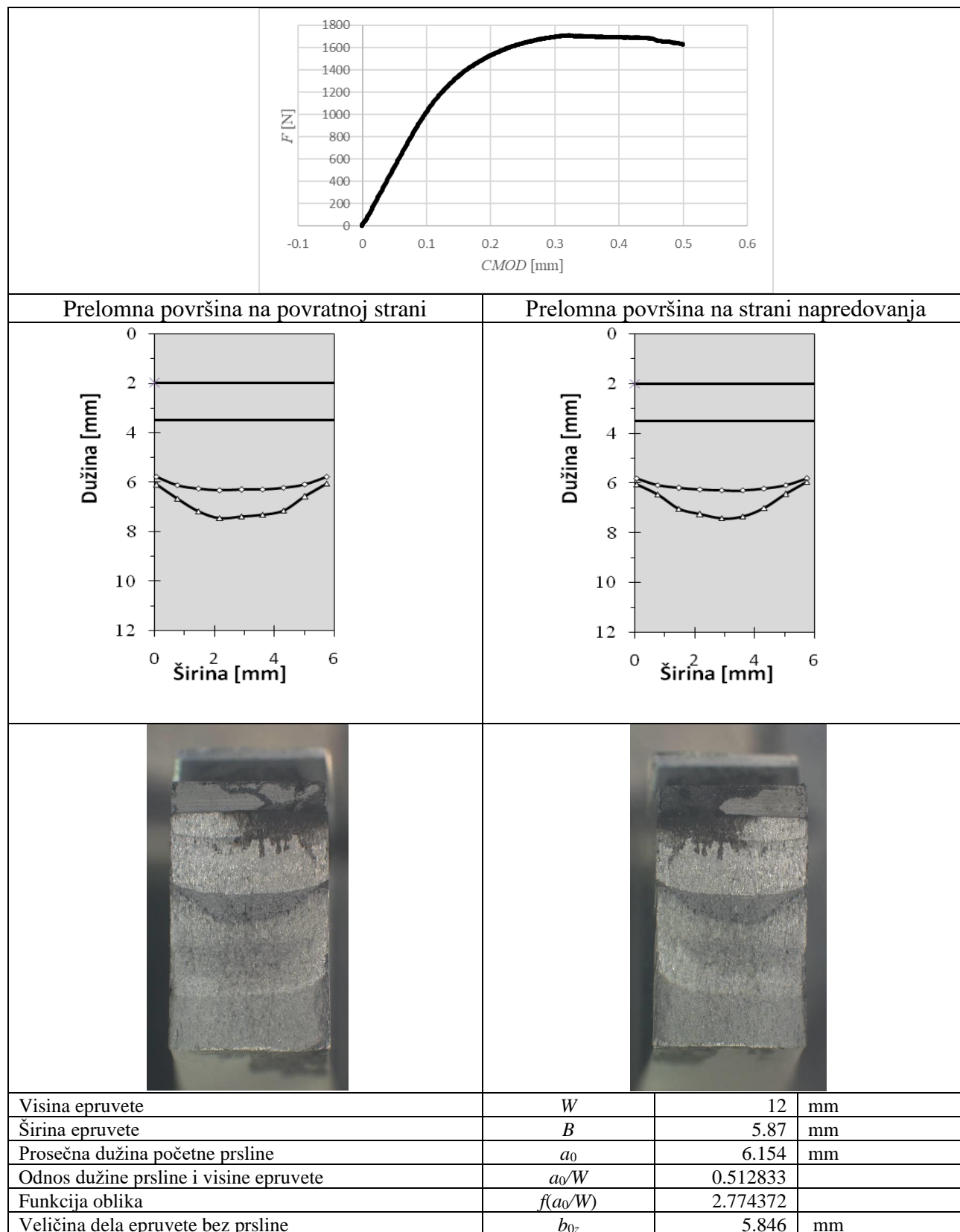
Slika 4.48. Epruveta B-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



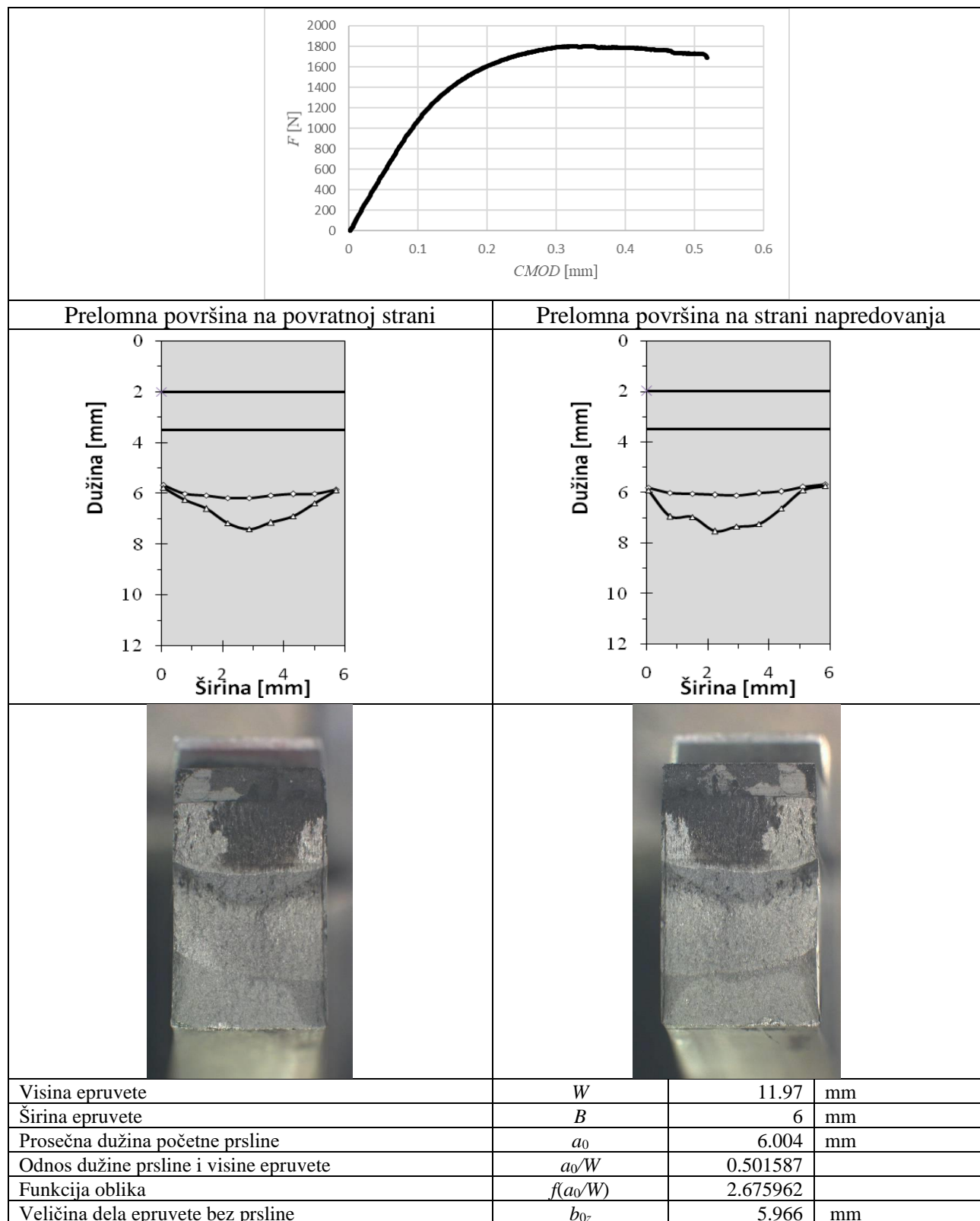
Slika 4.49. Epruveta B-S sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



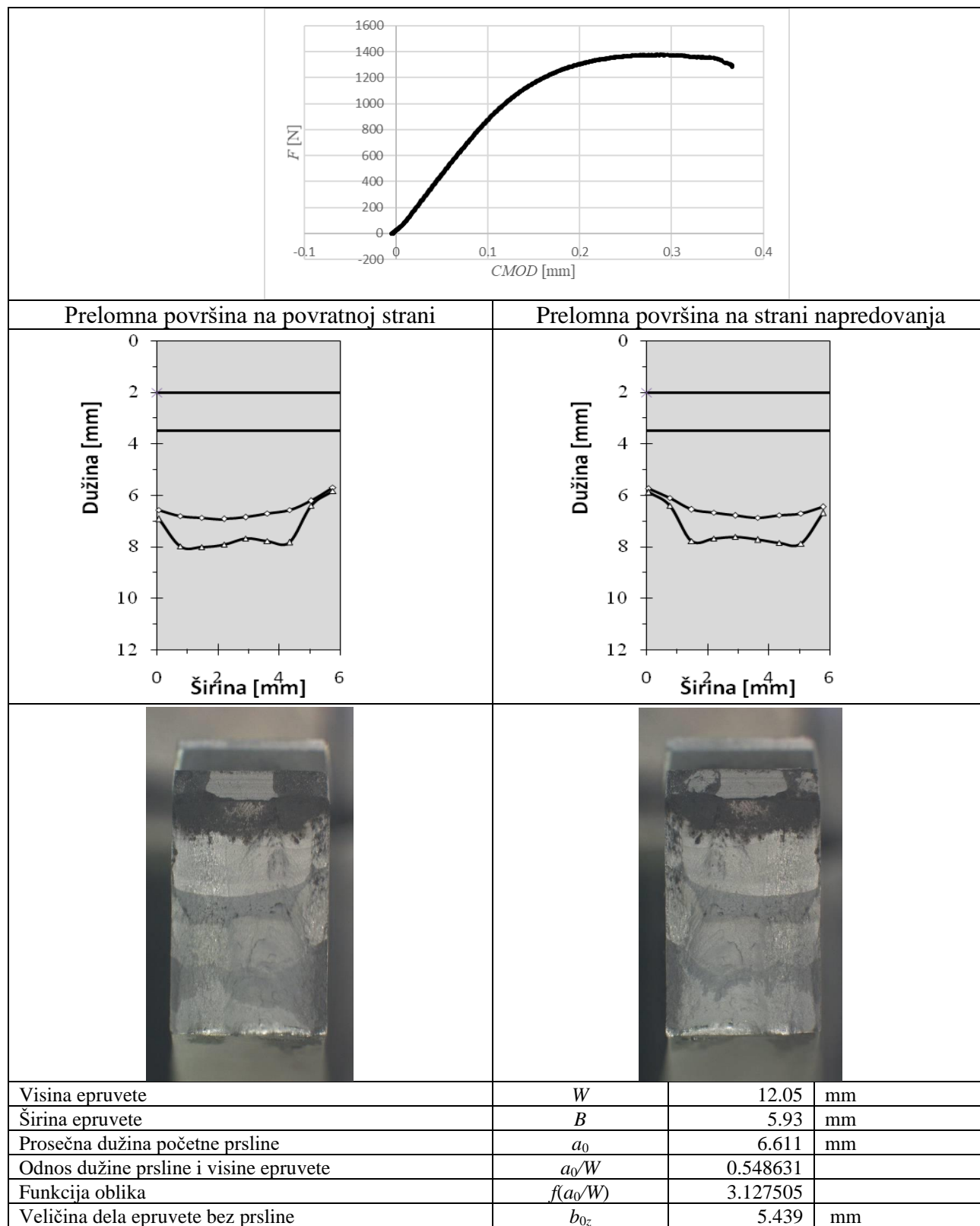
Slika 4.50. Epruveta C-R-I sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA



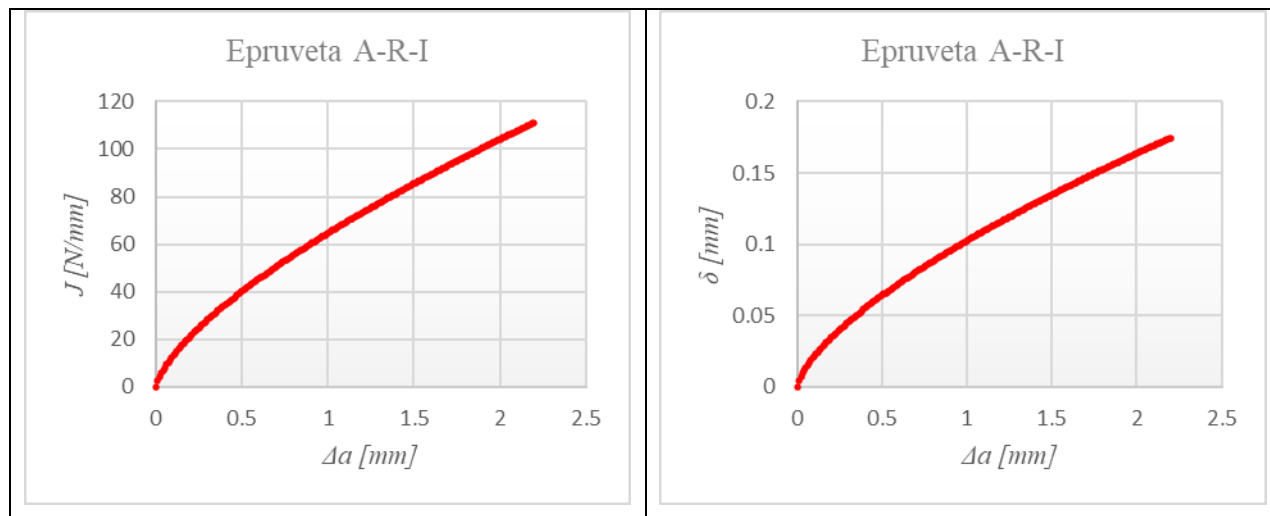
Slika 4.51. Epruveta C-R-P sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

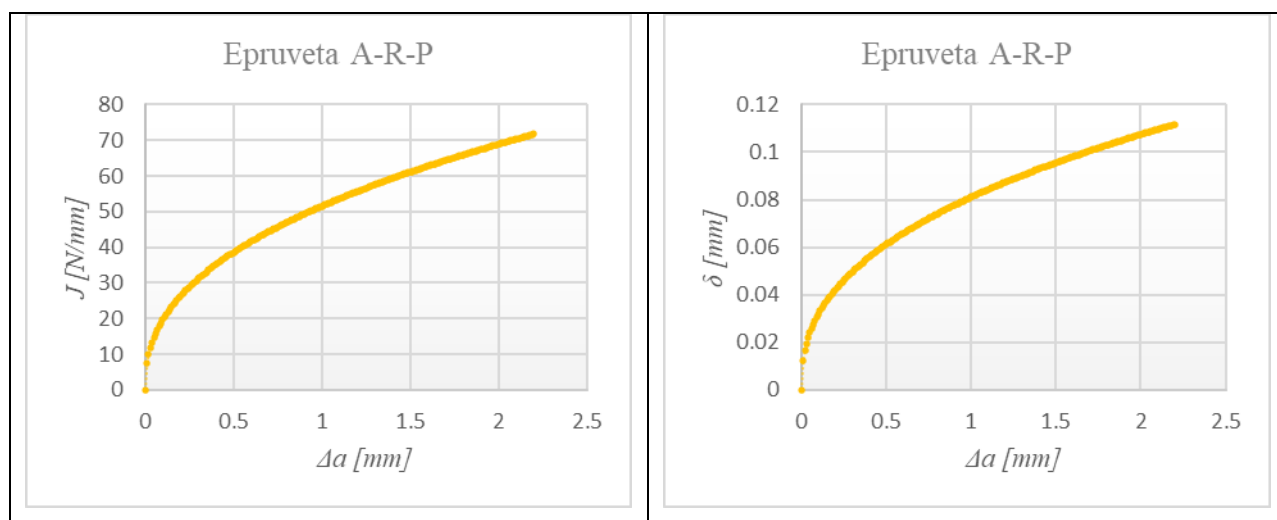


Slika 4.52. Epruveta C-S sa rezultatima merenja dužine zamorne prsline

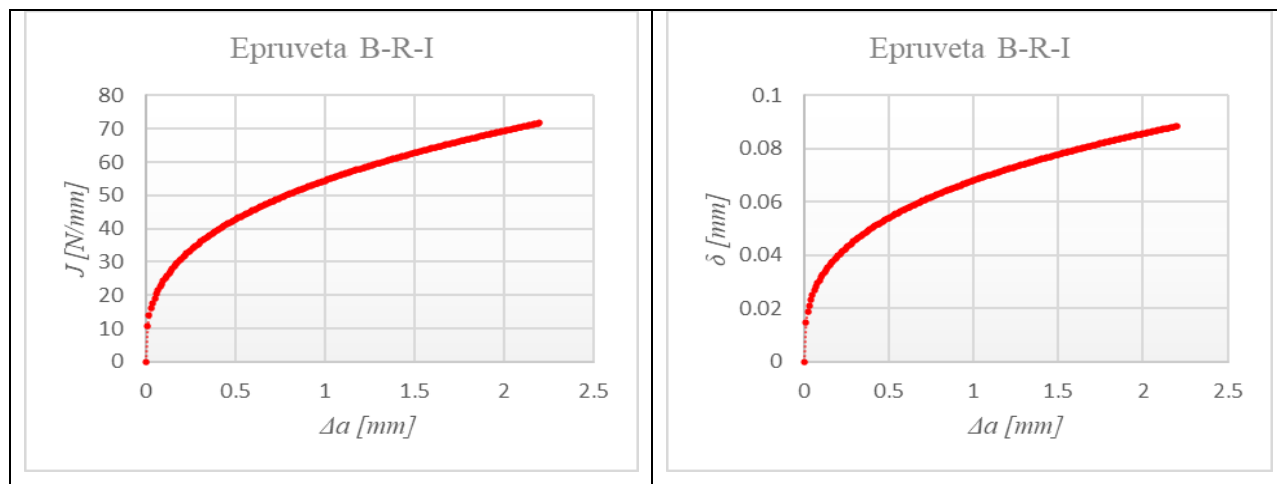
Obradom rezultata za svaki od zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja sa različitim pozicijama zarezova dobijeni su grafički prikazi krivih otpornosti J - Δa i δ - Δa , dati na slikama 4.53 do 4.60.



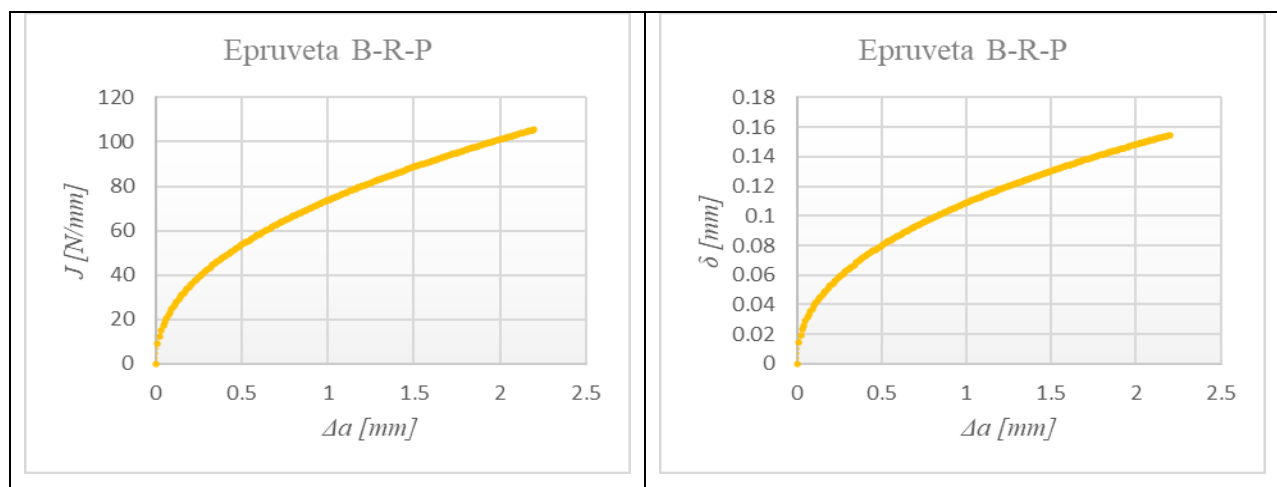
Slika 4.53. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/73 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - A-R-I



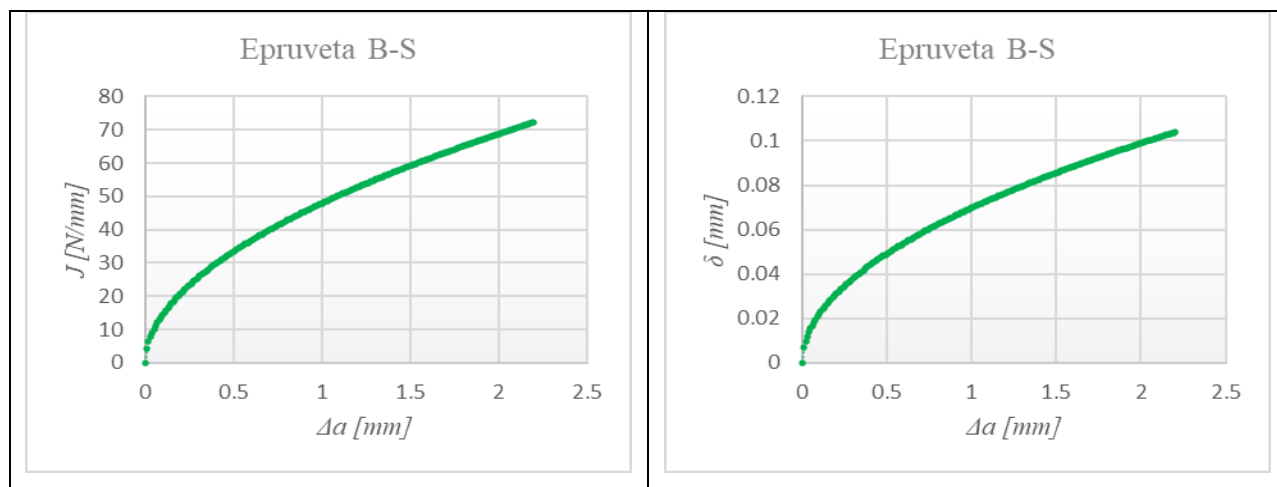
Slika 4.54. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/73 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - A-R-P



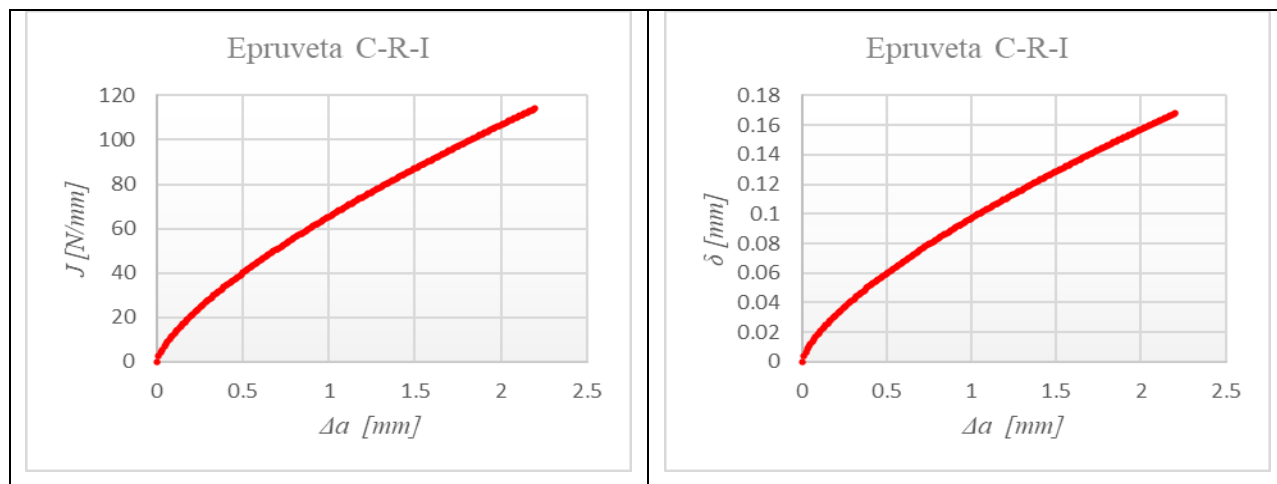
Slika 4.55. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - B-R-I



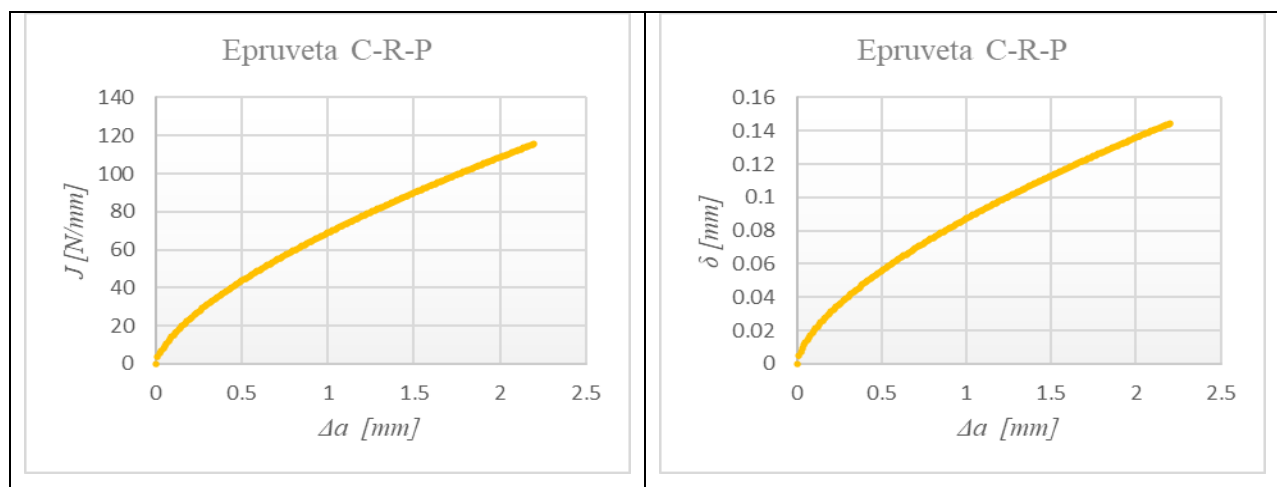
Slika 4.56. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - B-R-P



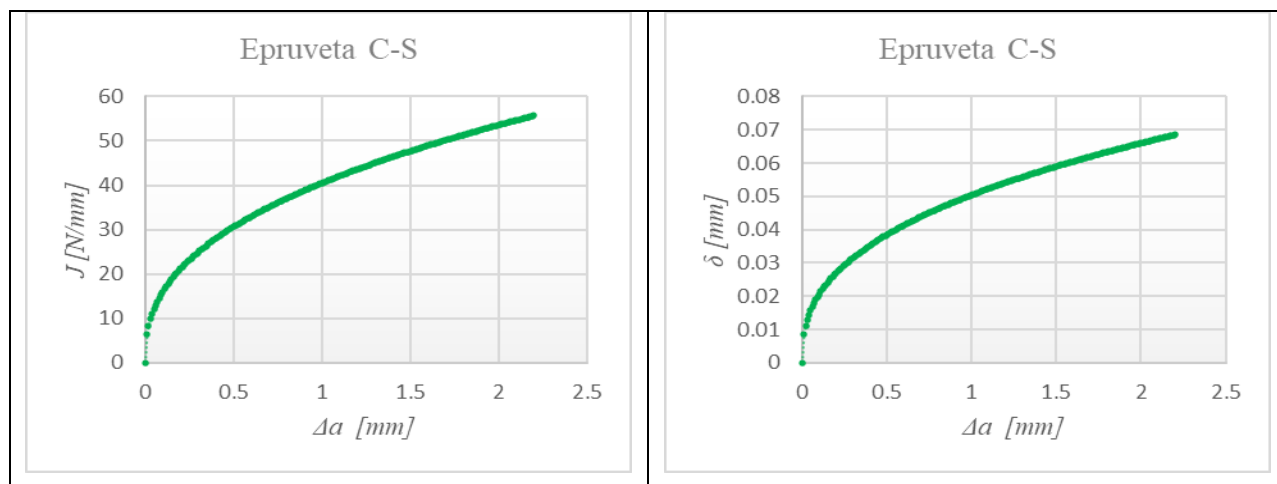
Slika 4.57. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/116 sa zarezom na sredini zavarenog spoja - B-R-S



Slika 4.58. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na strani napredovanja zavarenog spoja - C-R-I



Slika 4.59. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na povratnoj strani zavarenog spoja - C-R-P



Slika 4.60. Krive otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja 750/150 sa zarezom na sredini zavarenog spoja - C-R-S

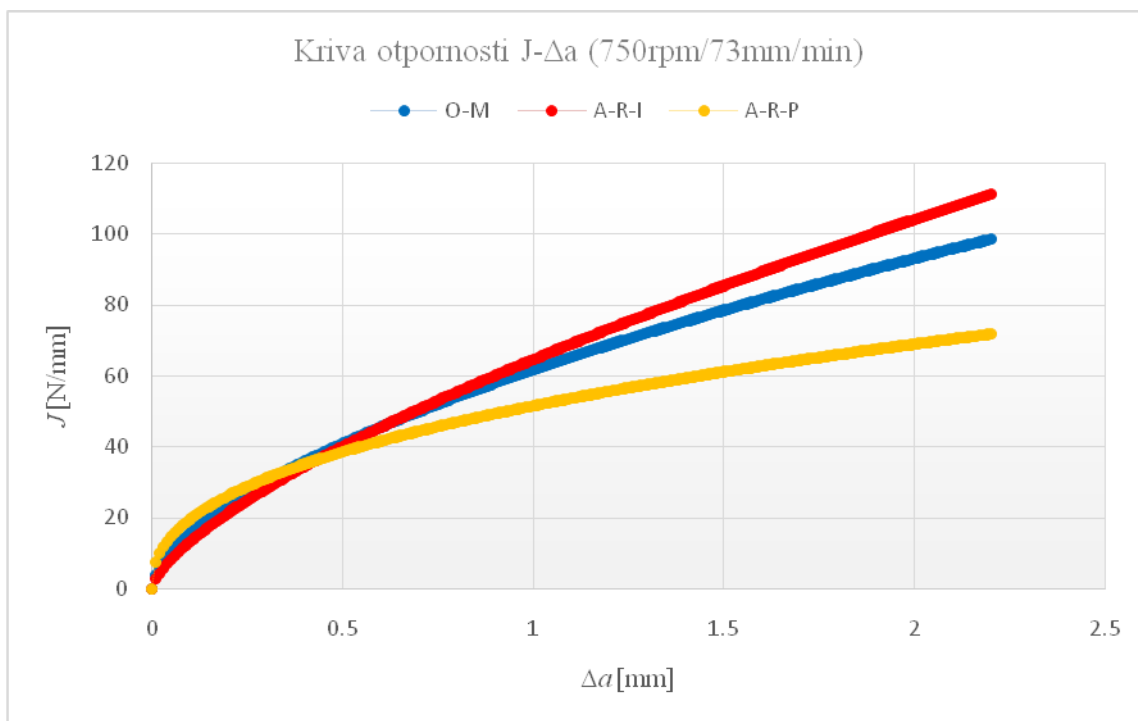
Kritična vrednosti J - integral, J_{IC} , kao i kritična vrednost otvaranja prsline δ_{IC} za različite strukture zavarenih spojeva, dobijenih različitim brzinama zavarivanja, određene su na osnovu kriva otpornosti, koje su date u Prilogu B. Na osnovu kritične vrednosti J_{IC} pomoću izraza (3.34), je posredno određena žilavost loma, K_{JIC} .

Vrednosti parametara mehanike loma: kritična vrednost J - integrala - J_{IC} , žilavosti loma K_{JIC} i otvaranja prsline δ_{IC} , kao i vrednosti J_{max} i δ_{max} za različite parametre zavarivanja i različite pozicije zarez u odnosu na pravac zavarivanja date su u tabeli 4.6.

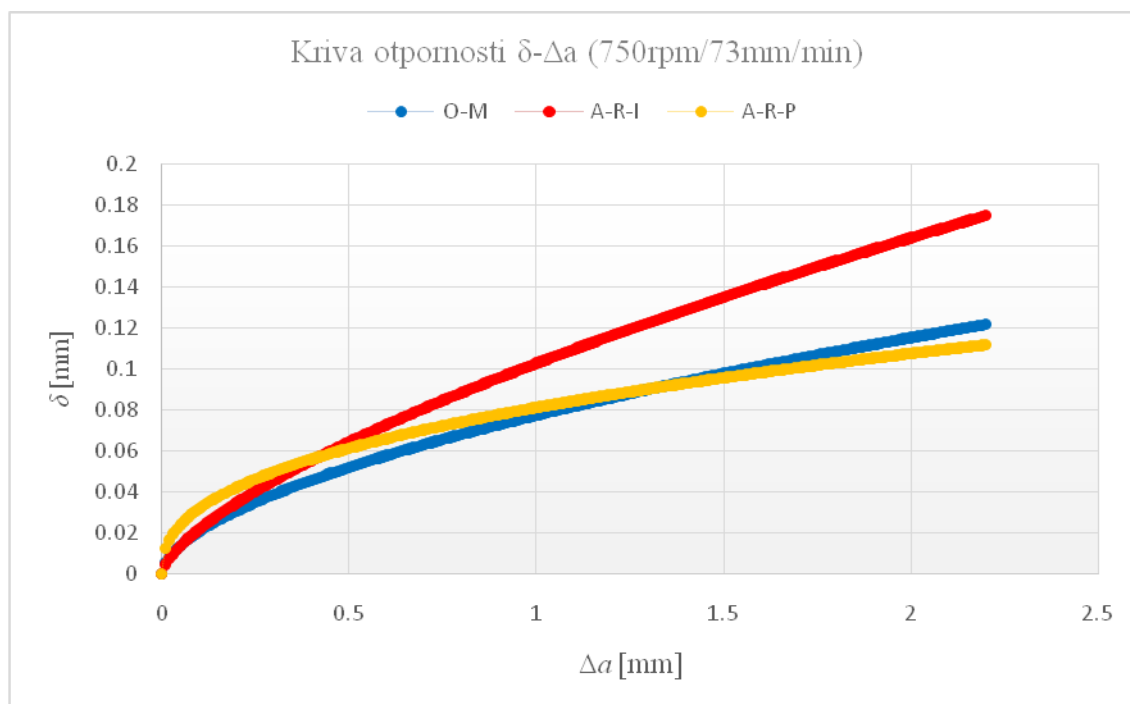
Tabela 4.6. Vrednosti parametara mehanike loma: kritična vrednost J integral - J_{IC} , žilavosti loma K_{JIC} i otvaranja prsline δ_{IC} za različite parametre zavarivanja i različite pozicije zarez u odnosu na pravac zavarivanja

	J_{IC}	K_{JIC}	δ_{IC}	J_{max}	δ_{max}
	N/mm	N/m ^{3/2}	mm	N/mm	mm
A-R-I	25	45,3	0,040	61,2	0,097
A-R-P	29	48,8	0,046	41,85	0,066
B-R-I	33.5	52.4	0,043	44,9	0,057
B-S	23	43	0,035	41,6	0,061
B-R-P	39	56,5	0,059	57,73	0,085
C-R-I	24,5	44,83	0,037	55,3	0,082
C-S	23	43,4	0,029	33,65	0,042
C-R-P	28	47,9	0,036	57,8	0,074
OM	27	47	0,035	61,2	0,077
-R-I – zarez na strani napredovanja zavarenog spoja -R-P – zarez na povratnoj strani zavarenog spoja -S – zarez na sredini zavarenog spoja OM – osnovni metal					

Na slici 4.61 i 4.62 dat je uporedni prikaz krivih otpornosti J - Δa i δ - Δa za parametar zavarivanja A-750/73.

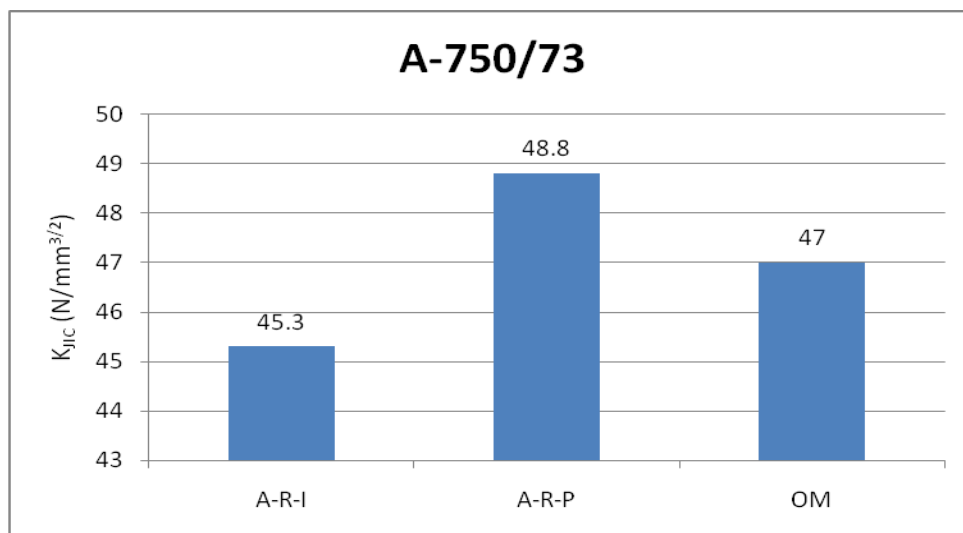


Slika 4.61 Uporedni prikaz krivih otpornosti J- Δa za parametar zavarivanja 750/73



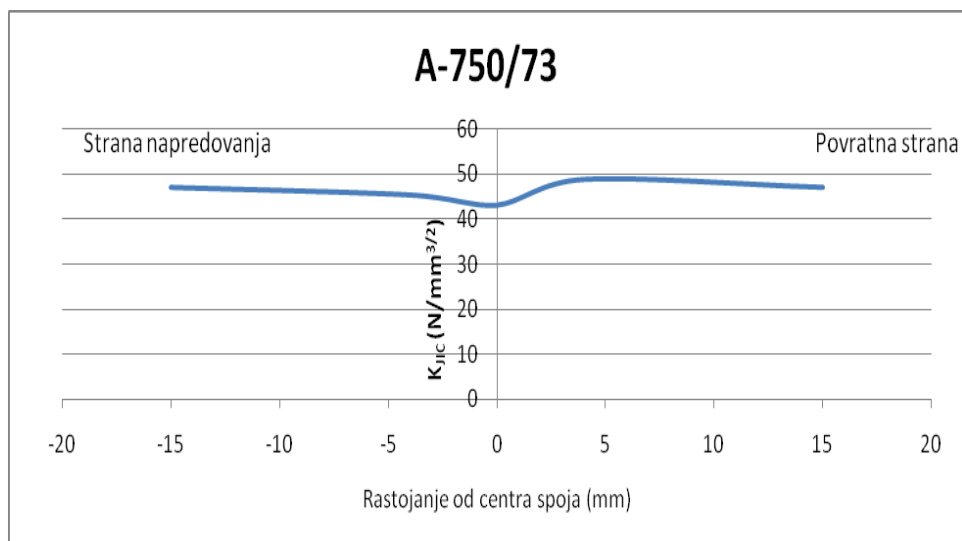
Slika 4.62. Uporedni prikaz krivih otpornosti δ - Δa za parametar zavarivanja 750/73

Vrednosti žilavosti loma K_{JIC} je najveća kod strukture zavarenog spoja na povratnoj strani A-R-P i iznosi $48,8 \text{ N/m}^{3/2}$ u odnosu na strukturu zavarenog spoja na strani napredovanja A-R-I gde iznosi $45,3 \text{ N/m}^{3/2}$ (slika 4.63).



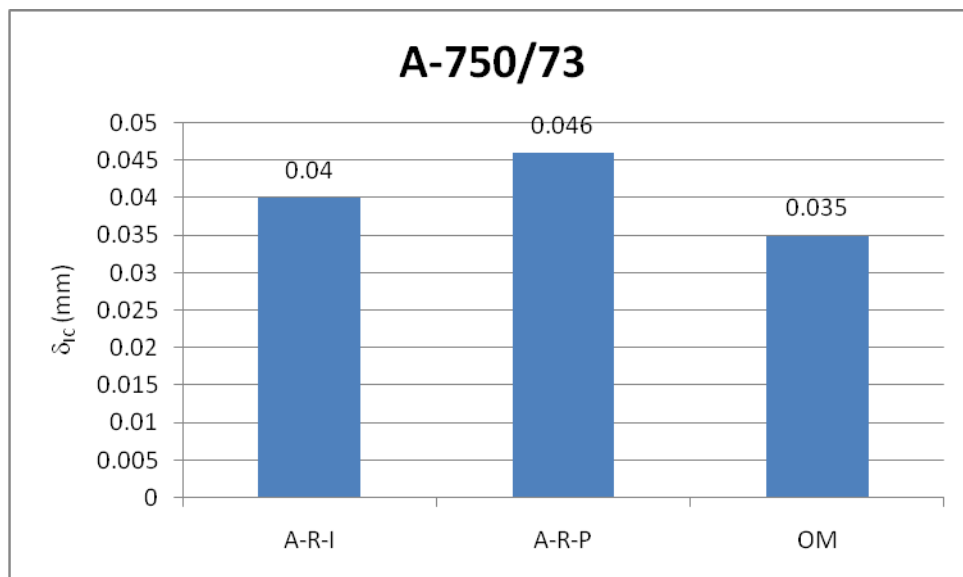
Slika 4.63. Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/73

Na slici 4.64 data je promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73.



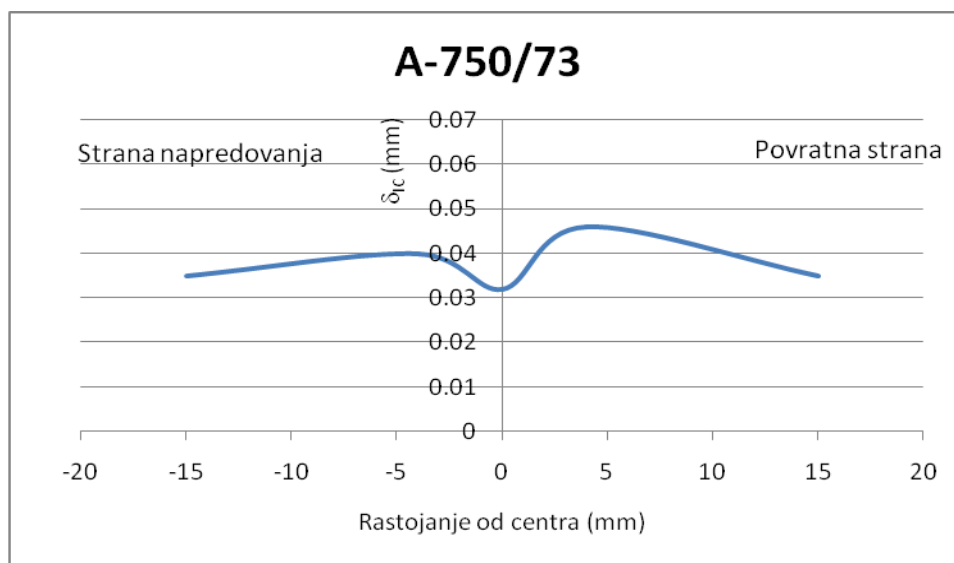
Slika 4.64. Promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73

Saglasno žilavosti loma na slici 4.64 date su uporedne vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} , koja je najveća za strukturu zavarenog spoja na povratnoj strani A-R-P i iznosi 0,046 mm (slika 4.65). Za strukturu zavarenog spoja na strani napredovanja A-R-I, otvaranje prsline δ_{IC} iznosi 0,04 mm.



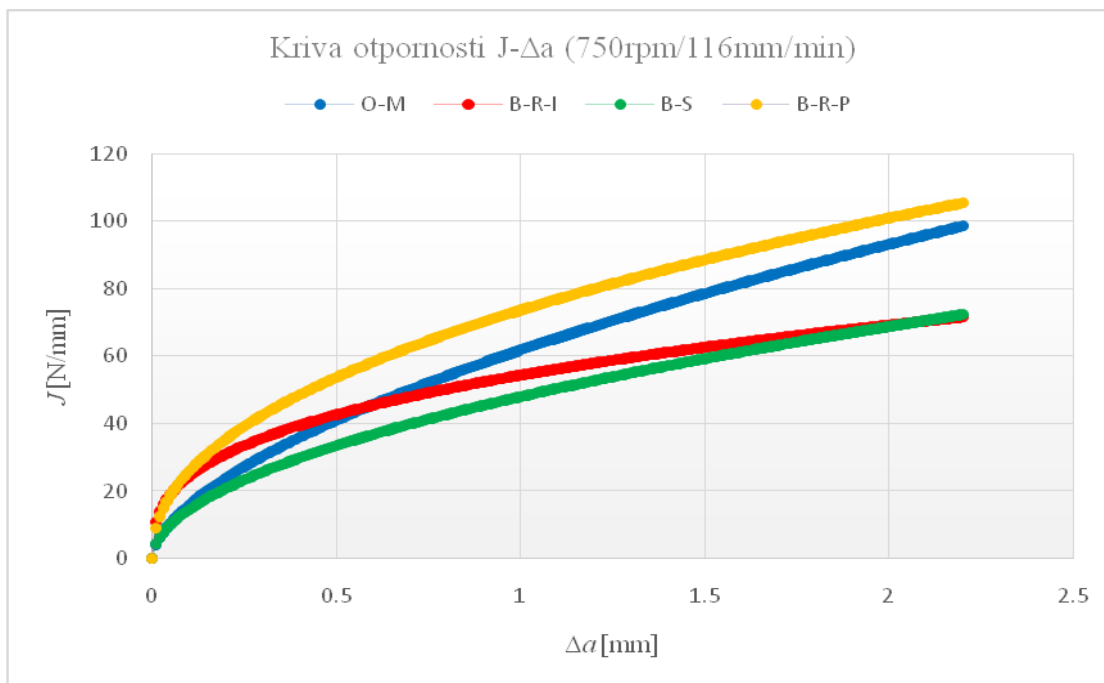
Slika 4.65. Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} za zavarene spojeve ostvarene parametrima A-750/73

Na slici 4.66 data je promena vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73.

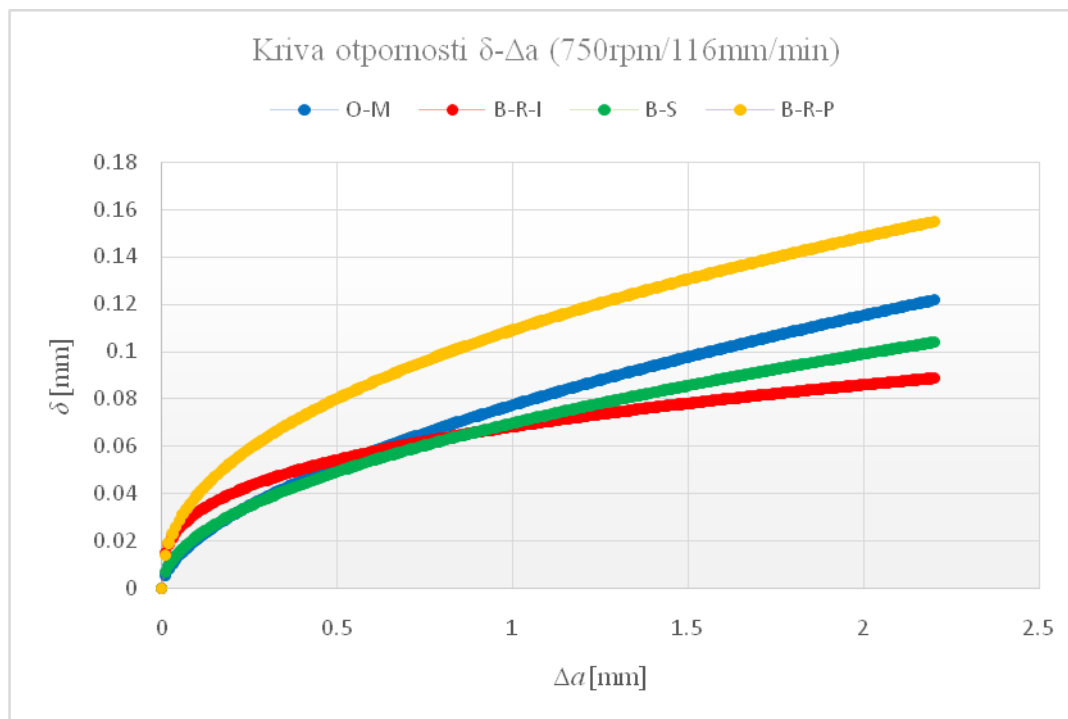


Slika 4.66. Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja A-750/73

Na slici 4.67 i 4.68 dat je uporedni prikaz krivih otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja B-750/116.

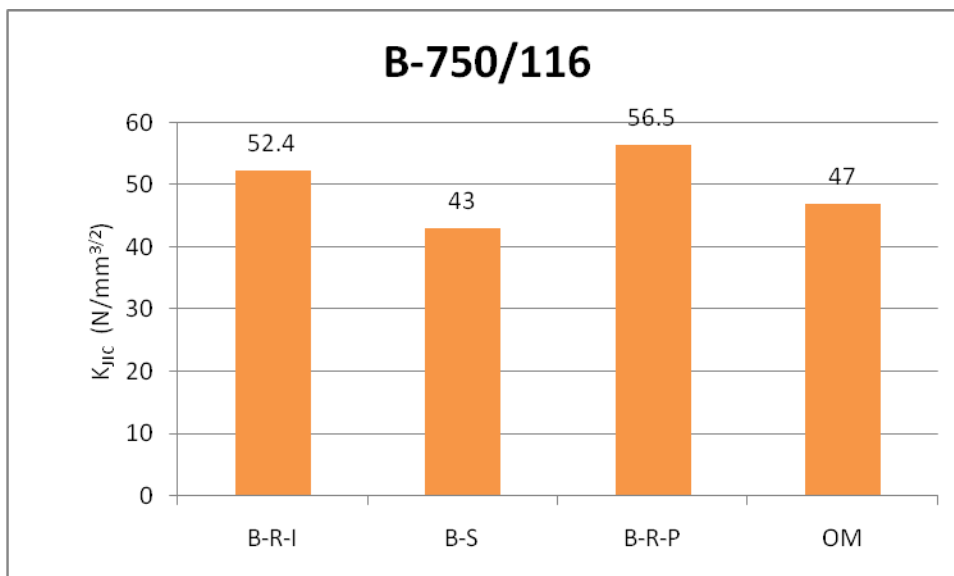


Slika 4.67. Uporedni prikaz krivih otpornosti $J-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116



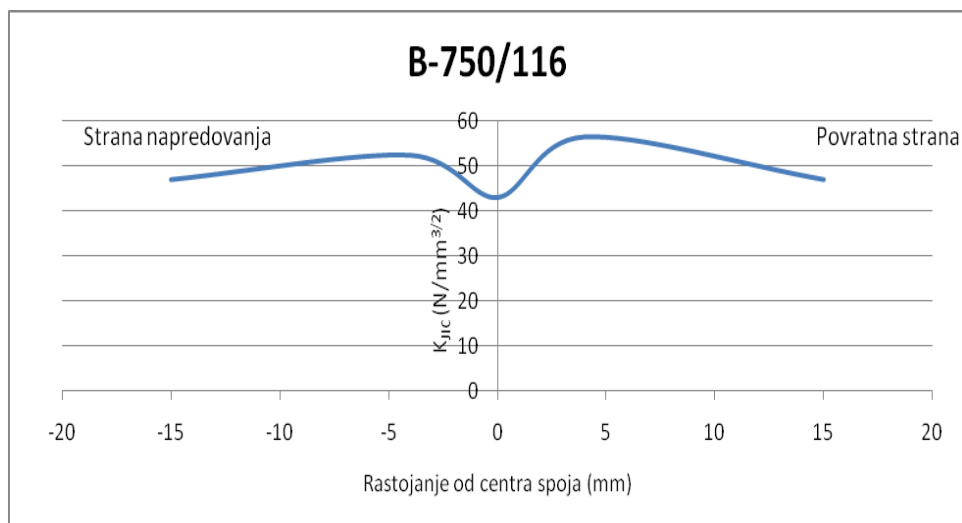
Slika 4.68. Uporedni prikaz krivih otpornosti $\delta-\Delta a$ za parametar zavarivanja 750/116

Vrednosti žilavosti loma K_{JIC} je najveća kod strukture zavarenog spoja na povratnoj strani B-R-P i iznosi $56,5 \text{ N/m}^{3/2}$ u odnosu na strukturu zavarenog spoja na strani napredovanja B-R-I, i na strukturu u sredini zavarenog spoja B-S, gde iznosi $52,4 \text{ N/m}^{3/2}$ odnosno $43 \text{ N/m}^{3/2}$, respektivno (slika 4.69).



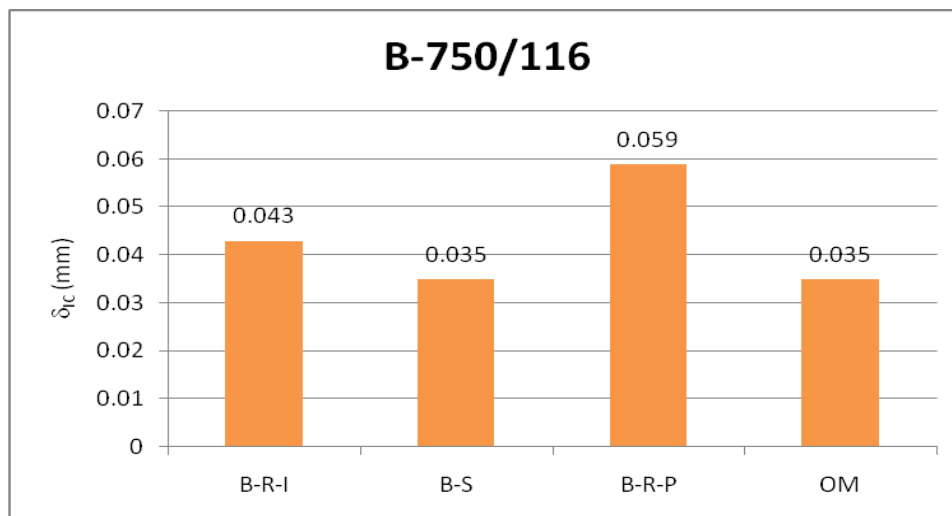
Slika 4.69. Uporedni prikaz vrednosti K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/116

Na slici 4.70 data je promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116.



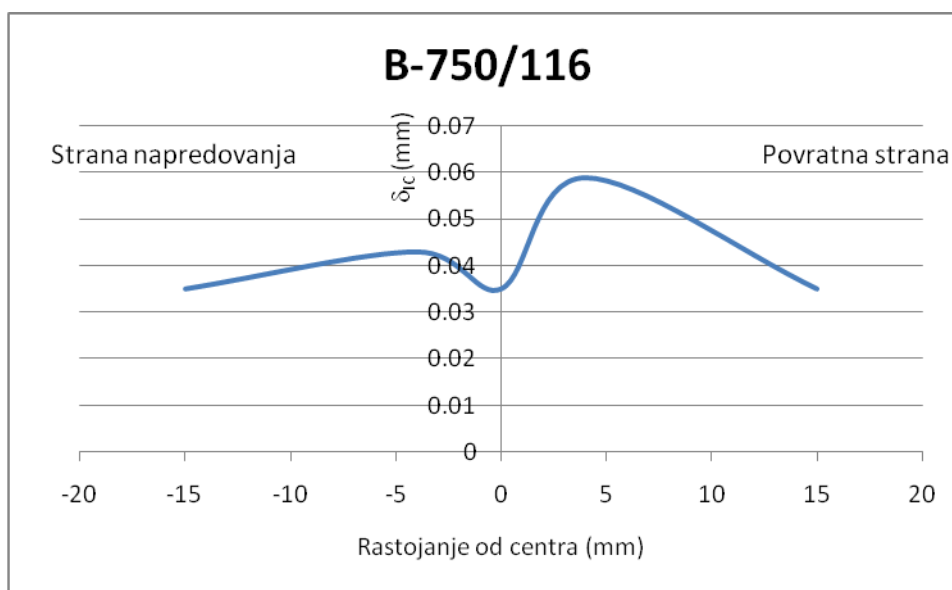
Slika 4.70. Promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116

Na slici 4.71 date su uporedne vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} . Najveća vrednost otvaranja prsline je za strukturu zavarenog spoja na povratnoj strani B-R-P i iznosi 0,059 mm u odnosu na strukture zavarenog spoja na strani napredovanja B-R-I i u sredini spoja B-S, koje iznose 0,043 mm, odnosno 0,035 mm, respektivno, odnosno kod osnovnog metala, gde iznosi 0,035 mm.



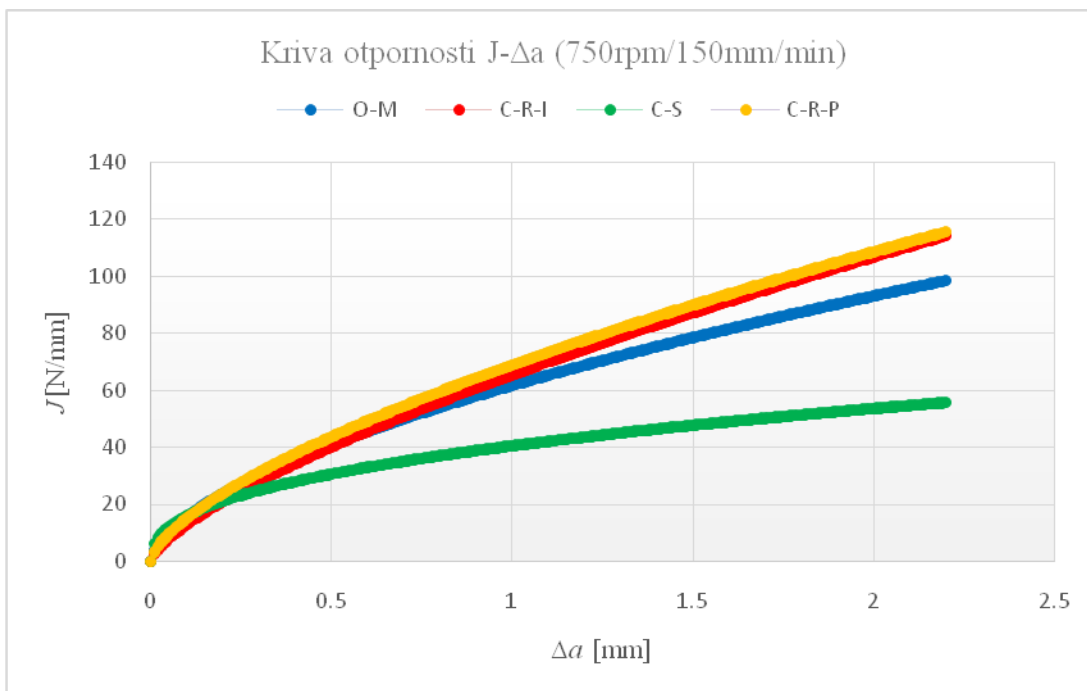
Slika 4.71. Uporedni prikaz vrednosti δ_{lc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/116

Na slici 4.72 data je promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116.

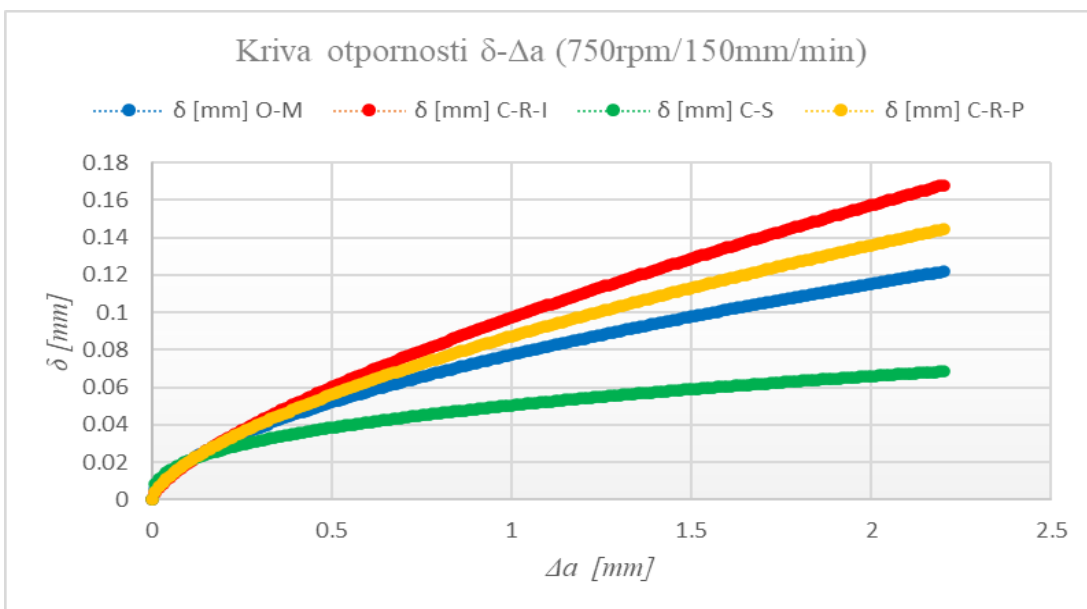


Slika 4.72. Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja B-750/116

Na slici 4.73 i 4.74 dat je uporedni prikaz krivih otpornosti J - Δa i (δ) - Δa za parametar zavarivanja C-750/150.



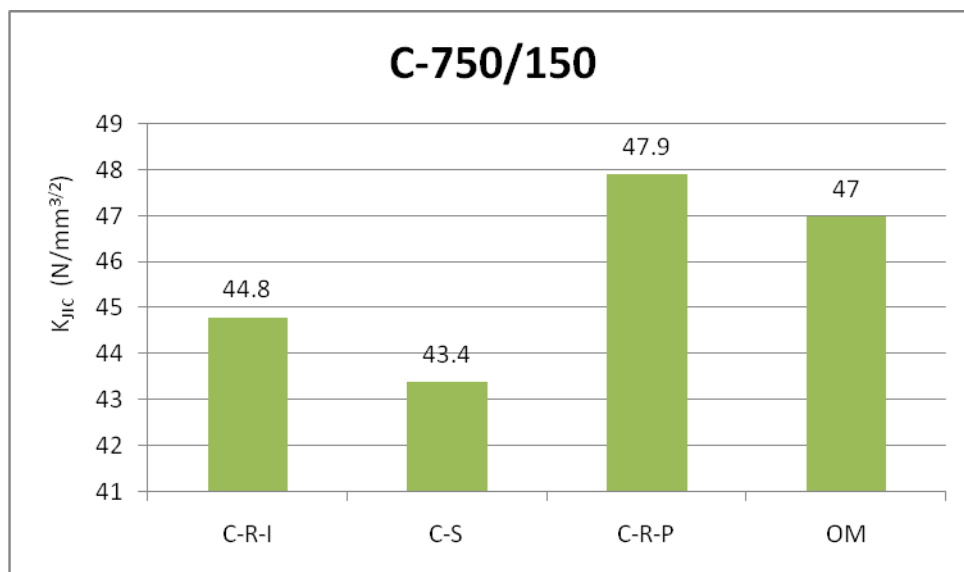
Slika 4.73. Uporedni prikaz krivih otpornosti J - Δa za parametar zavarivanja 750/116



Slika 4.74. Uporedni prikaz krivih otpornosti CTOD (δ)- Δa za parametar zavarivanja 750/150

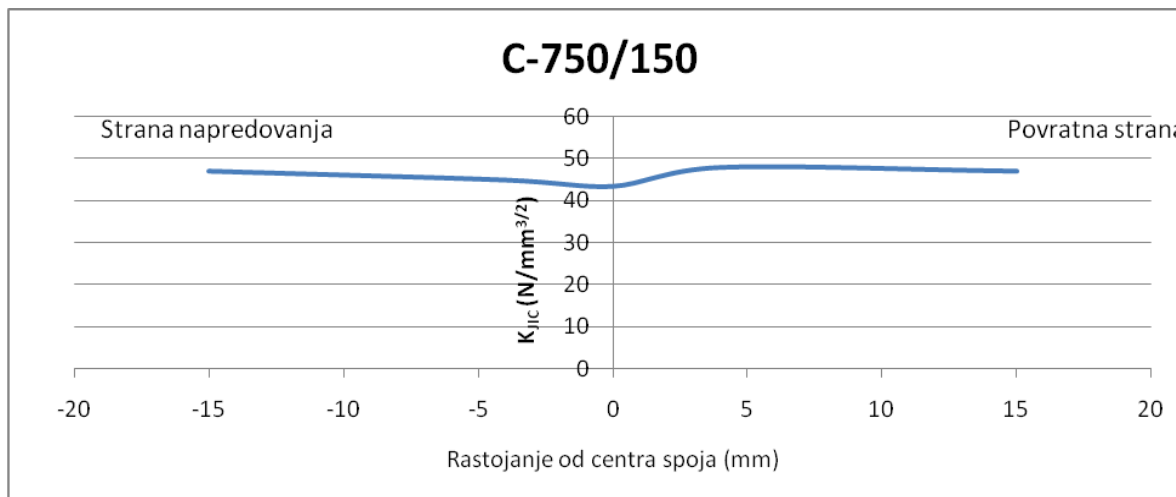
Za zavarene uzorke parametrima zavarivanja 750/150, najveća vrednost žilavosti loma K_{Jc} je, kao u prethodna 2 slučaja, kod strukture zavarenog spoja na povratnoj strani C-R-P i iznosi

47,9 N/m^{3/2} u odnosu na strukturu zavarenog spoja na strani napredovanja C-R-I, i na strukturu u sredini zavarenog spoja C-S gde iznosi 44,9 N/m^{3/2}, odnosno 43,4 N/m^{3/2}, respektivno (slika 4.75).



Slika 4.75. Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{IIC} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/150

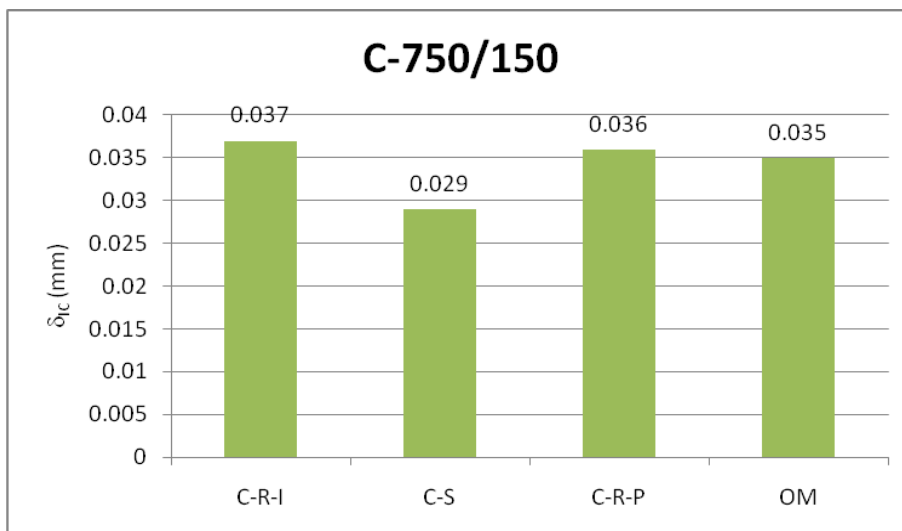
Na slici 4.76 data je promena žilavosti loma kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150.



Slika 4.76. Promena žilavosti loma K_{IIC} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150

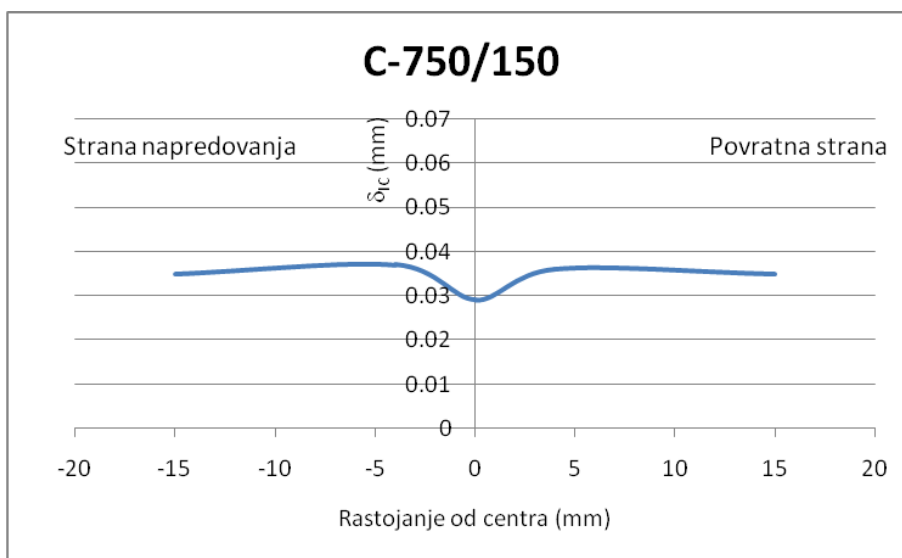
Na slici 4.77 date su uporedne vrednosti otvaranja prsline δ_{Ic} za strukture dobijene parametrima zavarivanja C-750/150. Najveća vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} je za strukturu

zavarenog spoja na strani napredovanja C-R-I i iznosi 0,037 mm. Približno istu vrednost ima otvaranje prsline na povratnoj strani i iznosi 0,036 mm. Otvaranje prsline, δ_{lc} , za strukturu zavarenog spoja u sredini C-S iznosi najmanje, 0,029 mm.



Slika 4.77. Uporedni prikaz vrednosti δ_{lc} za zavarene spojeve ostvarene parametrima 750/150

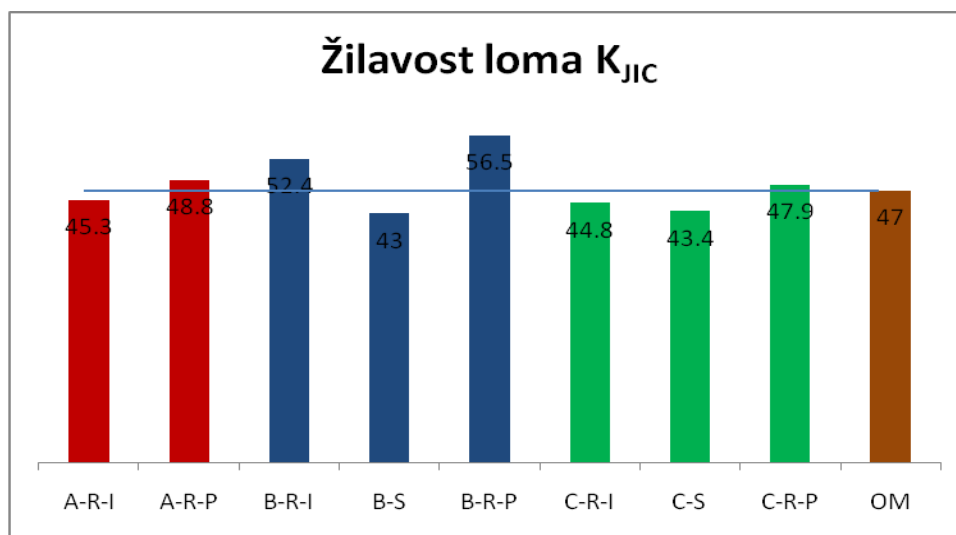
Na slici 4.78 data je promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150.



Slika 4.78. Promena vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} kroz poprečni presek zavara u funkciji udaljenosti od centra zavarenog spoja za parametre zavarivanja C-750/150

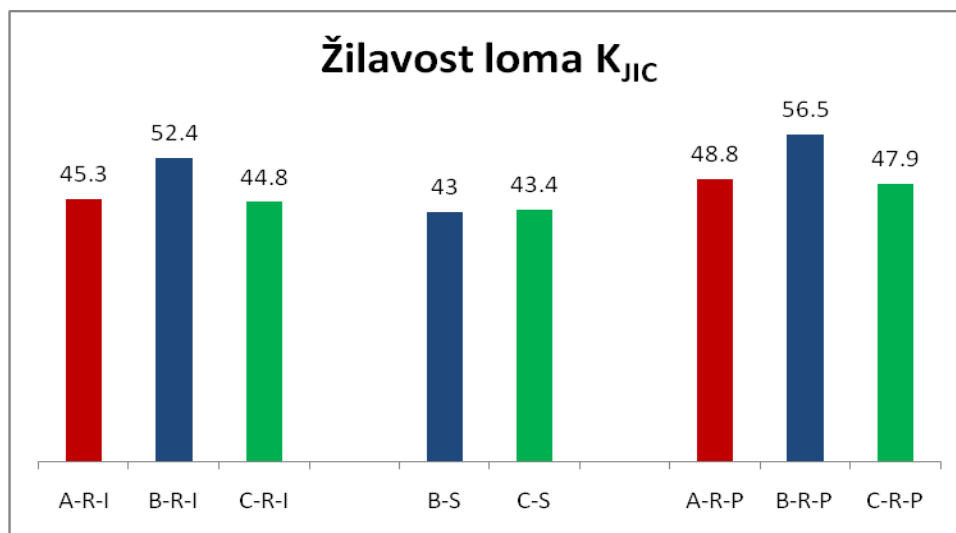
Analizom rezultata žilavosti loma može se zaključiti da je za sve parametre zavarivanja, struktura zavarenog spoja na povratnoj strani ima najveću žilavost loma, odnosno poseduje

izraženiju otpornost prema širenju prsline od strukture na strani napredovanja kod svih ispitanih uzoraka (slika 4.79). Za sve zavarene spojeve, upoređenjem žilavosti loma na strani napredovanja, na sredini spoja i na povratnoj strani, može se zaključiti da je u svim slučajevima žilavost loma najveća na povratnoj strani, a najmanja na sredini spoja odnosno $K_{JIC} (-R-P) > K_{JIC} (-R-I) > K_{JIC} (-S)$, što je saglasno [71]. Sa slike 4.79, takođe se uočava da strukture zavarenog spoja za sve parametre zavarivanja na povratnoj strani A-R-P, B-R-P i C-R-P imaju veću žilavost loma od osnovnog metala OM. Takođe i struktura B-R-I ima veću žilavost loma od osnovnog metala OM.



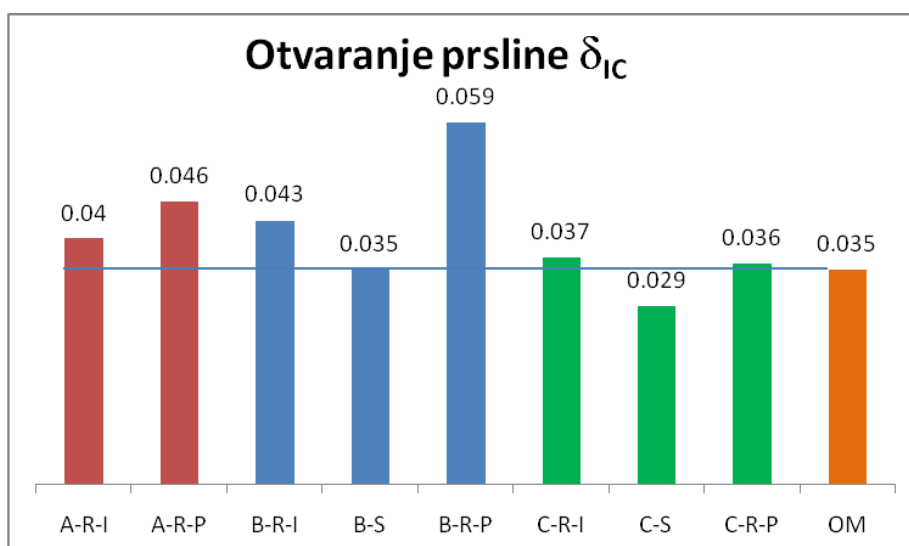
Slika 4.79. Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja i različite pozicije zareza u odnosu na pravac zavarivanja

Ako se upoređi žilavost loma struktura dobijenih različitim parametrima zavarivanja na istoj poziciji zavarenog spoja, onda se može zaključiti da na povratnoj strani i strani napredovanja strukture zavarenog spoja ostvarene parametrima zavarivanja B-750/116 imaju najveću žilavost loma, a zatim slede zavareni spojevi dobijeni parametrima zavarivanja A-750/73 i C-750/150 koji imaju približno 15% manju žilavost loma. Kada je u pitanju sredina zavarenog spoja, strukture zavarenih spojeva imaju približno jednaku žilavost loma (slika 4.80).



Slika 4.80. Uporedni prikaz vrednosti žilavosti loma K_{JIC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja na istim pozicijama zareza (strana napredovanja, sredina spoja i povratna strana) u odnosu na pravac zavarivanja

Analizom rezultata otvaranja prsline δ_{IC} može se zaključiti da je za sve parametre zavarivanja (A-750/73; B-750/116; C-750/150), struktura zavarenog spoja na povratnoj strani ima najveću vrednost otvaranja prsline δ_{IC} (slika 4.81). Za sve zavarene spojeve, upoređenjem otvaranja prsline na strani napredovanja, na sredini spoja i na povratnoj strani, može se zaključiti da je u svim slučajevima žilavost loma najveća na povratnoj strani, a najmanja na sredini spoja odnosno $\delta_{IC} (-R-P) > \delta_{IC} (-R-I) > \delta_{IC} (-S)$.



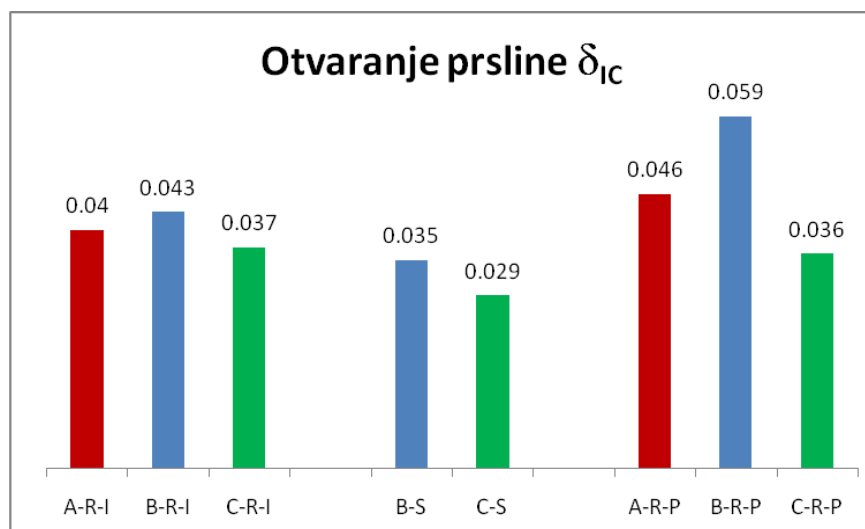
Slika 4.81. Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{IC} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja i različite pozicije zareza u odnosu na pravac zavarivanja

Ako se otvaranje prsline struktura dobijenih različitim parametrima zavarivanja na istoj poziciji zavarenog spoja, onda se može zaključiti sledeće:

Na povratnoj strani zavarenog spoja otvaranje prsline δ_{lc} za parametre zavarivanja B-750/116 ima za 30% veću vrednost u odnosu na strukturu zavarenog spoja dobijenu parametrima zavarivanja A-750/73, odnosno za 60% veću vrednost u odnosu na strukturu zavarenog spoja dobijenu parametrima zavarivanja C-750/150 (slika 4.82).

Na strani napredovanja strukture je slična situacija. Otvaranje prsline δ_{lc} za parametre zavarivanja B-750/116 ima za 10% veću vrednost u odnosu na strukturu zavarenog spoja dobijenu parametrima zavarivanja A-750/73, odnosno za 15% veću vrednost u odnosu na strukturu zavarenog spoja dobijenu parametrima zavarivanja C-750/150.

Kada je u pitanju sredina zavarenog spoja, takođe otvaranje prsline δ_{lc} za parametre zavarivanja B-750/116 ima za 20% veću vrednost u odnosu na strukturu zavarenog spoja dobijenu parametrima zavarivanja C-750/150.



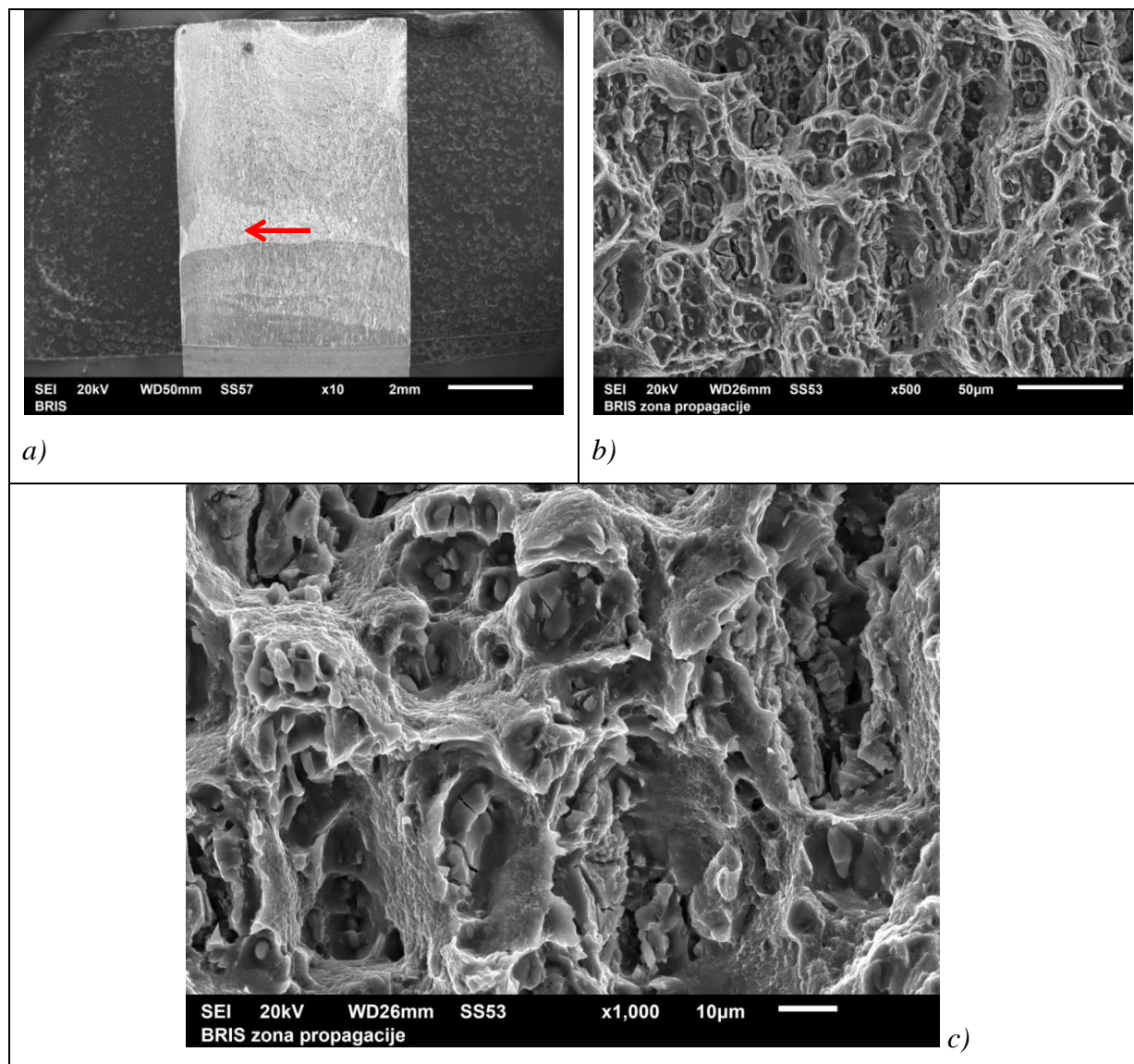
Slika 4.82. Uporedni prikaz vrednosti otvaranja prsline δ_{lc} za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja na istim pozicijama zarez (strana napredovanja, sredina spoja i povratna strana) u odnosu na pravac zavarivanja

4.9.1. SEM fraktografska analiza prelomnih površina SENB epruveta

Nakon sprovedenog eksperimentalnog određivanja parametara mehanike loma u uslovima elastično-plastične mehanike loma koji je definisana standardom ASTM E 1820, vršena je SEM

fraktografska analiza prelomnih površina SENB epruveta za neke strukture ZTM zavarenog spoja: B-R-I, B-S, C-R-P i C-S.

Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-R-I – zone propagacije je data na slici 4.83, a, b, c.

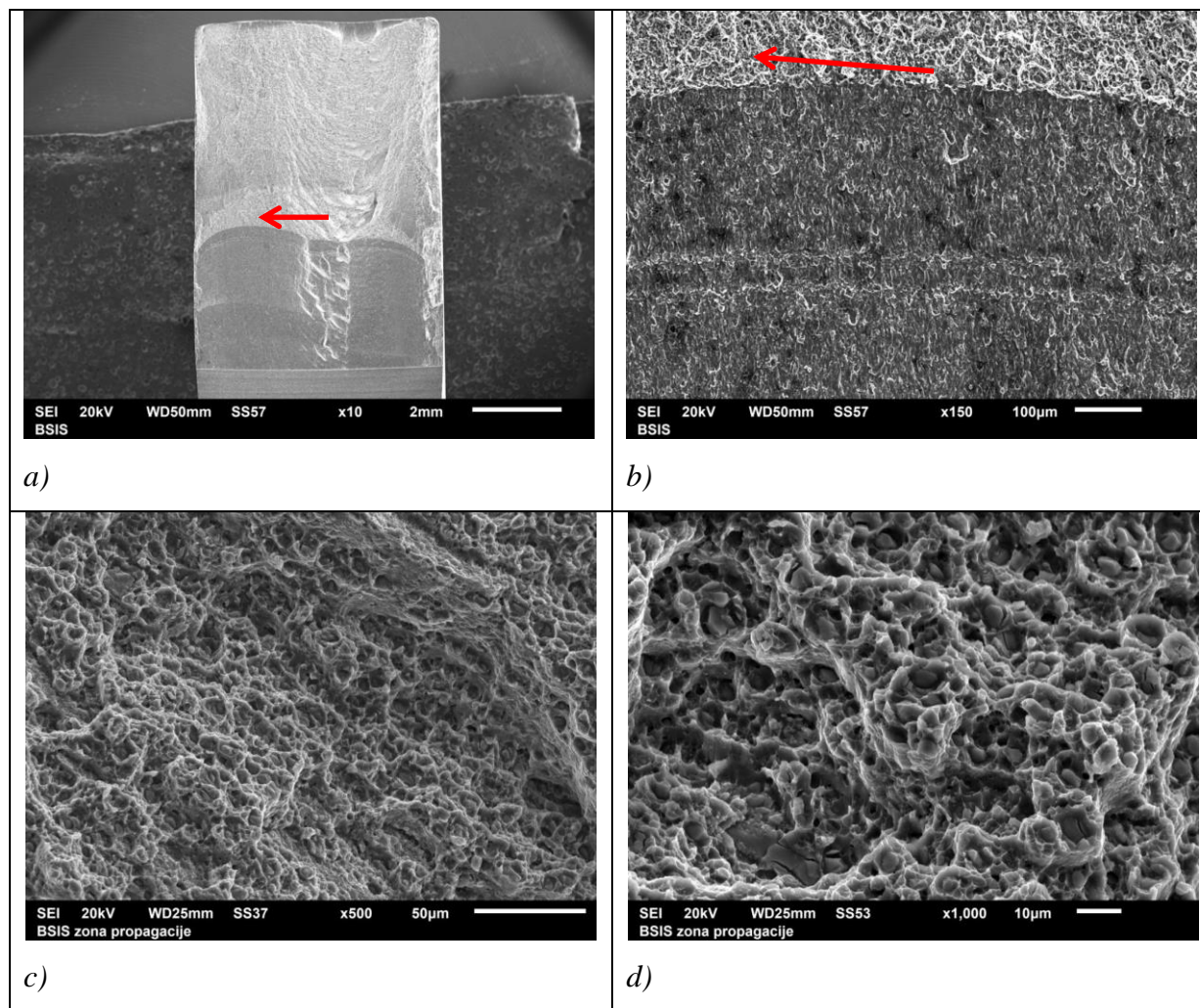


Slika 4.83. Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-R-I

Površina propagacije zamorne prsline na uzorku B-R-I je tipična za ZTMU, tj mikrostrukturu sa nehomogenom raspodelom čestica faza, različite veličine. Na slici (500x) se uočavaju naizmenično oblasti sa krupnim jamicama nastalim na krupnim česticama sekundarne

faze i grebenima, sačinjeni od izduženih sitnih i plitkih jamica, nastalih na česticama taloga. Ovakva morfologija površine je u skladu sa mikrostrukturom uzorka u ZTMU.

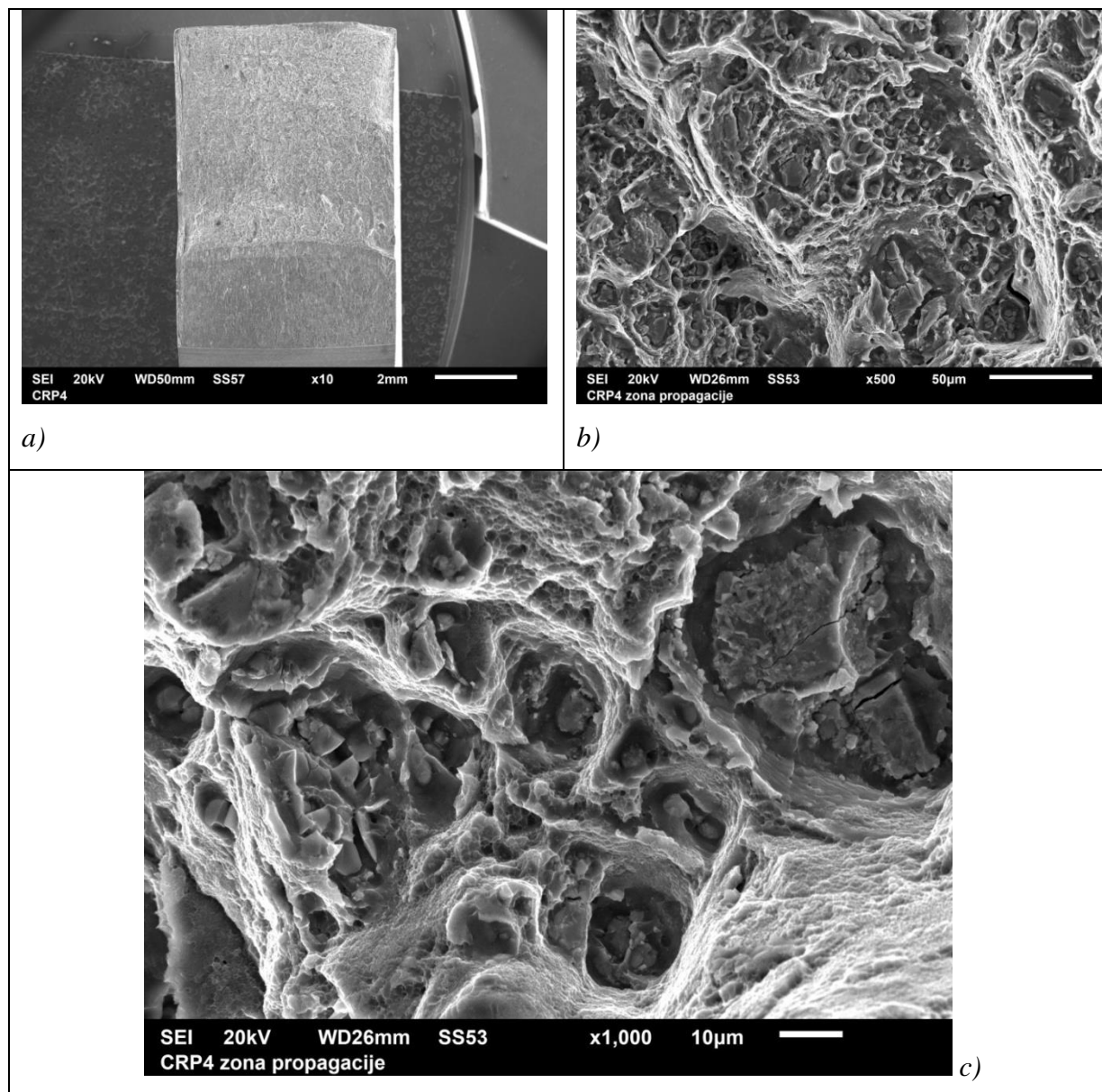
Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-S – zone propagacije su date na slikama 4.84, a, b, c, d.



Slika 4.84. Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine B-S

Na uzorku B-S uočava se jamičasti (transkristalni, žilavi) lom u zoni propagacije zamorne prsline (crvena strelica) i 2 slike ispod. Jamice su sitne i prilično ujednačene po veličini, što pokazuje da je prsline propagirala kroz zonu jezgra.

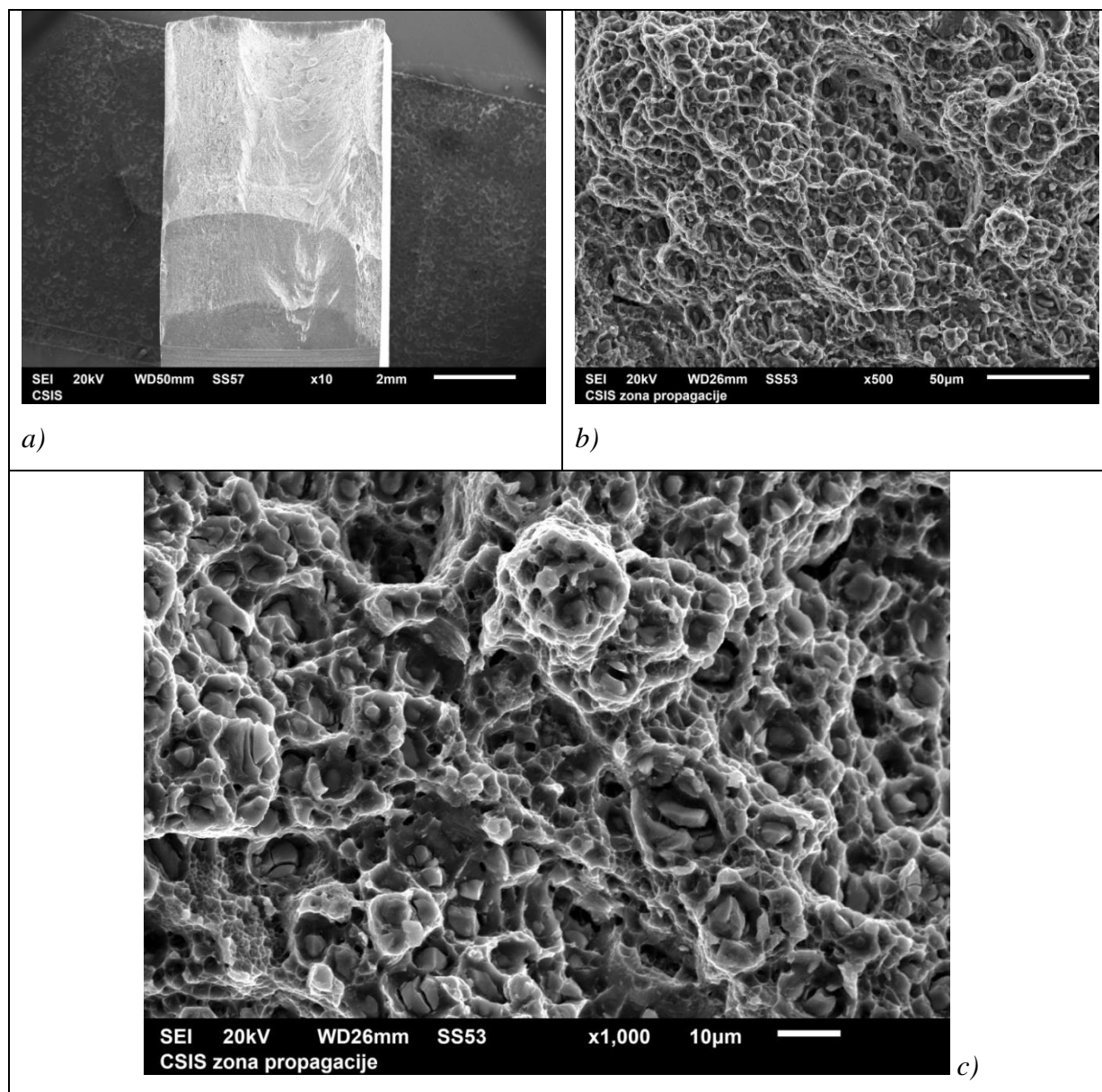
Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-R-P – zone propagacije su date na slikama 4.85, a, b, c.



Slika 4.85. Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-R-P

Površina propagacije zamorne prsline na uzorku C-R-P je tipična za zonu termomehaničkog uticaja - ZTMU, tj mikrostruktura je sa nehomogenom raspodelom čestica faza, različite veličine. Na slici (500x) se uočavaju naizmenično oblasti sa krupnim jamicama nastalim na krupnim česticama sekundarne faze i grebenima, sačinjeni od izduženih sitnih i plitkih jamica, nastalih na česticama taloga. Ovakva morfologija površine je u skladu sa mikrostrukturuom uzorka u ZTMU, gde su prisutne naizmenično oblasti sa usmerenim krupnijim i sitnijim česticama (slika 4.83).

Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-S – zone propagacije su date na slikama 4.86, a, b, c.



Slika 4.86. Makrostruktura i mikrostruktura prelomne površine C-S

Kod uzorka C-S površina ima ista svojstva kao i kod uzorka B-S. U jamicama se uočavaju čestice i fragmenti čestica retko većih od 5 µm.

Poređenjem površina uzorka B-S i C-S nije moguće uočiti razliku u veličini jamica, odnosno čestica prisutnih faza.

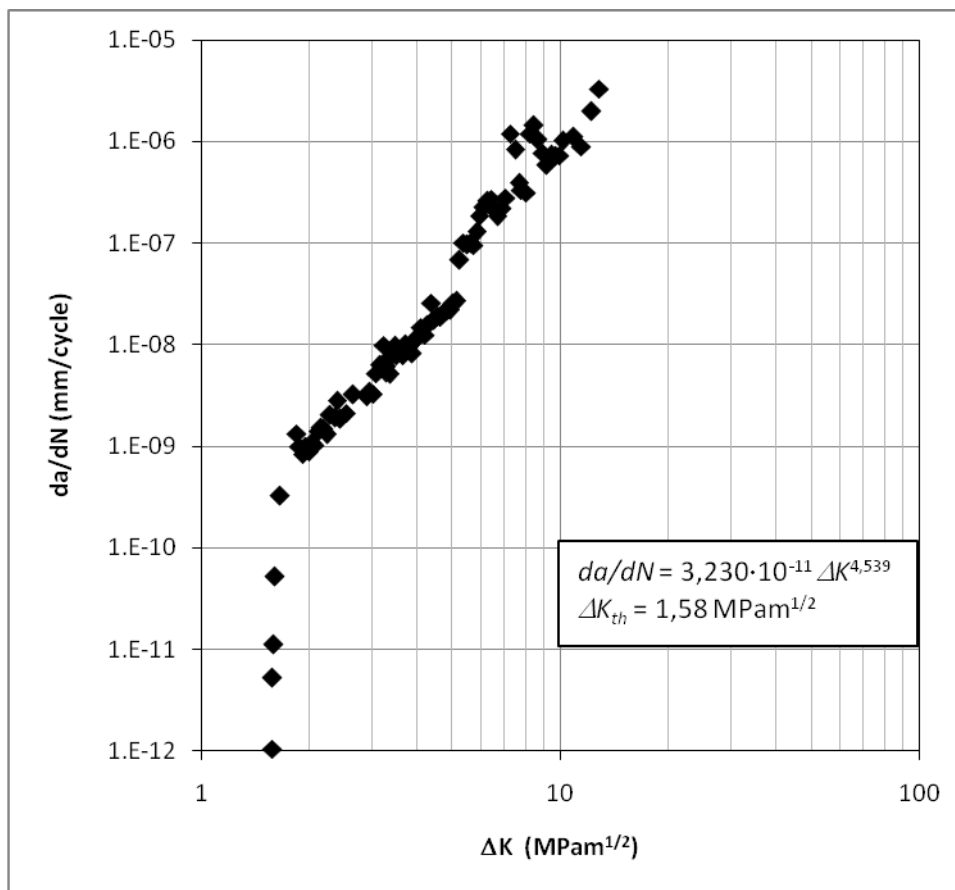
4.10. REZULTATI BRZINE RASTA ZAMORNE PRSLINE

Brzina rasta zamorne prsline ispitana je za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja, tako što je vrh zarez bio smešten u sredini zavarenog spoja. Sva ispitivanja brzine rasta zamorne prsline su vršena na sobnoj temperature ($+20 \pm 2$ °C). Dobijeni dijagrami brzine rasta zamorne prsline, da/dN su u funkciji promene opsega faktora intenziteta napona ΔK , za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima, su dobijeni za epruvete sa vrhom zamorne prsline u zoni termomehaničkog uticaja - ZTMU. Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 4.87, 4.88 i 4.89.

Centralni, pravolinijski deo krive brzine rasta zamorne prsline je definisan Parisovom jednačinom $da/dN = C \cdot (\Delta K)^m$. Brzina rasta prsline je u funkciji konstante materijala C i m i opsega faktora intenziteta napona ΔK . Konstante C i m su određene fitovanjem krive na osnovu eksperimentalnih rezultata.

Prag zamora, ΔK_{th} , se dobija na osnovu brzine rasta zamorne prsline $da/dN=10^{-10}$ m/ciklus. Radi poređenja, brzine rasta zamorne prsline da/dN , za sve zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja, su određene za usvojenu vrednost opsega faktora intenziteta napona $\Delta K=10$ MPa·m^{1/2}.

Na slici 4.87 dat je dijagram $da/dN - \Delta K$ za zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja A-750/73 sa vrhom zamorne prsline u sredini zavarenog spoja.



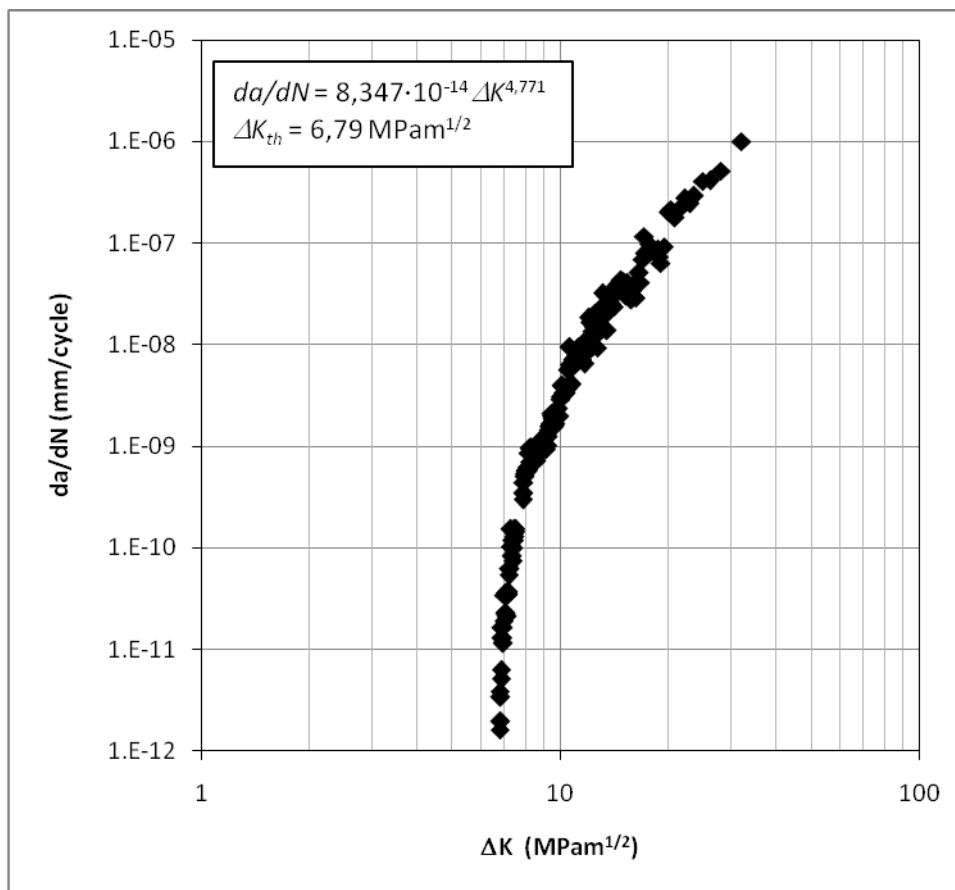
Slika 4.87. Dijagram da/dN - ΔK za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja A-750/73

U tabeli 4.7 dati su parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja A-750/73.

Tabela 4.7. Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja A-750/73

Prag faktora intenziteta napona ΔK_{th}	Koeficijent C	Eksponent m	Brzina rasta prsline na $\Delta K=10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ da/dN
$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	-	-	mm/ciklus
1,58	$3,23 \cdot 10^{-11}$	4,539	$1,11738 \cdot 10^{-6}$

Na slici 4.88 dat je dijagram da/dN – ΔK za zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja B-750/116 sa vrhom zamorne prsline u sredini zavarenog spoja.



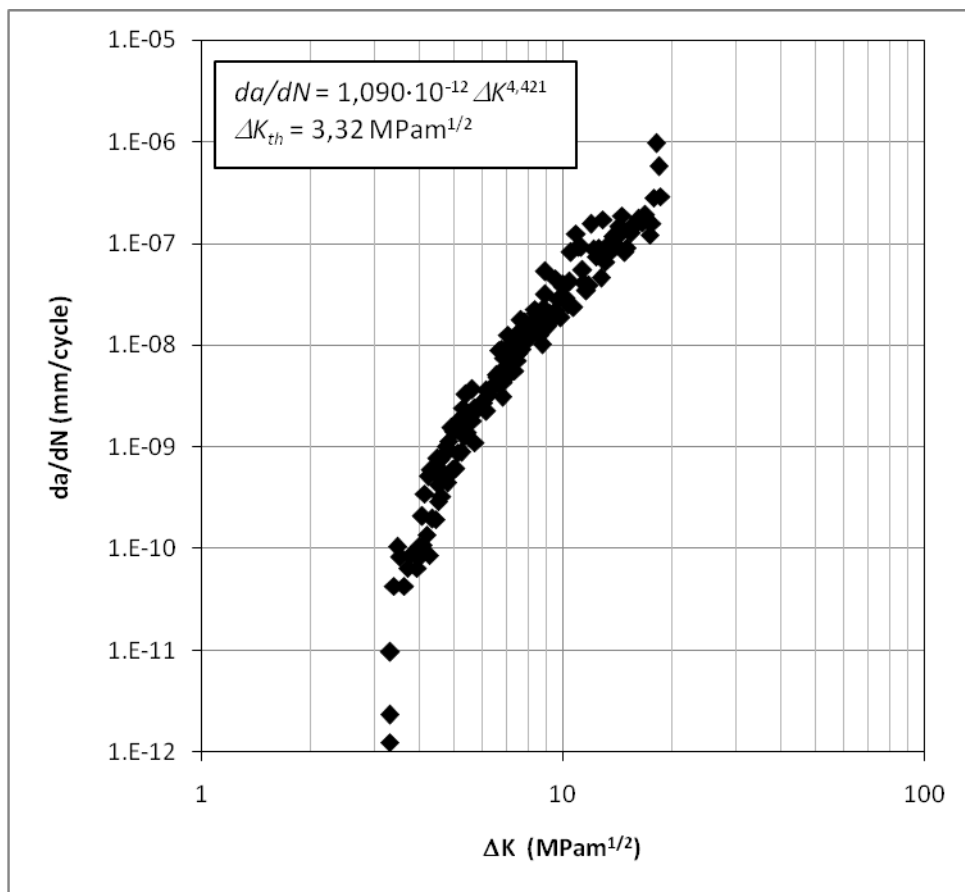
Slika 4.88. Dijagram da/dN - ΔK za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja B-750/116

U tabeli 4.8 dati su parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja B-750/116.

Tabela 4.8. Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja B-750/116

Prag faktora intenziteta napona ΔK_{th}	Koeficijent C	Eksponent m	Brzina rasta prsline na $\Delta K=10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ da/dN
$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	-	-	mm/ciklus
6,79	$8,347 \cdot 10^{-14}$	4,771	$4,92641 \cdot 10^{-9}$

Na slici 4.89 dat je dijagram da/dN – ΔK za zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja C-750/150 sa vrhom zamorne prsline u sredini zavarenog spoja.



Slika 4.89. Dijagram da/dN - ΔK za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog parametrima zavarivanja C-750/150

U tabeli 4.9 dati su parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja C-750/150.

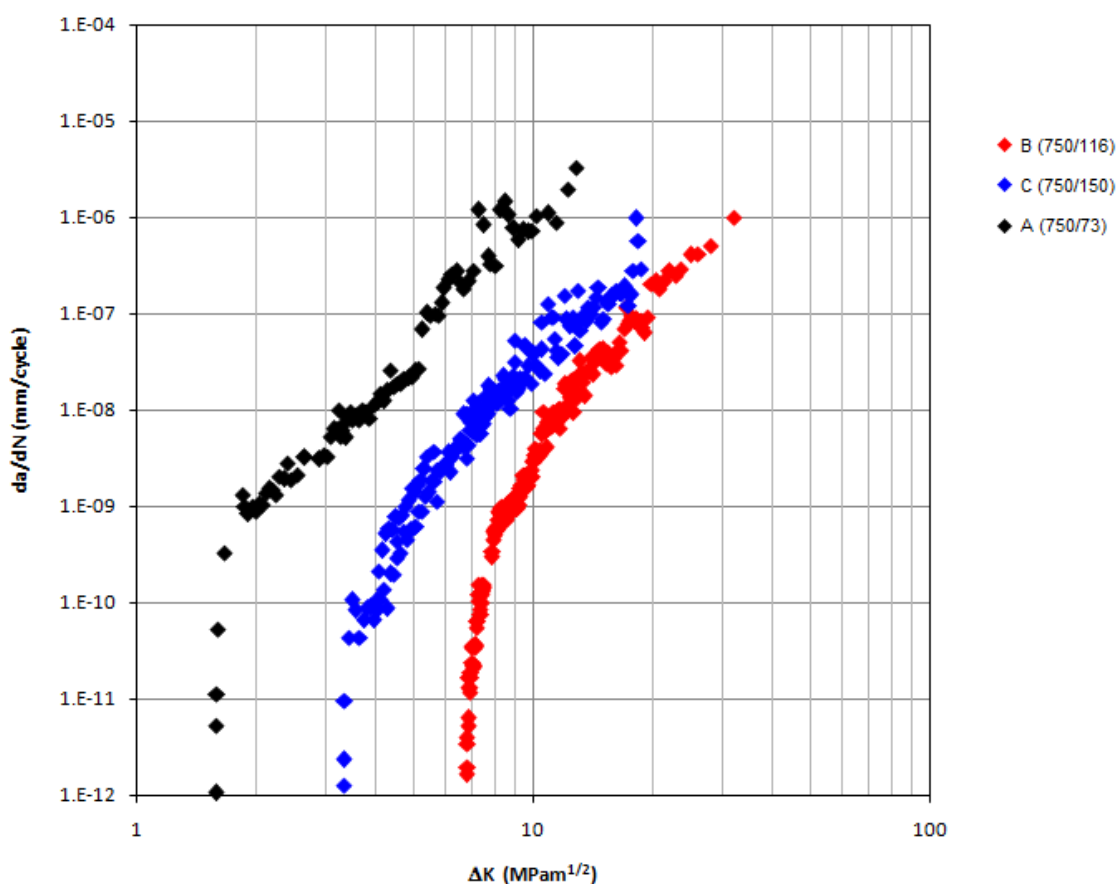
Tabela 4.9. Parametri Parisove jednačine za prslinu u zavarenom spoju ostvarenog parametrima zavarivanja C-750/150

Prag faktora intenziteta napona ΔK_{th}	Koeficijent C	EkspONENT m	Brzina rasta prsline na $\Delta K=10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ da/dN
$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	-	-	mm/ciklus
3,32	$1,09 \cdot 10^{-12}$	4,421	$2,8736 \cdot 10^{-8}$

U zavisnosti od parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem razlikuje se struktura zavarenog spoja pa otuda različite vrednosti praga zamora, ΔK_{th} što se najjasnije vidi na slici 4.90. Vrednost ΔK_{th} iznosi 1,58, 6,79 i 3,32 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, respektivno za strukture zavarenih spojeva ostvarene parametrima zavarivanja A-750/73, B-750/116 i C-750/150. Može se zaključiti da

najveću vrednost ΔK_{th} odnosno najbolju otpornost na širenje već postojeće prsline ima zavareni spoj ostvaren parametrima B-750/116.

Jedan od pokazatelja ponašanja zavarenog spoja ostvarenih različitim parametrima je povezan sa promenom nagiba fitovane prave u delu Parisove relacije. Sa slike 4.90 se uočava da je najmanji nagib ima zavareni spoj sa parametrima B-750/116, dok najveći ima spoj ostvaren parametrima C-750/150. Dakle, iz dobijenih rezultata može da se zaključi da najslabiju otpornost na širenje zamorne prsline, odnosno najveću brzinu rasta zamorne prsline, da/dN ima uzorak zavaren sa parametrima zavarivanja C-750/150.



Slika 4.90. Uporedni rezultati da/dN - ΔK za epruvete sa vrhom zamorne prsline u sredini ZTM zavarenog spoja ostvarenog različitim parametrima zavarivanja

4.11. REZULTATI ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI NA ELEKTRO-DINAMIČKOM VIBRACIONOM STOLU

Na osnovu ustanovljene šeme ispitivanja date u tabeli 3.7 vršeno je ispitivanje na zamaranje na elektro-dinamičkom vibracionom stolu sa konstantnom amplitudom vibracionog

stola. Kriterijum ispitivanja bio je otkaz - lom epruvete. Za svaku epruvetu se registruje broj otkaza do loma [126]. Kriterijum za određivanje trajne dinamičke izdržljivosti je bio broj 2×10^6 ciklusa. Amplituda vibracionog stola je bila 0,5 mm odnosno pomeranje vibracionog stola (pick to pick) je bilo 1 mm. Inerciona masa pričvršćena na kraju epruvete je bila 933 g. Zbog jednobraznosti, pri učvršćivanju epruveta u fiksator, koren zavarenog spoja se nalazio uvek sa donje strane epruvete. Kod svih epruveta, lice epruvete je obrađeno glodanjem. Kako je frekvencija 1 moda sopstvenih oscilacija ≈ 40 Hz to su frekvencija ispitivanja definisane u rasponu od 29 Hz do 34 Hz.

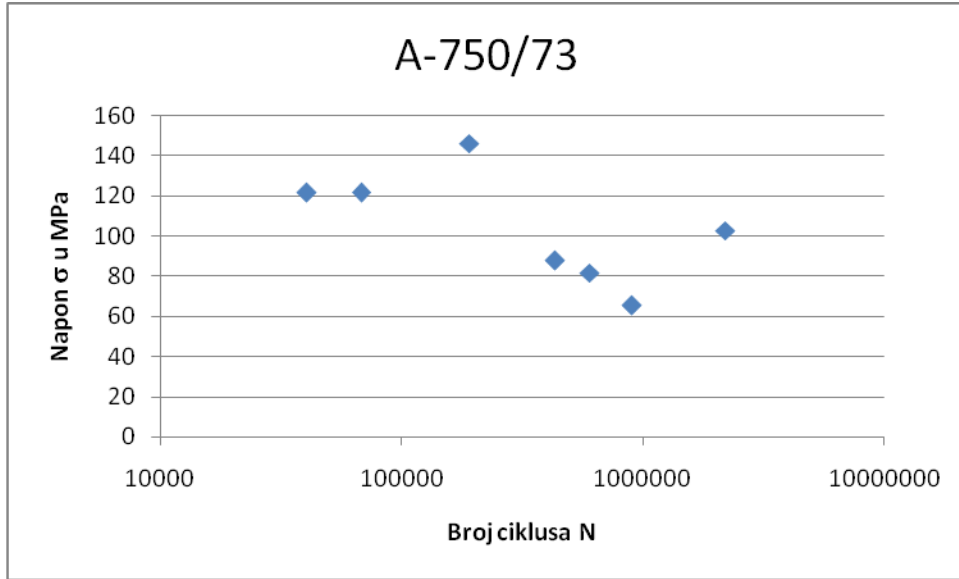
Naponsko stanje na mestu zavarenog spoja je određeno analitičkim i numeričkim putem. Rezultati dobijeni analitičkim postupkom odstupaju u odnosu na rezultate dobijene numeričkim postupkom od 10 do 35%. Razlog za ovakvo odstupanje rezultat analitičkih i numeričkih, je u uprošćenom analitičkom postupku, koji ne uzima u obzir masu epruvete, stanje kontakta između epruvete i fiksatora, kontakta epruvete i tega sa gornje i donje strane, kao i oblik epruvete. Iz tog razloga se, kao verodostojni podaci o naponu na mestu sredine zavara, uzimaju rezultati numeričke analize.

Broj ciklusa do otkaza N pri određenoj frekvenciji ispitivanja (za određeni napon u zavarenom spoju) kao rezultati ispitivanja zamaranja epruveta sa zavarenim spojevima ostvarenih različitim parametrima zavarivanja na elektro-dinamičkom vibracionom stolu su dati u tabeli 4.10.

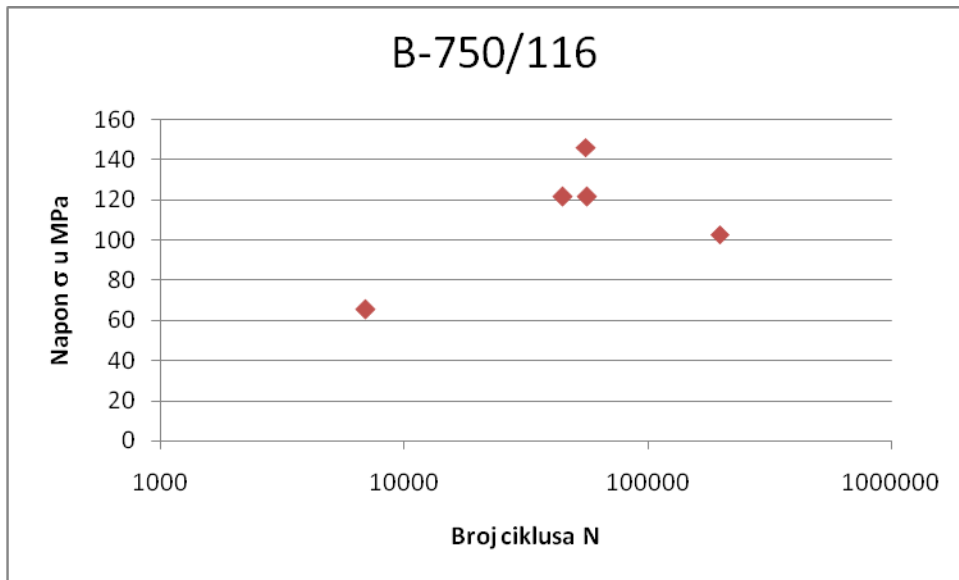
Tabela 4.10. Rezultati dinamičkog ispitivanja zamaranjem na elektro-dinamičkom vibracionom stolu

Frekvencija ispitivanja Hz	Napon u zavaru σ MPa	Broj ciklusa do otkaza N		
		A-750/73	B-750/116	C-750/150
29	65,581	901842	6989	471308
30,5	81,67	601184	Lom	72133
31	87,739	432822	Lom	36301
32	102,72	2188768	198240	471456
33	121,65	68145	56628	34155
		40392	44946	
34	146,29	190502	55760	228820

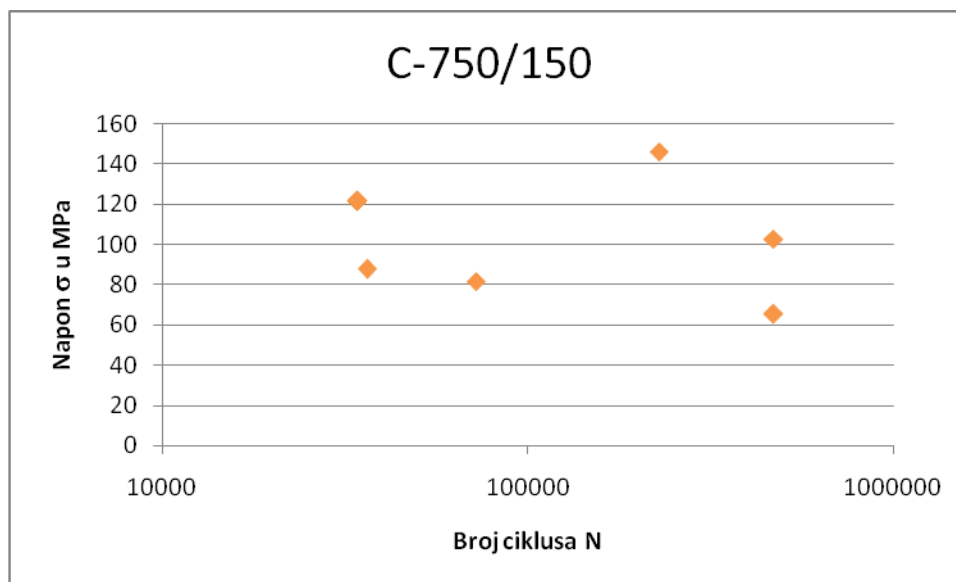
Rezultati zamaranja grafički predstavljani u dijagramu napon σ – broj ciklusa N dati su na slikama 4.91, 4.92 i 4.93 za parametre zavarivanja A-750/73, B-750/116 i C-750/150 respektivno.



Slika 4.91. Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja A-750/73



Slika 4.92. Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja B-750/116



Slika 4.93. Rezultati ispitivanja zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih parametrima zavarivanja C-750/150

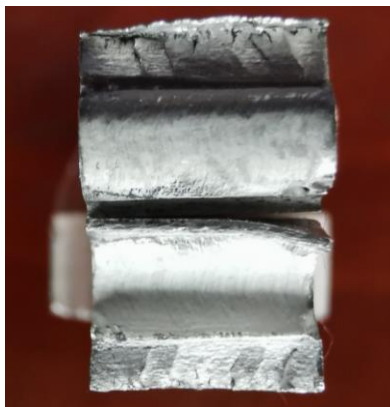
Za sve zavarene spojeve uočava se veliko rasipanje rezultata zamaranja do loma. Ispitivanje zamaranjem na elektro-dinamičkom vibracionom stolu je tako definisano da su zavareni spojevi opterećeni savojnim naprezanjem. Rezultati sprovedenih statičkih ispitivanju na savijanje su pokazali veoma loša svojstva pri ovom naprezanju. Kod svih zavarenih uzoraka, prva prslina se javljala između 10 i 40°. Pri tom su rezultati savijanja do prve prsline ili loma bili vrlo različiti pri savijanju oko korena i oko lica.

Dakle, ovako veliko rasipanje rezultata je moglo da se očekuje, saglasno rezultatima statičkog ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva. Ovako veliko rasipanje rezultata ne omogućava crtanje S-N (Velerove) krive.

Epruvete sa zavarenim spojem ostvarenim parametrima zavarivanja B-750/116 za dva parametra opterećenja sa frekvencijama elektro-dinamičkog vibracionog stola 30,5 Hz i 31 Hz su se lomile na samom početku ispitivanja pri čemu je lom bio oko jezgra. I ovo je saglasno rezultatu pri statičkom ispitivanju na savijanje (slika 4.94 i 4.95).



Slika 4.94. Lom epruvete na mestu zavara oko jezgra (parametri zavarivanja B-750/116)



Slika 4.95. Prelomne površine zavarenog spoja - lom oko jezgra (parametri zavarivanja B-750/116)

Zavareni spojevi ostvareni parametrima A-750/73 i C-750/150 su imali bolja svojstva izdržljivosti u odnosu na zavarene spojeve ostvarene parametrima zavarivanja B-750/116 u uslovima naprezanja na savijanje. Izgled loma epruvete i izgled prelomne površine za zavarene spojeve ostvarene parametrima A-750/73 su dati na slikama 4.96 i 4.97, odnosno za zavarene spojeve ostvarene parametrima C-750/150 su dati na slikama 4.98 i 4.99.



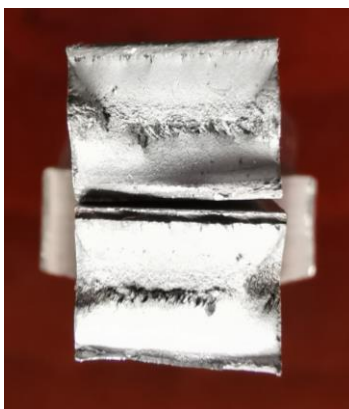
Slika 4.96. Lom epruvete na mestu zavara (parametri zavarivanja A-750/73)



Slika 4.97. Prelomne površine zavarenog spoja (parametri zavarivanja A-750/73)



4.98. Lom epruvete na mestu zavora (parametri zavarivanja C-750/150)



Slika 4.99. Prelomne površine zavarenog spoja (parametri zavarivanja C-750/150)

4.12. REZULTATI ISPITIVANJA DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI NA SERVOHIDRAULIČKOM PULZATORU

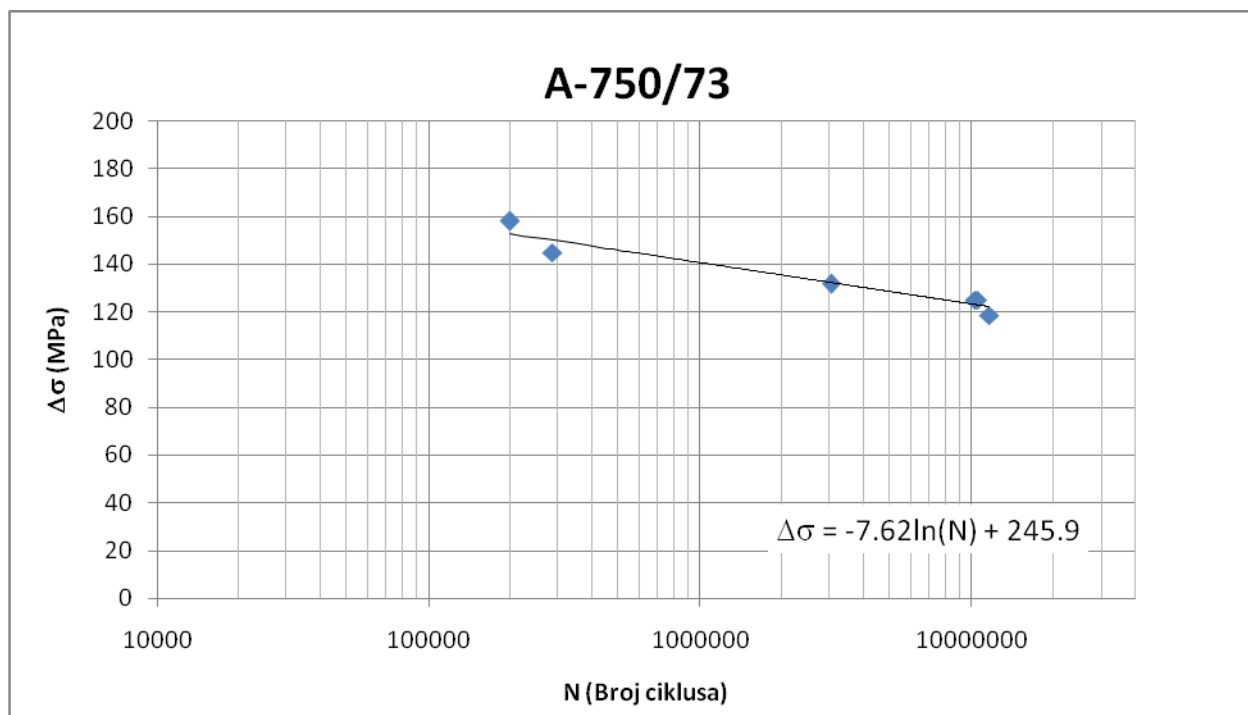
Na osnovu ustanovljene šeme ispitivanja date u tabeli 3.5 vršeno je ispitivanje na zamaranje u uslovima napreznja na zatezanje na servohidrauličkom pulzatoru sa konstantnom amplitudom sa odnosom napona $R=F_{\min}/F_{\max}=0.1$ i frekvencijom opterećenja 35 Hz [127, 128]. Kriterijum otkaza je bio lom epruvete. Kriterijum za određivanje trajne dinamičke izdržljivosti je bio broj 10×10^6 ciklusa.

Rezultati ispitivanja epruveta izvučenih iz zavarenog uzorka sa parametrima A-750/73 dati su u tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak A-750/73

Epruveta No.	F_g kN	F_d kN	ΔF N	$\Delta \sigma$ MPa	N ciklus
1	12	1,2	10800	157,8947	199455
2	11	1,1	9900	144,7368	286424
3	10	1	9000	131,5789	3034896
4	9,5	0,95	8550	125	10324510
5	9,5	0,95	8550	125	10500000
6	9	0,9	8100	118,4211	11600000

Na osnovu rezultata tabelarno sređenih na slici 4.100 data ja S-N kriva za zavareni uzorak sa parametrima zavarivanja A-750/73.



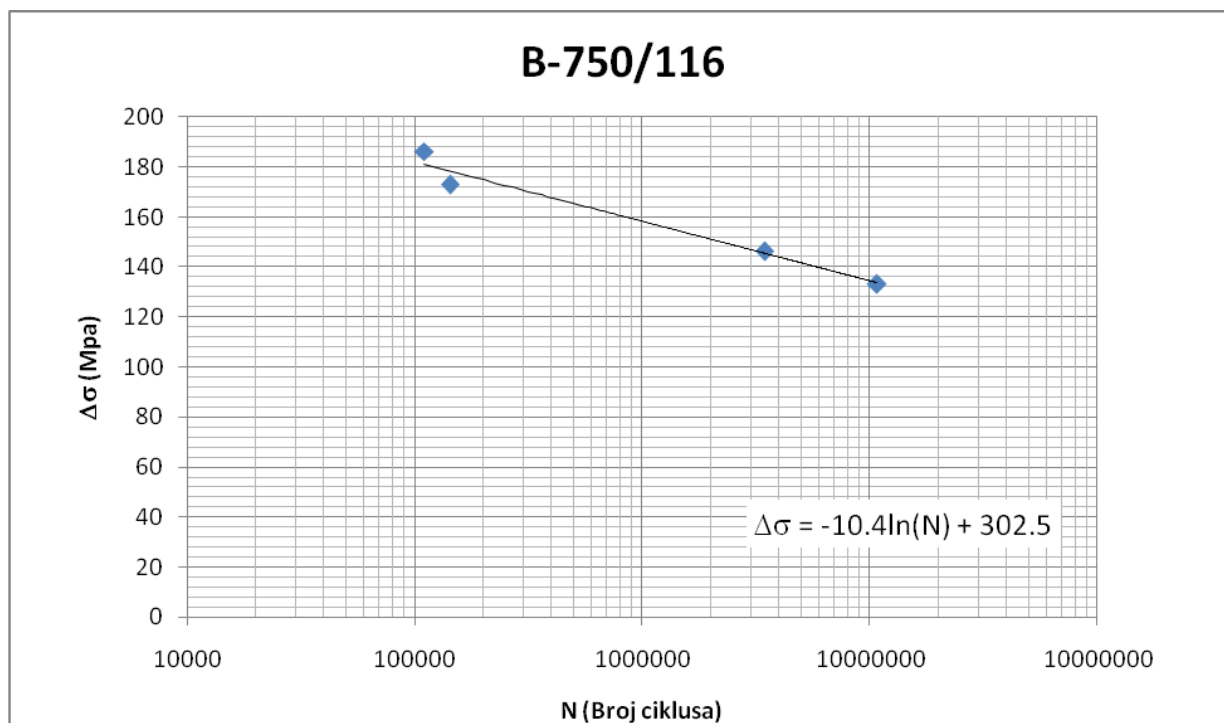
Slika 4.100. Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima A-750/73

Rezultati ispitivanja epruveta izvučenih iz zavarenog uzorka sa parametrima B-750/116 dati su u tabeli 4.12.

Tabela 4.12. Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak B-750/116

Epruveta No.	F_g	F_d	ΔF	$\Delta \sigma$	N
	kN	kN	N	MPa	ciklus
1	14	1,4	12600	186,3354	110394
2	13	1,3	11700	173,0257	143116
3	11	1,1	9900	146,4064	3450658
4	10	1	9000	133,0967	10715000

Na osnovu rezultata tabelarno sređenih na slici 4.101 data ja S-N kriva za zavareni uzorak sa parametrima zavarivanja B-750/116.



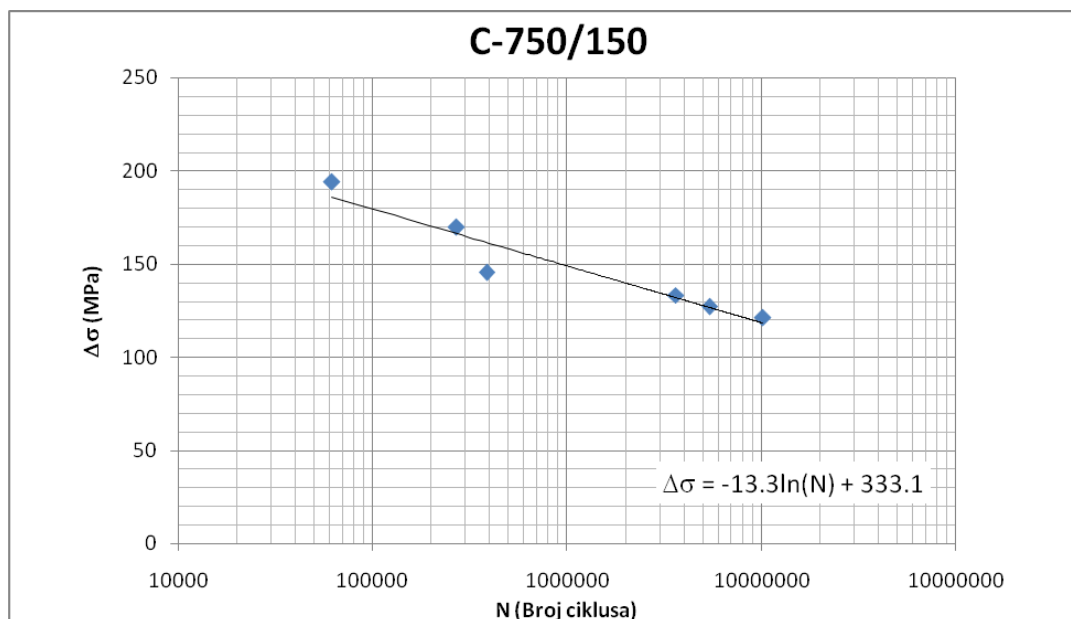
Slika 4.101. Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima B-750/116

Rezultati ispitivanja epruveta izvučenih iz zavarenog uzorka sa parametrima C-750/150 dati su u tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak C-750/150

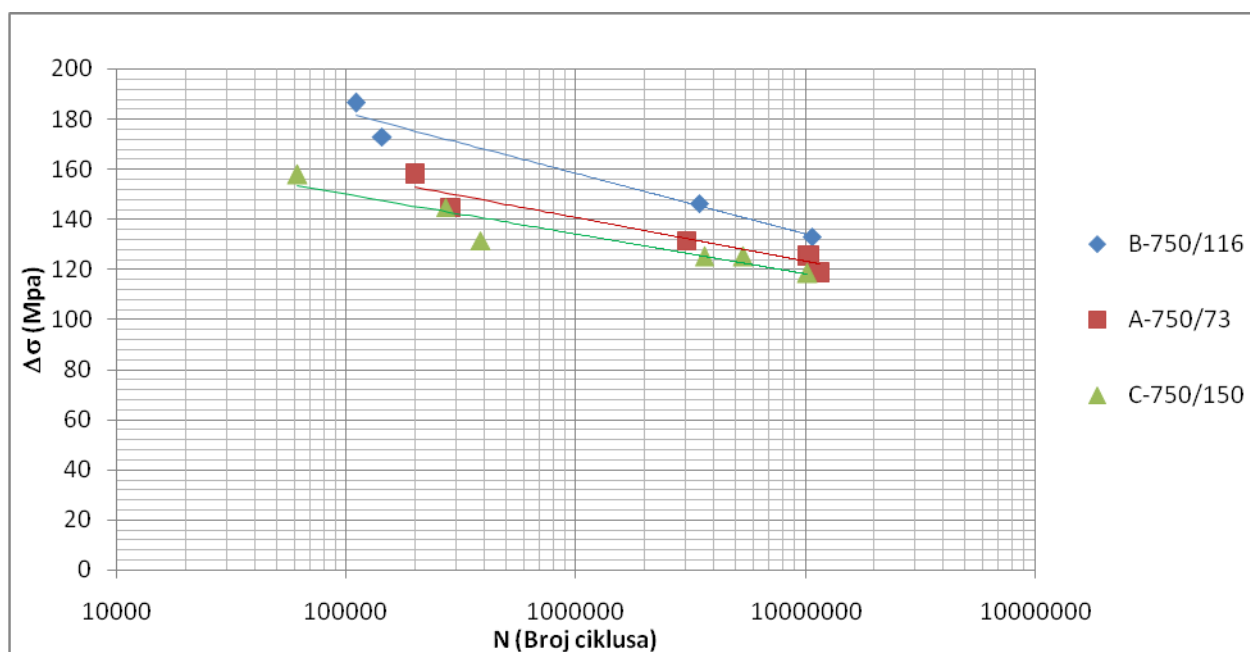
Epruveta No.	F_g	F_d	ΔF	$\Delta\sigma$	N
	kN	kN	N	MPa	ciklus
1	16	1,6	14400	193,859	61747
2	14	1,4	12600	169,6266	270734
3	12	1,2	10800	145,3942	386817
4	11	1,1	9900	133,278	3633846
5	10,5	1,05	9450	127,22	5396652
6	10	1	9000	121,1619	10200000

Na osnovu rezultata tabelarno sređenih, na slici 4.102 data ja S-N kriva za zavareni uzorak sa parametrima zavarivanja C-750/150.



Slika 4.102. Velerova kriva (S-N kriva) za zavareni uzorak ostvaren parametrima C-750/150

Na slici 4.103 dati su rezultati potpunog ispitivanja - S-N krive za zavarene spojeve ostvarene parametrima zavarivanja A-750/73, B-750/116 i C-750/150.



Slika 4.103. Uporedni rezultati ispitivanja na zamaranje zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja

U tabeli 4.14 date su zakonitosti S-N kriva i dinamička izdržljivost σ_D definisana za broj ciklusa $N_D=10 \times 10^6$ ciklusa za sve parametre zavarivanja.

Tabela 4.14. Zakonitosti S-N krivih za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

	$\Delta\sigma$	σ_D ($N_D=10^7$ ciklus)
	MPa	MPa
A-750/73	$-7,62 \cdot \ln(N) + 245,9$	123,08
B-750/116	$-10,4 \cdot \ln(N) + 302,5$	134,87
C-750/150	$-13,3 \cdot \ln(N) + 333,1$	118,73

Na osnovu slike 4.103 i rezultata u tabeli 4.15 može se zaključiti da najveću dinamičku izdržljivost imaju zavareni spojevi ostvareni sa parametrima zavarivanja B-750/116.

5. ZAKLJUČAK

Opšta tema istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji bila je suočavanje sa izazovima u korišćenju zavarivanja trenjem sa mešanjem kao primarne tehnologije spajanja za proizvodnju lakih konstrukcija u vazduhoplovnoj industriji.

Zavarivanje trenjem sa mešanjem je postupak spajanja materijala kojim se dobija zavareni spoj čija mehanička i strukturna svojstva zavise od velikog broja međusobno uslovljenih parametara postupka zavarivanja. Značajan uticaj na postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem mogu imati tip zavarenog spoja, debljina delova koji se zavaruju, materijali od kojih su izrađeni delovi koji se zavaruju, geometrija alata, karakteristike alata, ugao nagiba alata, brzina zavarivanja i broj obrtaja alata. Svi ovi uticaji su u interakciji.

Istraživanja sprovedena u ovoj disertaciji su bila usmerena na analizu uticaja parametara zavarivanja (odnos broja obrtaja alata i brzine zavarivanja) na mehanička svojstva zavarenih spojeva (određivanje zateznih osobina, raspodele tvrdoće) i tehnološka svojstava zavarenih spojeva ustanovljena ispitivanjem na savijanje. Sprovedenim eksperimentalnim ispitivanjima su takođe određena svojstva udarne žilavosti i parametri mehanike loma kao i brzine rasta zamorne prsline u različitim strukturama zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja. Svojstva dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva su određena ispitivanjem na servo-hidrauličkom pulzatoru sa konstantnom amplitudom. Takođe je razvijeno opitno mesto i metodologija ispitivanja dinamičke izdržljivosti primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola.

Na osnovu dobijenih rezultata u radu, mogu se izvući sledeći zaključci:

1. Na kvalitet i svojstva zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem dominantno utiču dva parametra: broj obrtaja alata i brzina zavarivanja. Ova dva kinematska parametra su određeni i kontrolisani proizvodnim mogućnostima i ograničenjima adaptirane glodalice. Za istraživanja u okviru ove disertacije, broj obrtaja alata je bio konstantan i iznosio 750 min^{-1} , a brzina zavarivanja je bila promenljiva i iznosila 73; 116 i 150 mm/min (A-750/73, B-750/116 i C-750/150). Saglasno [52, 53] generisana količina toplote u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem bila je najveća pri najmanjoj brzini zavarivanja 73 mm/min, odnosno najmanja pri najvećoj brzini zavarivanja 150 mm/min. Ova dva dominantna parametra zavarivanja značajno utiču na

- strukturu zavarenog spoja, a samim tim i na mehanička, tehnološka i zamorna svojstva zavarenog spoja.
2. U makrostrukturi zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja, linije tečenja u ZTMU kao i veličina i oblik jezgra zavise od parametara zavarivanja. Veličina jezgra je pri najmanjoj brzini zavarivanja (najveća količina generisane toplote) za približno 10% veća od veličine jezgra pri najvećoj brzini zavarivanja.
 3. U oblasti jezgra i ZTMU, usled istovremene izloženosti povišenoj temperaturi i mehaničkom opterećenju, dobijena je rekristalisana sitnozrna struktura, koja je naročito izražena u oblasti jezgra. Strukturu ZTMU karakterišu veoma deformisana zakrivljena i izdužena zrna.
 4. Postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem dobijeni se zavareni spojevi visoke efikasnosti. Zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja B-750/116 ima efikasnost zavarivanja gotovo 100%.
 5. Povećanje brzine zavarivanja ima veliki uticaj na tvrdoću zone mešanja (ZM) i zonu termomehaničkog uticaja (ZTMU), ali slabog uticaja na zonu uticaja toplote (ZUT).
 6. Mikro tvrdoća u zoni mešanja i zoni termomehaničkog uticaja opada sa porastom brzine zavarivanja. Omekšana zona termičkog uticaja (sa obe strane sredine zavarenog spoja) se lagano povećava sa povećanjem brzine zavarivanja (sa smanjenjem unete količine toplote).
 7. Iako je pri najmanjoj brzini zavarivanja (količina generisane toplote najveća) veličina zrna u zoni mešanja najveća, tvrdoća se povećava kako se brzina zavarivanja smanjuje, bez obzira na grublje zrno u ZM. Ova tendencija sugerise da značajan porast tvrdoće sa smanjenjem brzine zavarivanja nije funkcija veličine zrna, već funkcija veličine i raspodele čestica druge faze i precipitata (taloga).
 8. Rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva, radi određivanja deformacionih sposobnosti zavarenog spoja, generalno pokazuju veoma loše deformacione sposobnosti svih zavarenih spojeva. Upoređujući zavarene uzorke ostvarene različitim parametrima zavarivanja, najbolja svojstva na savijanje oko lica imaju uzorci ostvareni parametrima zavarivanja C-750/150 (prva prslina pri uglu $\approx 20^\circ$). Rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih spojeva oko korena pokazuju malo bolje deformacione sposobnosti nego u slučaju savijanja oko lica zavara. Upoređujući zavarene uzorke, najbolja svojstva na

- savijanje oko korena imaju uzorci ostvoreni parametrima zavarivanja B-750/116 (prva prslina pri uglu $\approx 40^\circ$).
9. Sučeono zavareni spojevi materijala od legure aluminijuma AA 2024 T351 ostvoreni zavarivanjem trenjem sa mešanjem, saglasno lošim svojstvima na savijanje, ne treba postavljati u konstrukcionim zonama sa velikim opterećenjima na savijanje.
 10. Rezultati ispitivanja energije udara i udarne žilavosti zavarenih spojeva karakterišu niske vrednosti za sve zavarene spojeve ostvorene različitim parametrima zavarivanja u svim položajima vrha zareza u ZTMU - zoni "jezgra" i na dva mesta na strani napredovanja i na povratnoj strani, takođe u ZTMU.
 11. Rezultati dobijeni ispitivanjem energije udara odnosno udarne žilavosti za različite položaje zareza i za različite parametre zavarivanja ukazuju za sve parametre zavarivanja da je energija udara za zarez na strani napredovanja najveća, odnosno najveću udarnu žilavost ima struktura zavarenog spoja na strani napredovanja. Najveću udarnu žilavost imaju strukture dobijene sa parametrima zavarivanja B-750/116.
 12. Ako se napravi upoređenje energija udara za različite položaje zareza u odnosu na sredinu zavarenog spoja u odnosu na adekvatne energije udara osnovnog materijala (slika 4.41): E_{iZS}/E_{iOM} , E_{pZS}/E_{pOM} i E_{ZS}/E_{OM} , za strukture zavarenih spojeva B-R-I i C-R-I dobijaju se dati odnosi koji iznose više od 100%, bolje rečeno, karakteristike energije udara za ove strukture zavarenog spoja su bolje od strukture osnovnog metala.
 13. Energija udara utrošena na stvaranje (inicijaciju) prsline je na nivou 31,67% do 44,23% od ukupne energije udara. Najmanji odnos energija za iniciranje prsline u odnosu na ukupnu energiju je za parametre zavarivanja 750/116 i to na povratnoj strani (B-R-P), iznosi 31,67%, a najveći odnos $E_i/E=44,23\%$ je za parametre zavarivanja 750/73 na strani napredovanja (A-R-I). Sa druge strane energija udara na širenje prsline je na nivou 55% do 68%, najveća na povratnoj strani strukture zavarenog spoja (B-R-P) dobijenog parametrima zavarivanja B-750/116.
 14. Analizom rezultata žilavosti loma može se zaključiti da za sve parametre zavarivanja važi da struktura zavarenog spoja na povratnoj strani ima veću žilavost loma, odnosno poseduje izraženiju otpornost prema širenju prsline u odnose na strukturu zavarenog spoja na strani napredovanja.

15. Ako se uporedi žilavost loma struktura dobijenih različitim parametrima zavarivanja na istoj poziciji zavarenog spoja, onda se može zaključiti da najveću žilavost loma imaju zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja B-750/116, a zatim slede zavareni spojevi dobijeni parametrima zavarivanja A-750/73 i C-750/150 koji imaju približno 15% manju žilavost loma.
16. U zavisnosti od parametara zavarivanja, zavisi i vrednost praga zamora ΔK_{th} . Najlakše će početi da raste prslina u zavarenom spoju ostvarenom parametrima zavarivanja A-750/73 ($\Delta K_{th}=1,58 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), a zatim u zavarenom spoju ostvarenom parametrima zavarivanja C-750/150 ($\Delta K_{th}=3,32 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) i zavarenom spoju ostvarenom parametrima zavarivanja B-750/116 ($\Delta K_{th}=6,79 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Može se zaključiti da najveću otpornost na širenje već postojeće prsline ima zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja B-750/116.
17. Ponašanje zavarenog spoja, vezano za brzinu rasta prsline, je povezano sa promenom nagiba krive u delu zavisnosti Parisove relacije. Manji koeficijent nagiba Parisove krive znači manju brzinu rasta prsline. Brzina propagacije prsline u zavarenom spoju ostvarenom parametrima B-750/116 je najveća (koeficijent nagiba $m_B=4,771$), a zatim zavareni spojevi ostvareni parametrima A-750/73 ($m_A=4,539$) i C-750/150 ($m_C=4,421$), respektivno.
18. Prema rezultatima ispitivanja na zamaranje u uslovima naprezanja na zatezanje na servo-hidrauličkom pulzatoru sa konstantnom amplitudom sa odnosom napona $R=F_{\min}/F_{\max}=0.1$ i frekvencijom opterećenja 35 Hz, najveću dinamičku izdržljivost imaju zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja B-750/116 ($\Delta\sigma=134,87 \text{ MPa}$), a zatim zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja A-750/73 ($\Delta\sigma=123,08 \text{ MPa}$) i C-750/150 ($\Delta\sigma=118,73 \text{ MPa}$), respektivno.
19. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola nije standardom definisano. Iz tog razloga je za potrebe istraživanja u okviru disertacije oblikovan fiksator epruveta, definisan oblik i dimenzije epruveta, definisano opterećenje epruveta pomoću tegova, koje treba da stvara pobudno opterećenje i definisan opseg frekvencija ispitivanja.

20. Napon na mestu zavarenog spoja u uslovima zamaranja materijala zavarenog spoja primenom elektrodinamičkog vibracionog stola, određen je analitičkim i numeričkim postupkom. Rezultati raspodele napon u zavarenom spoju, određeni numeričkom simulacijom (sekvencijalno uparena statička strukturna, modalna i harmonijska analiza), su usvojeni kao osnov za određivanje parametara ispitivanja (frekvencija ispitivanja i amplitude vibracionog stola)
21. Zavareni spojevi legure AA 2024 T351 ostvareni zavarivanjem trenjem sa mešanjem imaju izraženo loša svojstva u uslovima naprezanja na savijanje pri statičkim uslovima ispitivanja, a saglasno tome, postoji veliko rasipanje rezultata zamaranja primenom elektro-dinamičkog vibracionog stola, gde su zavareni spojevi opterećivani savojnim naprezanjem, te nemogućnost uspostavljanja matematičke zavisnosti dobijenih rezultata ispitivanja.
22. Sva ostala eksperimentalna ispitivanja zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem različitim brzinama zavarivanja, u okviru disertacije su sprovedena u skladu sa važećim standardima. Ovako sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja daju ovom radu poseban značaj i dobijeni rezultati imaju praktičnu primenu.

Naučni doprinosi doktorske disertacije su u:

- Istraživanju i analizi uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351 na dinamičku izdržljivost zavarenih spojeva,
- Razvoju metodologije ispitivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva korišćenjem elektro-dinamičkog vibracionog stola,
- Definisaniu parametara ispitivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva korišćenjem elektro-dinamičkog vibracionog stola (frekvencije vibracija i amplitude pomeranja vibracionog stola), primenom numeričke simulacije (sekvencijalno uparena statička strukturna, modalna i harmonijska analiza), sa ciljem određivanja naponskog stanja u zavarenom spoju epruvete,
- Eksperimentalno određenim S-N krivama zavarenih spojeva legure aluminijuma 2024 T351 ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem sa različitim parametrima zavarivanja,
- Eksperimentalno određenim parametrima rasta zamorne prsline za zavarene spojeve za različite parametre zavarivanja trenjem sa mešanjem legure aluminijuma 2024 T351,

- Eksperimentalno određenim vrednostima žilavosti loma i vrednostima otvaranja prsline za različite strukture zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem za različitim brzinama zavarivanja,

- Eksperimentalno određenim vrednostima udarne žilavosti za različite strukture zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem sa različitim parametrima zavarivanja.

Pravci budućih istraživanja su:

- Opsežna eksperimentalna istraživanja ponašanja na zamor zavarenih spojeva, ostvarenih različitim parametara postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem i to pri zavarivanju različitih legura aluminijuma, kao i pri zavarivanju različitih legura aluminijuma sa drugim metalim i njihovim legurama (npr. bakar i legure bakra).
- Eksperimentalno istraživanje ponašanja na zamor primenom elektrodinamičkog vibracionog stola zavarenih, zalemljenih i zalepljenih spojeva.

LITERATURA

1. F. Mazzolani, "Aluminium Alloy Structures", Second Edition. CRC Press, 1994.
2. R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. R Reports, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005.
3. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith, C. J. Dawes, "Friction stir butt welding", GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, 1991.
4. A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, and W. Miller, "Recent development in aluminium alloys for aerospace applications", Mater. Sci. Eng. A, vol. 280, no. 1, pp. 102–107, 2000.
5. J. Q. Su, T. W. Nelson, R. Mishra, and M. Mahoney, "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium", Acta Mater., vol. 51, no. 3, pp. 713–729, 2003.
6. B. J. Dracup and W. J. Arbegast, "Friction Stir Welding as a Rivet Replacement Technology", in Automated Fastening Conference & Exposition, 1999.
7. P. L. Threadgill, a J. Leonard, H. R. Shercliff, and P. J. Withers, "Friction stir welding of aluminium 74 alloys", Int. Mater. Rev., vol. 54, no. 2, pp. 49–93, 2009.
8. A. Živković, Uticaj geometrije alata na postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al 2024, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2011.
9. C. Gilmore, "Materials Science and Engineering Properties", Cengage Learning, 2014.
10. SRPS EN 515: 2017, "Aluminijum i legure aluminijuma – Plastično prerađeni proizvodi – Oznake stanja".
11. R. P. Cvetković, O. Popović, "Metalurgija zavarivanja", Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2019.
12. A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, and W. Miller, "Recent development in aluminium alloys for aerospace applications", Mater. Sci. Eng. A, vol. 280, no. 1, pp. 102–107, 2000.
13. P. A. Molian and T. S. Srivatsan, "Weldability of aluminium-lithium alloy 2090 using laser welding", J. Mater. Sci., vol. 25, no. 7, pp. 3347–3358, 1990.

14. ESAB KNOWLEDGE CENTER, "How to Avoid Cracking in Aluminium Alloys", ESAB Knowledge Center, 2014. [Online]: <http://www.esab.ca/ca/en/education/blog/how-to-avoid-cracking-in-aluminum-alloys.cfm>. [Accessed: 27-May-2019], 2019.
15. S. Malarvizhi and V. Balasubramanian, "Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China, English Ed.*, vol. 21, no. 5, pp. 962–973, 2011.
16. P. Vilaça, J. P. Santos, A. Góis, and L. Quintino, "Joining Aluminium Alloys Dissimilar in Thickness by Friction Stir Welding and Fusion Processes", vol. 49, Springer, *Welding in the world*, pp. 56–62, 2005.
17. D. Milčić, M. Mijajlović, D. Mitić, M. Milčić, "Experimental Investigation of GTAW, GMAW and FSW welding processes on aluminium alloy 2024", *Proceeding of the EWF - 8th European Conference - Eurojoin 8*, Pula, Croatia, May 24-26, 2012, pp. 331-340, ISBN 978-953-7518-02-8, Publisher: Croatian Welding Society, 2012.
18. A. M. El-Kassas, I. Sabry, "A Comparison between FSW, MIG and TIG Based on Total Cost Estimation for Aluminum Pipes", *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 4 (3): 158-163, 2017.
19. H. K. Mohammed, "A comparative study between friction stir welding and metal inert gas welding of 2024-T4 aluminum alloy", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 6, NO. 11, pp. 36-40, 2011.
20. B. T. Gibson, "The development of in-process of monitoring and control techniques for aerospace applications of friction stir welding", PhD thesis, Nashville, Tennessee, 2015.
21. Budin, N C Maideen, Koay Mei Hyie, S Sahudin, *Design and Development of Manufacturing Facilities for Friction Stir Welding Process using Conventional Milling Machine*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 505 (2019) 012006 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/505/1/012006
22. S. W. Kallee, N. Z. Fabricators Begin to Use Friction Stir Welding to Produce Aluminium Components and Panels, 2006, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/nz-fabricators-begin-to-use-friction-stir-welding-to-produce-aluminium-components-and-panels-august-2006>.
23. Bob Carter, Introduction to Friction Stir Welding (FSW), <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150009520.pdf>
24. D. Milčić, M. Mijajlović, M. Milčić, „Eksperimentalna istraživanja zavarivanja trenjem sa mešanjem na leguri aluminijuma 2024 T351“, Zbornik radova Dvadesetsedmog savetovanja sa međunarodnim učešćem "ZAVARIVANJE 2012" i "IBR 2012", Divčibare, Srbija, CD, Oktobar 9-12, 2012.

25. M. Mijajlović, D. Milčić, M. Đurđanović, V. Grabulov, M. Perović, “Osnovni pojmovi kod postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem prema AWS D17.3/D17.3M: 2010 i ISO 25239-1: 2011”, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Časopis, godina LVII, broj 2, 61-68, Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), Beograd, Srbija, 2012.
26. AWS D17.3/D17.3M: 200x Specification for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys for Aerospace Hardware // An American National Standard, American Welding Society/ Miami, Florida, p. 60, January 2010.
27. B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst, C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook, and a. M. Strauss, “Friction stir welding: Process, automation, and control”, J. Manuf. Process., vol. 16, no. 1, pp. 56–73, 2014.
28. K. Kolligan, “Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum”, Welding Research Supplement, pp. 229s–237s, 1999.
29. Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose and P. Wanjara, “Review of tools for friction stir welding and processing”, Canadian Metallurgical Quarterly vol 51 no. 3, pp. 250-261, 2012.
30. J. Ding, P. Oelgoetz, “Auto-adjustable tool for friction stir welding”, U.S. Patent 5893507A, 1999.
31. H. K. Mohanty, M. M. Mahapatra, P. Kumar, P. Biswas and N. R. Mandal, “Effect of Tool Shoulder and Pin Probe Profiles on Friction Stirred Aluminum Welds – a Comparative Study”, J. Marine Sci. Appl., vol 11, pp 200-207 DOI: 10.1007/s11804-012-1123-4, 2006□
32. L. V. Kamble, S.N. Soman, P.K. Brahmankar, “Effect of Tool Design and Process Variables on Mechanical Properties and Microstructure of AA6101-T6 Alloy Welded by Friction Stir Welding”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN(e) : 2278-1684, ISSN(p) : 2320–334X, pp.30-35.
33. K. Elangovon and V. Balasubramanian, “Influence of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, Materials Science and Engineering, Vol. 459 (1-2), pp. 7-18, 2007.
34. P. S. Rao, A. F. O. Bawazir, M. Awang, A M A Rani, S. Jebaraj, “Effect of tool geometrical parametres on friction stir welding joint properties of aluminium alloy AA6061”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 11, NO. 22, pp. 13053-13058. ISSN 1819-6608, 2016.
35. M. M. Khalilabad, Y. Zedan, D. Texier, M. Jahazi, P. Bocher, “Effect of tool geometry and welding speed on mechanical properties of dissimilar AA2198–AA2024 FSWed joint”, Journal of Manufacturing Processes, Society of Manufacturing Engineers, 34 (Part A), pp.86 – 95, 2018.

36. A. Živković, A. Đurđević, A. Sedmak, S. Tadić, I. Jovanović, Đ. Đurđević, K. Zammit, “Friction stir welding of aluminum alloys – T – joints”, *Structural Integrity and Life*, Vol. 15, No 3, pp. 181–186, 2015.
37. A. Đurđević, A. Sedmak, A. Živković, Đ. Đurđević, M. Marković, M. Milčić, “Microhardness and Macrostructures of Friction Stir Welded T-joints”, *ScienceDirect, Procedia Structural Integrity* 13, pp. 424-429 (ECF22 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity), 2018.
38. A. M. A. Kraedegh, “Fatigue crack growth in T welded joint of aluminum alloy”, Doctoral Dissertation, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2017.
39. Ø. Frigaard, Ø. Grong, O. T. Midling, “A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminum Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A32(5):1189-1200*, doi:10.1007/s11661-001-0128-4, 2001.
40. M. Mijajlović, “Istraživanje i razvoj analitičkog modela za određivanje količine generisane toplote pri postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem” Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, Srbija, 2012.
41. M. Mijajlović, D. Milčić, “Analytical Model for Estimating the Amount of Heat Generated During Friction Stir Welding: Application on Plates Made of Aluminium Alloy 2024 T351, *Welding Processes*”, Radovan Kovačević (Ed.), ISBN: 978-953-51-0854-2, InTech, pp. 247-274, 2012.
42. D. Milčić, M. Mijajlović, N. Pavlović, M. Vukić, D. Mančić, “Temperature Based Validation of the Analytical Model for the Estimation of the Amount of Heat Generated During Friction Stir Welding”, *Thermal Science, International Scientific Journal*, Volume 16, Issue Supplement 2, pp. S337-S350, 2012.
43. H Schmidt, J Hattel, J Wert, “An analytical model for the heat generation in friction stir welding”, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 12, 143–157, 2004.
44. J. W. Pew, T. W. Nelson, and C. D. Sorensen, “Torque based weld power model for friction stir welding,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 12, no. 4, pp. 341–347, 2007.
45. S. A. Khodir, T. Shibayanagi, M. Naka, “Control of Hardness Distribution in Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy”, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 6, pp. 1560 – 1567, 2006.
46. I. Zybin, K. Trukhanov, A. Tsarkov, S. Kheylo, “Backing plate effect on temperature controlled FSW process”, *MATEC Web of Conferences* 224, 01084, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401084>, 2018.

47. G. M. Abbasi, A. H. Kokabi, G. H. Daneshi, B. Shalchi, R. Sarrafi, "The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" (ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol 46, pp 1983–1987, 2006.
48. G. H. Payganeh, N. B. M. Arab, Y. D. Asl, F. A. Ghasemi, and M. S. Boroujeni, "Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 6, no. 19, pp. 4595–4601, 2011.
49. M.T.S.M. Said, D.A. Hamid, A. Ismail, S.N.N. Zainal, M. Awang, M.A. Rojan, I.M. Ikram, M.F. Makhtar, Experimental Study on Effect of Welding Parameters of Friction Stir Welding (FSW) on Aluminium AA5083 T-joint, *Inform. Technol. J.*, 15 (4), pp. 99-107, 2016.
50. L. M. Serio, D. Palumbo, L. A. C. De Filippis, U. Galietti, A. D. Ludovico, Effect of Friction Stir Process Parameters on the Mechanical and Thermal Behavior of 5754-H111 Aluminum Plates, *Materials*, 9, 122, pp.2-19, 2016.
51. P. Vilaça, L. Quintino, and J. F. dos Santos, "ISTIR—Analytical thermal model for friction stir welding", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 3, pp. 452–465, 2005.
52. D. M. Rodrigues, A. Loureiro, C. Leitaó, R. M. Leal, B. M. Chaparro, P. Vilaça, "Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds", *Materials & Design*, Volume 30, Issue 6, pp. 1913-1921, June 2009.
53. I. Radisavljević, A. Živković, N. Radović, and V. Grabulov, "Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China, English Ed.*, vol. 23, no. 12, pp. 3525–3539, 2013.
54. T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi, and F. Malek Ghaini, "Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 496, no. 1–2, pp. 262–268, 2008.
55. R. Kosturek, L. Śnieżek, J. Torzewski and M. Wachowski, "Research on the Friction Stir Welding of Sc-Modified AA2519 Extrusion", *Metalurgy Journal*, 9, 1024; doi:10.3390/met9101024, 2019.
56. S. A. Khodir, T. Shibayanagi and M. Naka, "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy", *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 1 pp. 185 to 193, 2006.
57. T. Vuherer, M. Perović, D. Bajić, S. Baloš, "Influence of the welding speed on FSW joints on 7049A aluminum alloy", 9. International scientific – professional conference SBW 2017, Slavonski Brod, pp. 20-31, 2017.

58. R. V. Barenji, "Effect of tool traverse speed on microstructure and mechanical performance of friction stir welded 7020 aluminum alloy", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications* 230(2), pp. 663-673, April 2015.
59. A. W. El-Morsy, M. M. Ghanem, H. Bahaitham, "Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-T4 Aluminum Alloy", *Engineering, Technology & Applied Science Research* Vol. 8, No. 1, pp. 2493-2498, 2018.
60. G. M. Xie, Z. Y. Ma, Z. A. Luo, P. Xue, G. D. Wang, "Effect of Rotation Rate on Microstructures and Mechanical Properties of FSW Mg-Zn-Y-Zr Alloy Joints", *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 27, Issue 12, Pages 1157-1164, December 2011.
61. K. S. A. Kumar, S. M. Murigendrappa, H. Kumar, H. Shekhar, "Effect of tool rotation speed on microstructure and tensile properties of FSW joints of 2024-T351 and 7075-T651 reinforced with SiC nano particle: The role of FSW single pass", *AIP Conference Proceedings* **1943**, 020056; <https://doi.org/10.1063/1.5029632>, 2018.
62. M. H. Tolephih, H. M. Mahmood, and H. H. Esam, "Effect of tool offset and tilt angle on weld strength of butt joint friction stir welded specimens of AA2024 aluminum alloy welded to commercial pure copper", *IISTE*, vol. 3, no. 4, pp. 49-58, 2013.
63. R. Srinivasan Raju, A. Ramesh, A. Athithanambi, "Effect of axial force on microstructure and mechanical properties of friction stir welded squeeze cast A413 aluminium alloy", *International Conference on Materials Manufacturing and Modelling (ICMMM - 2017)*, Vellore, India, 2017.
64. M. S. Mahany, R. R. Abbas, M. M. Z. Ahmed, H. Abdelkader, "Influence of tool rotational speed and axial load in friction stir welding (FSW) of high strength aluminum alloys", *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume: 06 Issue: 02, pp. 114-120, 2017.
65. P. Podrzaj, B. Jerman, and D. Klobcar, "Welding defects at friction stir welding," *Metalurgija*, vol. 54, no. 2, pp. 387-389, 2015.
66. A. S. Babu, C. Devanathan, "An Overview of Friction Stir Welding", *IJRMET* Vol. 3, Issue 2, pp. 259-265, 2013.
67. Y. C. Chen, H. Liu, J. Feng, "Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminium alloy plates", *Mater Science Engineering, A*, 420, 21-5. 2006.

68. B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst, C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook, and a. M. Strauss, "Friction stir welding: Process, automation, and control", *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 56–73, 2014.
69. W. M. Thomas, S. W. Kallee, D. G. Staines, and P. J. Oakley, "Friction Stir Welding – Process Variants and Developments in the Automotive Industry", *SAE 2006 World Congress & Exhibition*, Apr. 2006.
70. D. Veljić, "Eksperimentalna i numerička termomehanička analiza procesa zavarivanja trenjem mešanjem legura aluminijuma visoke čvrstoće", *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
71. D. Živojinović, "Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura aluminijuma", *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2013.
72. I. Radisavljević, "Uticaj parametara zavarivanja na svojstva zavarenih spojeva aluminijumskih legura dobijenih postupkom zavarivanja trenjem alatom", *Doktorska disertacija*, Tehnološko-Metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2014.
73. M. Perović, "Uticaj parametara zavarivanja trenjem – mešanjem na otpornost prema lomu sučeonog spoja legure aluminijuma visoke čvrstoće", *doktorska disertacija*, FTN Novi Sad, 2018.
74. S. M. Bulatović, "Elasto – plastično ponašanje zavarenog spoja od niskolegiranog čelika u uslovima niskocikličnog Zamora", *doktorska disertacija*, Mašinski fakultet u Beogradu, 2014.
75. J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd Edition with Cd-Rom. Springer, Netherlands, 2009.
76. F. C. Campbell, "Fatigue and Fracture - Understanding the Basics", ASM International, 2012.
77. Y. L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, and M. Barkey, "Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice", Elsevier, 2005.
78. D. Momčilović, R. Mitrović. I. D. Atanasovska, "Koncentracija napona i zamor materijala – Savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata i konstrukcija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2016.
79. M. Oruč, R. Sunulahpašić, "Lomovi i osnove mehanike loma", Zenica, 2009.
80. ASTM: E399-90, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials", Baltimore, May 2013.

81. American Society for Testing and Materials. ASTM-E1290-08: standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD): fracture toughness measurements. West Conshohocken: ASTM; 2010. 15 p.
82. J. R. Rice, "Journal of Applied Mechanics", Vol. 35, p. 379, 1968.
83. ASTM: E1820 – 11, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness".
84. I. Čamagić, Z. Burzić, S. Cvetković, "The usage of the fracture mechanics in determining the growth parameters of the fatigue crack for particular areas of a welded joint", *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (3/2008), pp. 97-103, 2008.
85. P. C. Paris, M. P. Gomez, W. E. Anderson, "A rational analytical theory of fatigue". *The Trend of Engineering*, Vol. 13, pp. 9–14, 1961.
86. P. C. Paris, F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *Journal of Basic Engineering*, 85, 528-533, 1963.
87. J. M. Mínguez, „Foreman's crack growth rate equation and the safety conditions of cracked structures“, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.48, No. 5, pp. 663-672, 1994.
88. A. R. Shahani, M. Rastegar, M. B. Dehkordi, H. M. Kashani, "Experimental and numerical investigation of thickness effect on ductile fracture toughness of steel alloy sheets", *Engineering Fracture Mechanics* 77 (4), pp. 646-659, 2010.
89. ASTM: E647 - 15 Standard "Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates". In United States: ASTM International, p. 43. Available at: <http://www.astm.org/Standards/E647>.
90. S. Kim, C. G. Lee, S. J. Kim, "Fatigue crack propagation behavior of friction stir welded 5083-H32 and 6061-T651 aluminum alloys", *Materials Science and Engineering: A*. 478, pp. 56-64, 2008.
91. G. Bussu, P. E. Irving, "The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints", *International Journal of Fatigue* 25 (1), pp. 77-88, 2003.
92. P. S. Pao, S. J. Gill, C. R. Feng, K. K. Sankaran, "Corrosion-fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050", *Scripta Materialia*, Vol. 45, (5), pp. 605-612, 2001.
93. T. A. Siewert, M. P. Manahan, N. C. McCowan, J. M. Holt, F. J. Marsh, E. A. Ruth, "The History and Importance of Impact Testing, Pendulum Impact Testing A Century of Progress", ASTM STP 1380., T. A. Siewert, M. P. Manahan, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 3-17, 2000.

94. SRPS EN ISO 148-1:2017, "Metalni materijali – Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom – Deo 1: Metoda ispitivanja".
95. SRPS EN ISO 14556:2016, "Metalni materijali – Ispitivanje epruveta sa V-zarezom udarom Šarpijevim klatnom – Instrumentalna metoda ispitivanja".
96. D. Mandić, "Procjena mehaničkih svojstava zavarenog spoja primjenom instrumentirane Charpy metode", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
97. V. Grabulov, I. Blačić, A. Radović, S. Sedmak, "Toughness and ductility of high strength steels welded joints", *Structural Integrity and Life*, Vol. 8, No 3, pp. 181–190, 2008.
98. M. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljević, J. Kramberger, N. Zdravković, "Influence of Kinematic Factors of Friction Stir Welding on the Characteristics of Welded Joints of Plates Made of EN AW-2024 T351 Aluminium Alloy", *The 4th International Conference "MECHANICAL ENGINEERING IN XXI CENTURY"*, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, April 19-20, 2018.
99. M. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljević, D. Milčić, J. Kramberger, B. Andjelković, "Mechanical behaviour of Al 2024 alloy welded by friction stir welding", *KOD 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 393 (2018) 011001* doi:10.1088/1757-899X/393/1/011001, *The 10th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (KOD 2018)*, Novi Sad, Serbia, 6–8 June 2018.
100. D. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljević, M. Milčić, J. Radovanović, N. Zdravković, "Effect of FSW Welding Speed on Mechanical Properties of AA2024 T351 Aluminum Alloy", *The 4th IIW South-East European Welding Congress Belgrade, Serbia, October 10 – 13, 2018*.
101. M. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljevic, D. Milcic, "Experimental Investigation of Mechanical Properties on Friction Stir Welded Aluminum 2024 Alloy", In: Mitrovic N., Milosevic M., Mladenovic G. (eds) *Experimental and Numerical Investigations in Materials Science and Engineering. CNNTech 2018, CNNTech 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 54. Springer, Cham (Print ISBN978-3-319-99619-6, Series Online ISSN2367-3389, Online ISBN978-3-319-99620-2), 2019.
102. M. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljević, D. Milčić, J. Kramberger, "The influence of process parameters on the mechanical properties of friction stir welded joints of 2024 T351 aluminum alloys", *MTAEC9*, 53 (2019) (6) pp.771-776, doi:10.17222/mit.2019.062, 2019.
103. SRPS EN ISO 25239-5:2012, "Zavarivanje trenjem sa mešanjem - Aluminijum -Deo 5: Zahtevi kvaliteta i kontrolisanja".

104. SRPS EN ISO 17636-2:2014, "Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva — Radiografsko ispitivanje — Deo 2: Tehnike sa X i gama zracima pomoću digitalnih detektora".
105. M. Burzić, "Uticaj eksploatacionih uslova na integritet i preostali vek posuda pod pritiskom", doktorska disertacija, Tehnički fakultet Univerziteta u Novom Sadu, 2008.
106. SRPS EN 10002-1: 1996, „Metalni materijali - Ispitivanje zatezanjem - Deo 1: Metoda (ispitivanja na sobnoj temperaturi)".
107. SRPS EN ISO 5173:2013 Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala — Ispitivanje savijanjem
108. R. Herrera, J. D. Landes, "Direct J-R Curve Analysis: A Guide to the Methodology", Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium, *ASTM STP 1074*, J.P. Gudas, J.A. Joyce, and E.M. Hackett, Eds., ASTM, Conshohocken, PA, pp 24–43, 1990.
109. J. D. Landes, Z. Zhou, K. Lee, R. Herrera, "Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 19, No. 4, pp. 305–311, 1991.
110. L. Kang, "Elastic-Plastic Fracture Toughness Determination Under Some Difficult Conditions", Ph.D. Dissertation, The University of Tennessee, Knoxville, 1995.
111. J. A. Joyce, "Analysis of the E08.02 High Rate Round Robin", *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 29. No. 4., pp. 329–351, July 2001.
112. I. Čamagić, N. Vasić, Z. Vasić, Z. Burzić, A. Sedmak, "Compability of fracture mechanics parameters and fatigue crack growth parameters in welded joints behaviour evaluation", *Technical Gazette*, vol. 20, pp. 205-211, 2013.
113. M. Manjgo, M. Behmed, F. Islamović, Z. Burzić, "Behaviour of cracks in microalloyed steel welded joints", *Structural Integrity and Life*, vol. 3, pp. 235-238, 2010.
114. http://analit-spb.ru/files/TM/Servopulser_Brochure_eng.pdf [Accessed: 01.01.2020].
115. D. J. Ewins, "Modal Testing: Theory, Practice and Application", Wiley; 2 editions, 2009.
116. G. Yun, A. B. M. Abdullah, W. Binienda, D. L. Krause, S. Kalluri, "Test Methodology Development for Experimental Structural Assessment of ASC Planar" *Spring Material for Long-Term Durability*, NASA/TM—2014-216630, 2014.
117. B. Bauer, "Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje", Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojstva i Brodogradnje, 2006.
118. M. Milčić, D. Milčić, B. Anđelković, N. Zdravković, „Design of fixator for vibration testing of welded joints specimens“, 13th International Conference on Accomplishments

- in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2017, pp. 583 - 588, 978-99938-39-73-9, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 26. - 27. May, 2017.
119. M. Milčić, D. Milčić, B. Anđelković, I. Radisavljević, A. Živković, S. Jovanović, “Friction stir welding of aluminium alloys 2024“, 9. International scientific – professional conference SBW 2017 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2017.“, pp. 163 - 175, 978-953-6048-89-2, Slavonski Brod, Croatia., 25. - 27. Oct, 2017.
120. M. Milčić, D. Milčić, B. Anđelković, „Modal analysis of fixture with specimens for fatigue testing of welded joints on electrodynamic shaker“, Machine Design, Vol.9 No. 4, pp. 133 - 138, 1821-1259. DOI: 10.24867/MD.9.2017.4.133-138, 2017.
121. M. Milčić, T. Vuherer, I. Radisavljević, D. Milčić, „Uticaj parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na karakteristiku zavarenog spoja ploča od legure aluminijuma 2024 T351“, Nauka+ Praksa, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš, 20, 1, pp. 52 - 59, 1451-8341, 693.827:621.791.9, 2017.
122. H. G. Salem, “Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments”, Scr. Mater. vol. 49, pp. 1103-1110, 2003.
123. S. A. Khodir, T. Shibayanagi and M. Naka, “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy”, Materials Transactions, vol. 47, No. 1, pp. 185-193, 2006.
124. M. Milčić, T. Vuherer, J. Kramberger, D. Milčić, B. Anđelković, „Ponašanje zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351 ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem pri udarnom lomu“, 3. Međunarodna naučna konferencija COMETA 2016, ”Primijenjene tehnologije u mašinskom inženjerstvu”, Jahorina, pp. 333 - 340, 978-99976-623-7-8, Istočno Satrajevo, Jahorina, RS, BiH, 7. - 9. Dec, 2016.
125. K. N. Krishnan, “On the formation of onion rings in friction stir welds”, Materials Science and Engineering: A, 327, pp. 246-251, 2002.
126. B. Anđelković, D. Milčić, B. Đorđević, M. Milčić, N. Zdravković, „Measuring system for determining SN curve based on Arduino platform“, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2017, pp. 577 - 582, 978-99938-39-73-9, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 26. - 27. May, 2017.
127. M. Milčić, Z. Burzić, I. Radisavljević, T. Vuherer, D. Milčić, V. Grabulov, “Experimental investigation of fatigue properties of FSW in AA2024-T351”, ScienceDirect, Procedia Structural Integrity vol.13, pp. 1977-1984 (ECF22 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity), 2018.

128. T. Vuherer, J. Kramberger, D. Milčić, M. Milčić, S. Glodež, “Fatigue behaviour of friction stir welded AA-2024 aluminium alloy sheets”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 659, 012032, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012032>, 2019.

PRILOG A

Tabela A.1. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu A-R-I-IS

Epruveta	A-R-I-IS		
	$B=$	6,030	mm
$B_{\min}=$	5,820	mm	
$W=$	12,000	mm	
	x	a_0	a_1
1	0,058	6,205	6,595
2	0,771	6,335	8,110
3	1,484	6,435	7,880
4	2,197	6,419	7,575
5	2,910	6,425	7,385
6	3,623	6,330	7,345
7	4,336	6,170	7,050
8	5,049	6,035	6,615
9	5,762	5,825	5,870
	$a_{0\max}=$	6,435	mm
	$a_{0\min}=$	5,825	mm
	$a_{0\min/\max}(\%)=$	9,479	%
	$a_0=$	6,271	mm
	$a_1=$	7,274	mm
	$\Delta a=$	1,004	mm
	$a_0/W=$	0,523	-

Tabela A.2. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu A-R-I-PS

Epruveta	A-R-I-PS		
	$B=$	6,030	mm
$B_{\min}=$	5,870	mm	
$W=$	12,000	mm	
	x	a_0	a_1
1	0,059	5,770	5,805
2	0,778	5,995	6,425
3	1,497	6,120	6,855
4	2,216	6,295	7,380
5	2,935	6,390	7,560
6	3,654	6,370	7,555
7	4,373	6,360	7,795
8	5,092	6,310	8,080
9	5,811	6,165	6,560
	$a_{0\max}=$	6,390	mm
	$a_{0\min}=$	5,770	mm
	$a_{0\min/\max}(\%)=$	9,703	%
	$a_0=$	6,226	mm
	$a_1=$	7,229	mm
	$\Delta a=$	1,003	mm
	$a_0/W=$	0,519	-

Tabela A.3. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu A-R-P-IS

Epruveta	A-R-P-IS		
		$B=$	5,970
	$B_{\min}=$	5,940	mm
	$W=$	12,060	mm
	x	a_0	a_1
1	0,059	6,230	6,420
2	0,787	6,595	6,955
3	1,515	6,690	7,275
4	2,242	6,755	7,635
5	2,970	6,880	7,920
6	3,698	6,875	7,850
7	4,425	6,755	7,460
8	5,153	6,475	6,685
9	5,881	6,100	6,135
	$a_{0\max}=$	6,880	mm
	$a_{0\min}=$	6,100	mm
	$a_{0\min/\max} (%)=$	11,337	%
	$a_0=$	6,649	mm
	$a_1=$	7,257	mm
	$\Delta a=$	0,608	mm
	$a_0/W=$	0,551	-

Tabela A.4. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu A-R-P-PS

Epruveta	A-R-P-PS		
		$B=$	5,970
	$B_{\min}=$	5,940	mm
	$W=$	12,060	mm
	x	a_0	a_1
1	0,059	6,085	6,130
2	0,787	6,480	6,720
3	1,515	6,745	7,475
4	2,242	6,855	7,840
5	2,970	6,860	7,970
6	3,698	6,755	7,630
7	4,425	6,685	7,210
8	5,153	6,550	6,825
9	5,881	6,180	6,320
	$a_{0\max}=$	6,860	mm
	$a_{0\min}=$	6,085	mm
	$a_{0\min/\max} (%)=$	11,297	%
	$a_0=(3.4)$	6,633	mm
	$a_1=(3.5)$	7,237	mm
	$\Delta a= a_0 - a_1$	0,604	mm
	$a_0/W=$	0,550	-

Tabela A.5. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-R-I-IS

Epruveta	B-R-I-IS		
	$B=$	6,030	mm
	$B_{min}=$	5,925	mm
	$W=$	12,000	mm
	x	a_0	a_1
1	0,059	5,875	5,990
2	0,785	6,110	6,240
3	1,511	6,240	6,685
4	2,237	6,290	7,000
5	2,963	6,230	7,010
6	3,688	6,260	7,705
7	4,414	6,215	7,320
8	5,140	6,120	7,645
9	5,866	5,935	6,305
	$a_{0max}=$	6,290	mm
	$a_{0min}=$	5,875	mm
	$a_{0min/max} (%)=$	6,598	%
	$a_0=(3.4)$	6,171	mm
	$a_1=(3.5)$	6,969	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,798	mm
	$a_0/W=$	0,514	-

Tabela A.6. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-R-I-PS

Epruveta	B-R-I-PS		
	$B=$	6,030	mm
	$B_{min}=$	5,940	mm
	$W=$	12,000	mm
	x	a_0	a_1
1	0,059	6,025	6,250
2	0,787	6,215	7,670
3	1,515	6,295	7,380
4	2,242	6,325	7,570
5	2,970	6,280	7,490
6	3,698	6,380	7,130
7	4,425	6,340	7,035
8	5,153	6,195	6,370
9	5,881	6,005	6,110
	$a_{0max}=$	6,380	mm
	$a_{0min}=$	6,005	mm
	$a_{0min/max} (%)=$	5,878	%
	$a_0=(3.4)$	6,256	mm
	$a_1=(3.5)$	7,103	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,848	mm
	$a_0/W=$	0,521	-

Tabela A.7. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-R-P-IS

Epruveta	B-R-P-IS		
		$B=$	5,990
	$B_{\min}=$	5,835	mm
	$W=$	12,080	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,850	6,425
2	0,773	6,280	6,770
3	1,488	6,495	7,320
4	2,203	6,595	7,580
5	2,918	6,605	7,500
6	3,632	6,585	7,395
7	4,347	6,550	7,140
8	5,062	6,435	6,665
9	5,777	6,000	6,230
	$a_{0\max}=$	6,605	mm
	$a_{0\min}=$	5,850	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	11,431	%
	$a_0=(3.4)$	6,434	mm
	$a_1=(3.5)$	7,087	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,653	mm
	$a_0/W=$	0,533	-

Tabela A.8. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-R-P-PS

Epruveta	B-R-P-PS		
		$B=$	5,990
	$B_{\min}=$	5,835	mm
	$W=$	12,080	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,990	6,185
2	0,773	6,430	6,600
3	1,488	6,405	7,045
4	2,203	6,465	7,290
5	2,918	6,430	7,310
6	3,632	6,460	7,315
7	4,347	6,365	7,235
8	5,062	6,205	6,775
9	5,777	5,780	6,355
	$a_{0\max}=$	6,465	mm
	$a_{0\min}=$	5,780	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	10,596	%
	$a_0=(3.4)$	6,331	mm
	$a_1=(3.5)$	6,980	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,649	mm
	$a_0/W=$	0,524	-

Tabela A.9. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-S-IS

Epruveta	B-S-IS		
	$B=$	6,060	mm
	$B_{\min}=$	5,965	mm
	$W=$	11,950	mm
	x	a_0	a_1
1	0,060	6,215	6,315
2	0,790	6,415	6,685
3	1,521	6,630	7,270
4	2,252	6,595	7,725
5	2,983	6,630	7,785
6	3,713	6,875	7,915
7	4,444	6,980	7,885
8	5,175	6,905	7,495
9	5,905	6,430	6,725
	$a_{0\max}=$	6,980	mm
	$a_{0\min}=$	6,215	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	10,960	%
	$a_0=(3.4)$	6,669	mm
	$a_1=(3.5)$	7,410	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,741	mm
	$a_0/W=$	0,558	-

Tabela A.10. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu B-S-PS

Epruveta	B-S-PS		
	$B=$	6,060	mm
	$B_{\min}=$	5,965	mm
	$W=$	11,950	mm
	x	a_0	a_1
1	0,060	6,410	6,830
2	0,790	6,865	7,495
3	1,521	6,620	7,800
4	2,252	6,800	7,870
5	2,983	6,565	7,715
6	3,713	6,500	7,665
7	4,444	6,570	7,340
8	5,175	6,355	6,595
9	5,905	6,215	6,215
	$a_{0\max}=$	6,865	mm
	$a_{0\min}=$	6,215	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	9,468	%
	$a_0=(3.4)$	6,573	mm
	$a_1=(3.5)$	7,375	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,802	mm
	$a_0/W=$	0,550	-

Tabela A.11. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-R-I-IS

Epruveta	C-R-I-IS		
		$B=$	5,870
	$B_{\min}=$	5,820	mm
	$W=$	12,000	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,795	6,040
2	0,771	6,070	6,445
3	1,484	6,195	7,015
4	2,197	6,255	7,250
5	2,910	6,275	7,410
6	3,623	6,290	7,320
7	4,336	6,205	6,995
8	5,049	6,075	6,435
9	5,762	5,820	5,940
	$a_{0\max}=$	6,290	mm
	$a_{0\min}=$	5,795	mm
	$a_{0\min/\max} (%) =$	7,870	%
	$a_0=(3.4)$	6,147	mm
	$a_1=(3.5)$	6,858	mm
	$\Delta a = a_0 - a_1$	0,711	mm
	$a_0/W =$	0,512	-

Tabela A.12. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-R-I-PS

Epruveta	C-R-I-PS		
		$B=$	5,870
	$B_{\min}=$	5,810	mm
	$W=$	12,000	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,775	6,090
2	0,770	6,120	6,655
3	1,482	6,235	7,160
4	2,193	6,310	7,445
5	2,905	6,300	7,380
6	3,617	6,275	7,300
7	4,328	6,205	7,130
8	5,040	6,070	6,575
9	5,752	5,770	6,040
	$a_{0\max}=$	6,310	mm
	$a_{0\min}=$	5,770	mm
	$a_{0\min/\max} (%) =$	8,558	%
	$a_0=(3.4)$	6,161	mm
	$a_1=(3.5)$	6,964	mm
	$\Delta a = a_0 - a_1$	0,803	mm
	$a_0/W =$	0,513	-

Tabela A.13. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-R-P-IS

Epruveta	C-R-P-IS		
		$B=$	6,000
	$B_{\min}=$	5,915	mm
	$W=$	11,970	mm
	x	a_0	a_1
1	0,059	5,810	5,915
2	0,784	6,010	6,945
3	1,508	6,055	6,975
4	2,233	6,090	7,525
5	2,958	6,110	7,350
6	3,682	6,030	7,250
7	4,407	5,955	6,635
8	5,131	5,790	5,915
9	5,856	5,675	5,725
	$a_{0\max}=$	6,110	mm
	$a_{0\min}=$	5,675	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	7,119	%
	$a_0=(3.4)$	5,973	mm
	$a_1=(3.5)$	6,802	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,829	mm
	$a_0/W=$	0,499	-

Tabela A.14. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-R-P-PS

Epruveta	C-R-P-PS		
		$B=$	6,000
	$B_{\min}=$	5,780	mm
	$W=$	11,970	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,685	5,760
2	0,766	5,995	6,245
3	1,474	6,075	6,600
4	2,182	6,175	7,160
5	2,890	6,165	7,390
6	3,598	6,080	7,145
7	4,306	6,020	6,885
8	5,014	6,005	6,370
9	5,722	5,845	5,875
	$a_{0\max}=$	6,175	mm
	$a_{0\min}=$	5,685	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	7,935	%
	$a_0=(3.4)$	6,035	mm
	$a_1=(3.5)$	6,702	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,667	mm
	$a_0/W=$	0,504	-

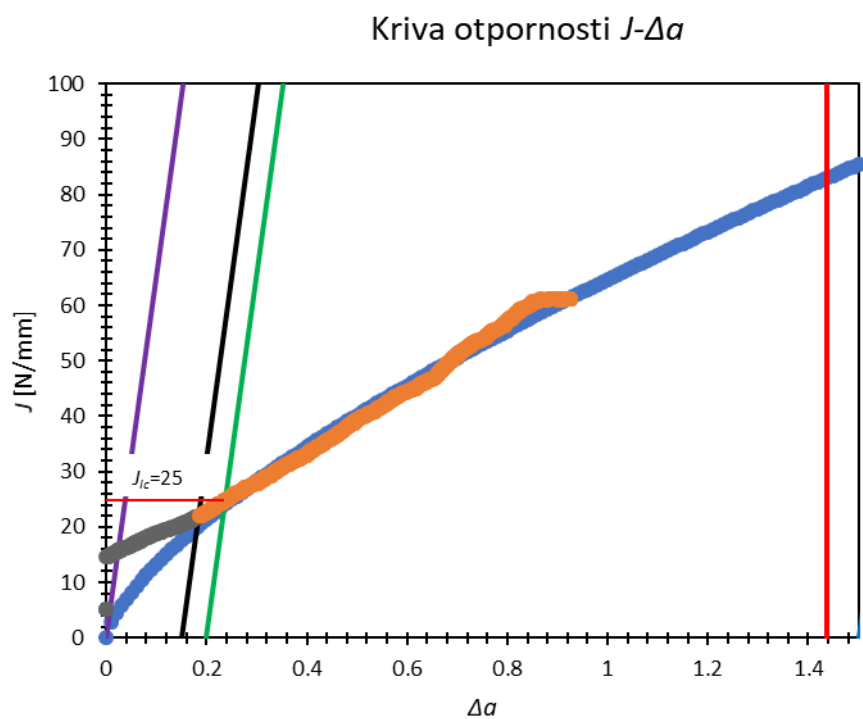
Tabela A.15. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-S-IS

Epruveta	C-S-IS		
		$B=$	5,930
	$B_{\min}=$	5,845	mm
	$W=$	12,050	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	5,750	5,885
2	0,774	6,115	6,405
3	1,490	6,555	7,770
4	2,206	6,680	7,680
5	2,923	6,795	7,625
6	3,639	6,865	7,735
7	4,355	6,785	7,860
8	5,071	6,720	7,885
9	5,787	6,455	6,690
	$a_{0\max}=$	6,865	mm
	$a_{0\min}=$	5,750	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	16,242	%
	$a_0=(3.4)$	6,577	mm
	$a_1=(3.5)$	7,406	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,829	mm
	$a_0/W=$	0,546	-

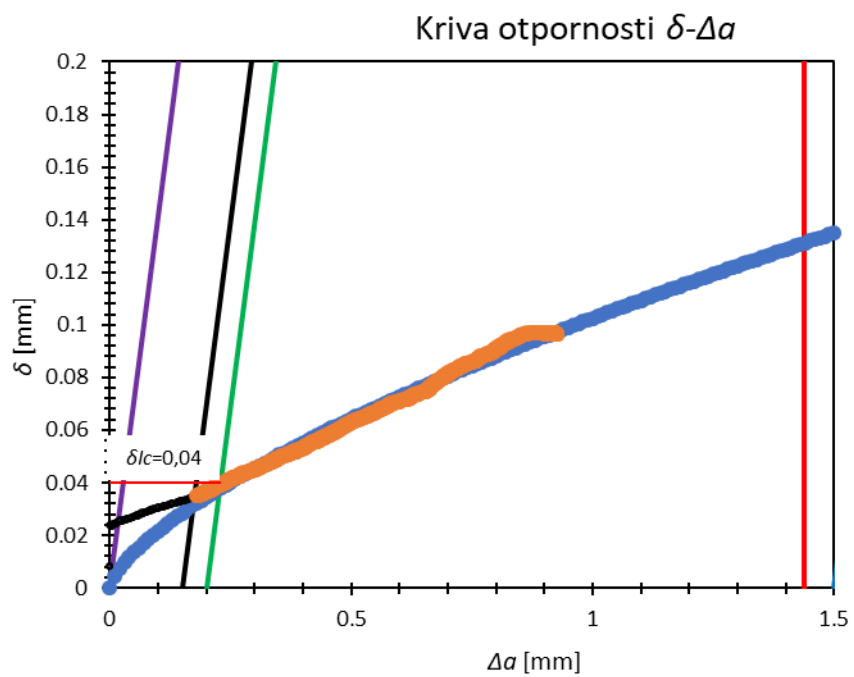
Tabela A.16. Merenja dužine zamorne prsline za epruvetu C-S-PS

Epruveta	C-S-PS		
		$B=$	5,930
	$B_{\min}=$	5,830	mm
	$W=$	12,050	mm
	x	a_0	a_1
1	0,058	6,585	6,930
2	0,772	6,820	7,995
3	1,487	6,885	8,015
4	2,201	6,930	7,920
5	2,915	6,860	7,670
6	3,629	6,715	7,780
7	4,343	6,580	7,835
8	5,058	6,225	6,405
9	5,772	5,710	5,845
	$a_{0\max}=$	6,930	mm
	$a_{0\min}=$	5,710	mm
	$a_{0\min/\max} (\%)=$	17,605	%
	$a_0=(3.4)$	6,645	mm
	$a_1=(3.5)$	7,501	mm
	$\Delta a= a_0- a_1$	0,856	mm
	$a_0/W=$	0,551	-

PRILOG B

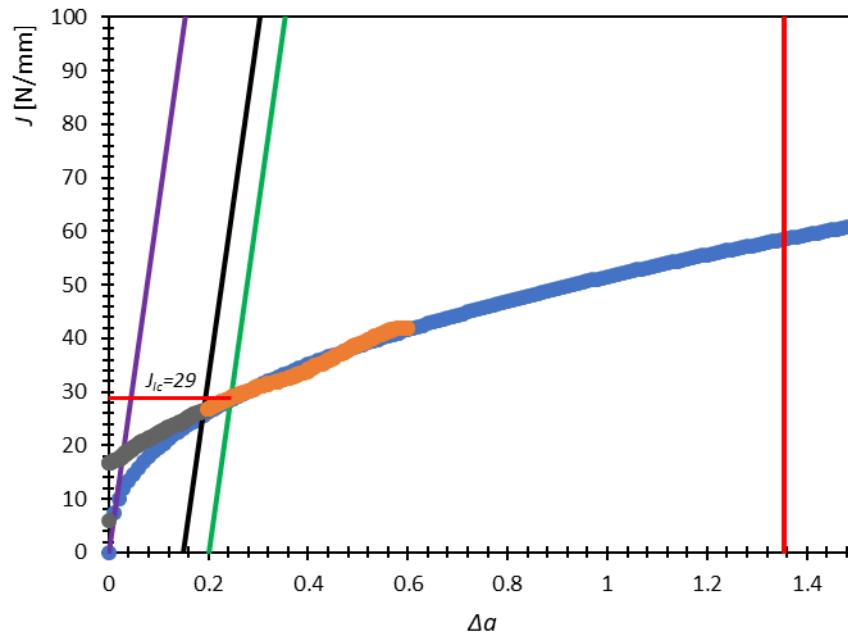


Slika P.B.1. Krična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak A-R-I



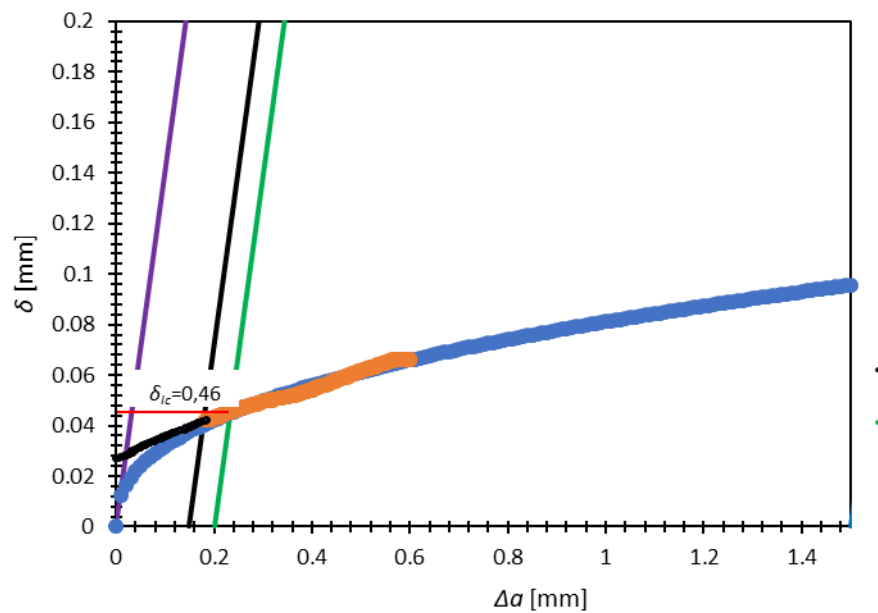
Slika P.B.2. Krična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak A-R-I

Kriva otpornosti $J-\Delta a$

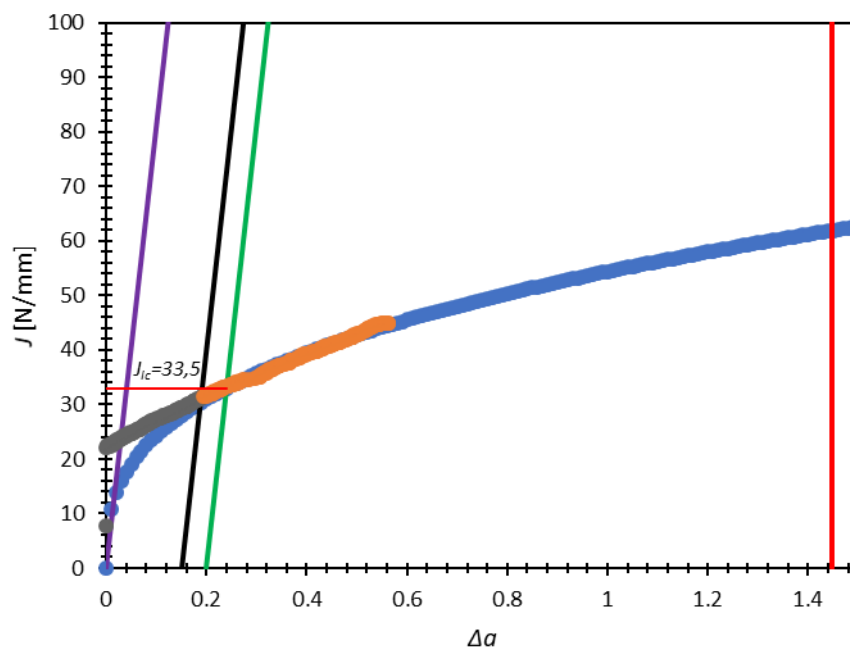
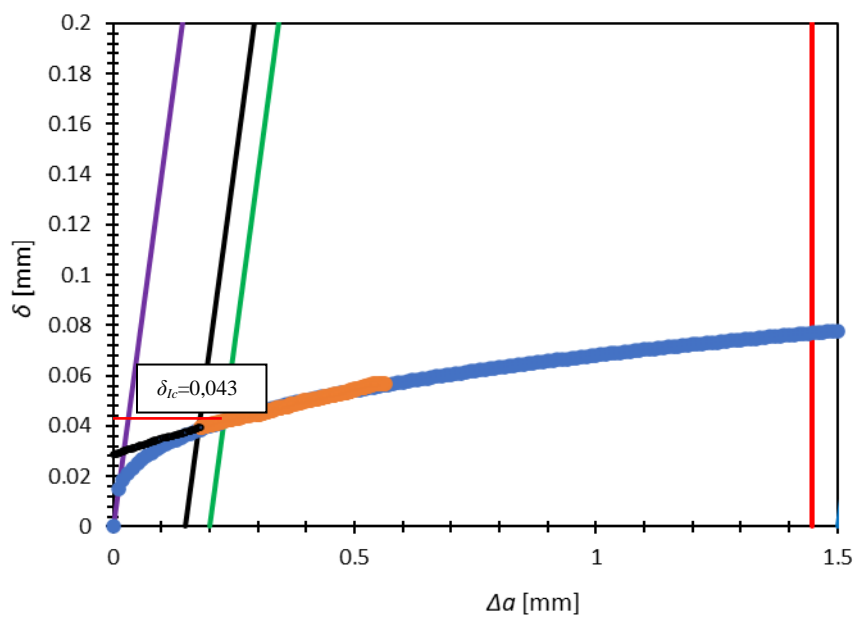


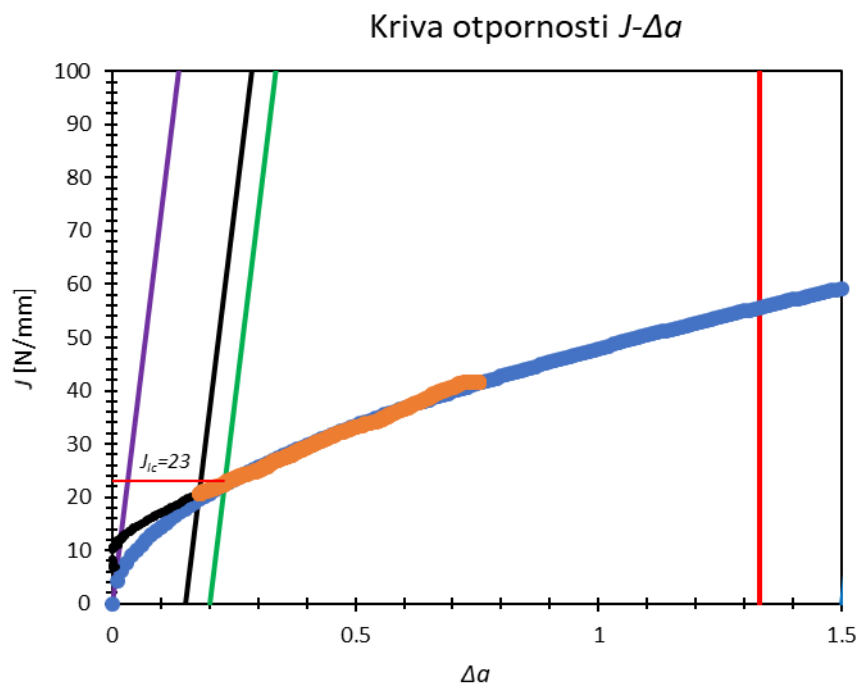
Slika P.B.3. Krična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak A-R-P

Kriva otpornosti $\delta-\Delta a$

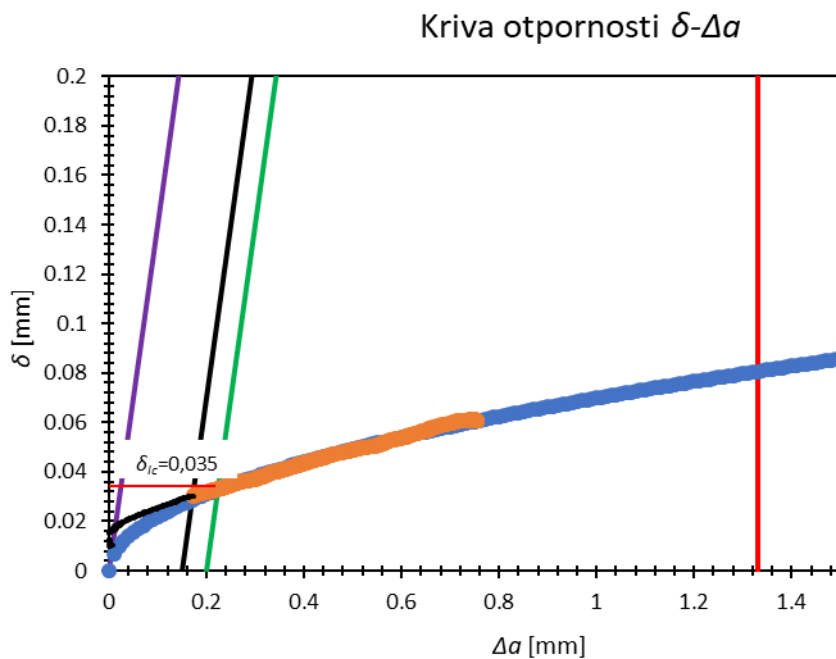


Slika P.B.4. Krična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak A-R-P

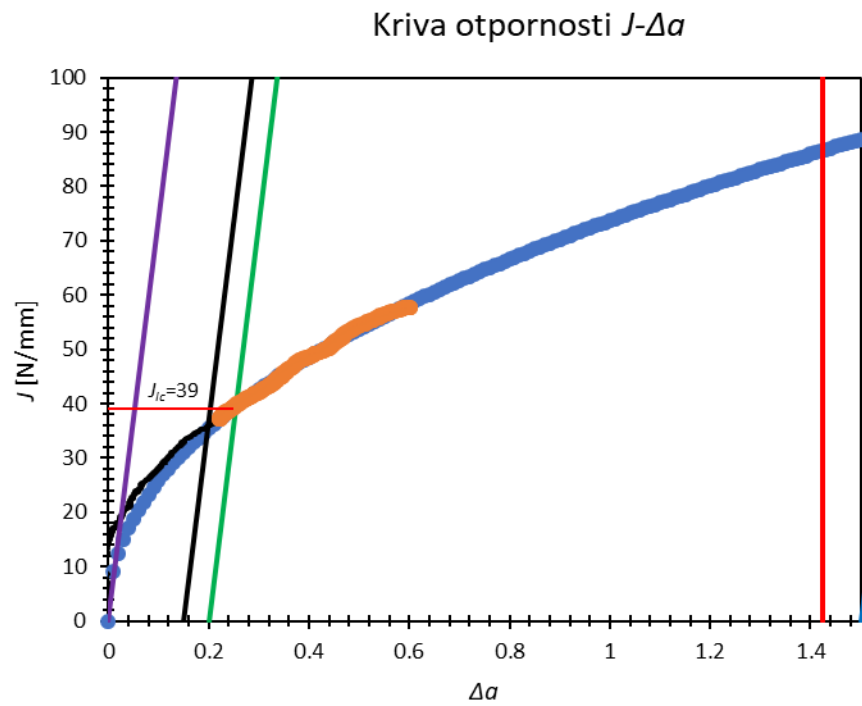
Kriva otpornosti $J-\Delta a$ Slika P.B.5. Krična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak B-R-IKriva otpornosti $\delta-\Delta a$ Slika P.B.6. Krična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak B-R-I



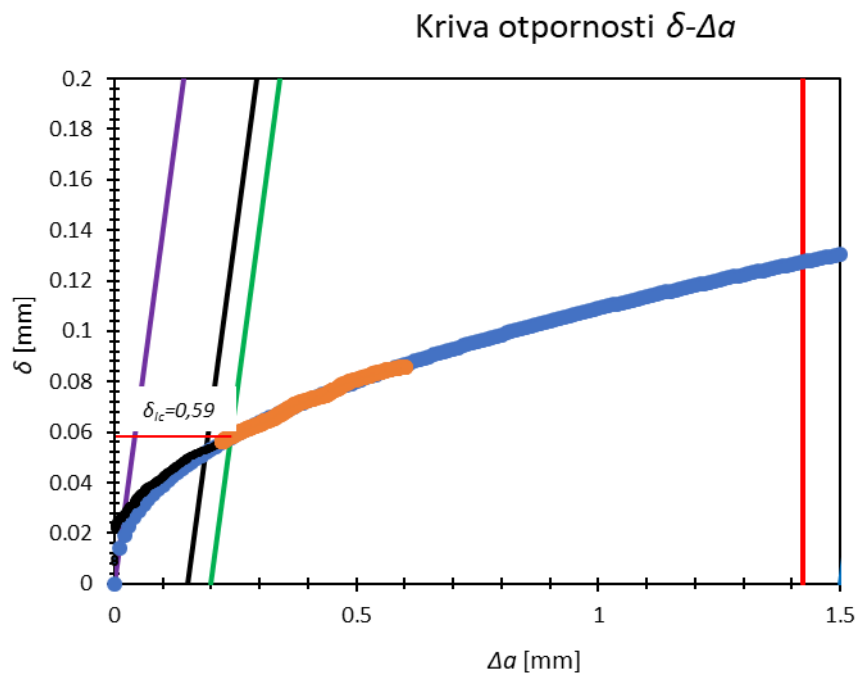
Slika P.B.7. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak B-S



Slika P.B.8. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak B-S

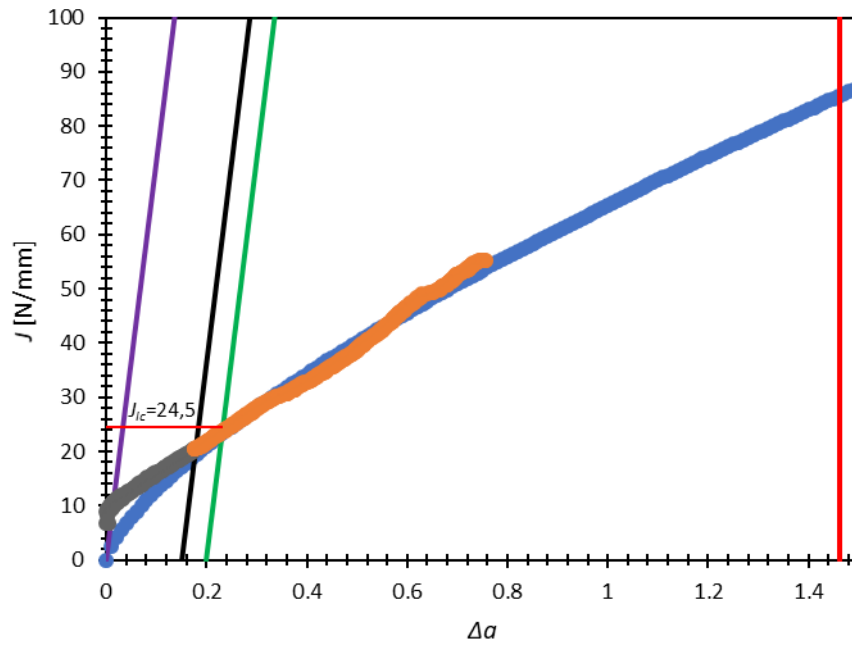


Slika P.B.9. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak B-R-P



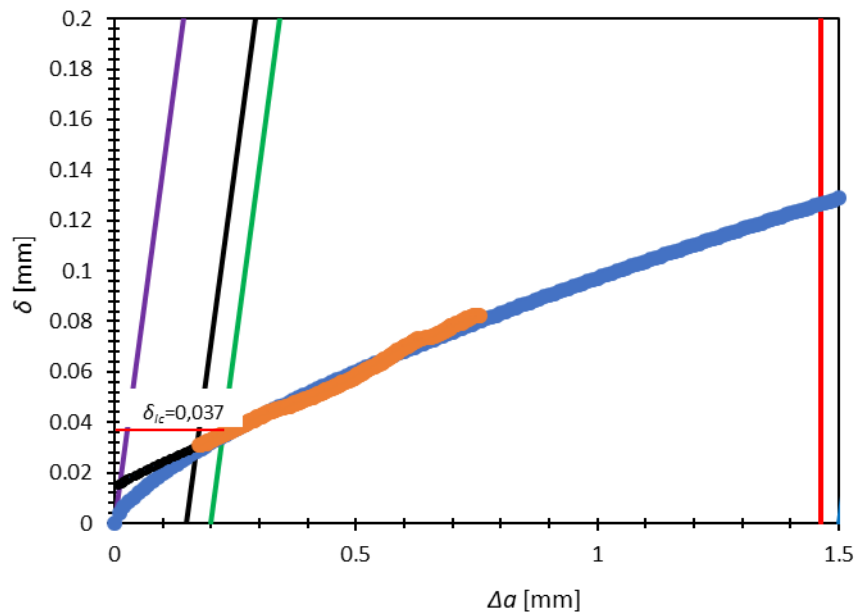
Slika P.B.10. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak B-R-P

Kriva otpornosti $J-\Delta a$



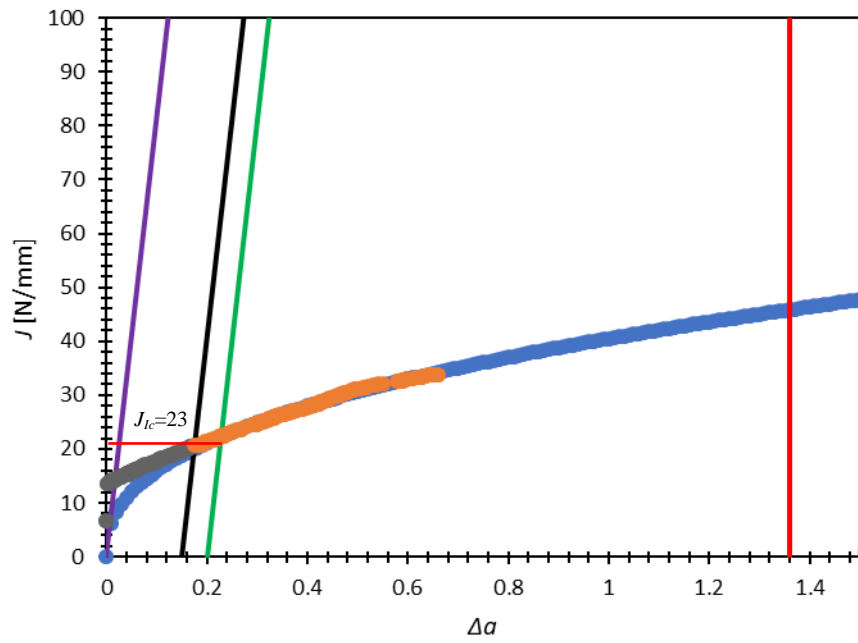
Slika P.B.11. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak C-R-I

Kriva otpornosti $\delta-\Delta a$



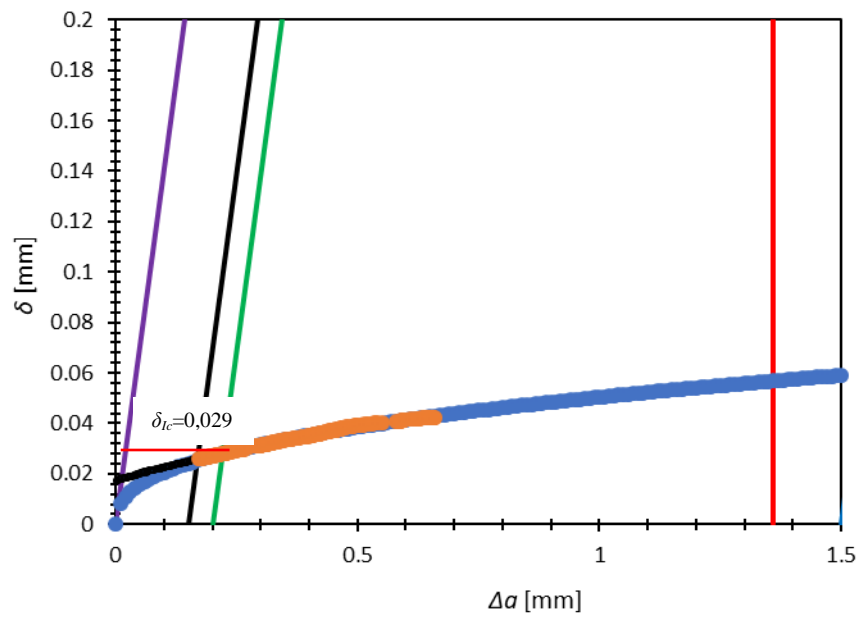
Slika P.B.12. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak C-R-I

Kriva otpornosti $J-\Delta a$

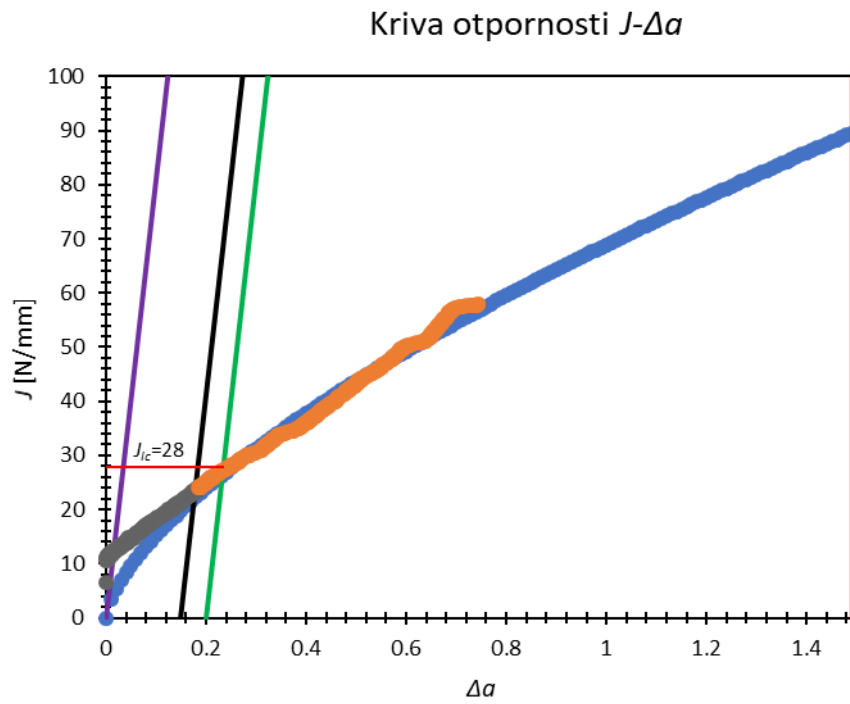


Slika P.B.13. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak C-S

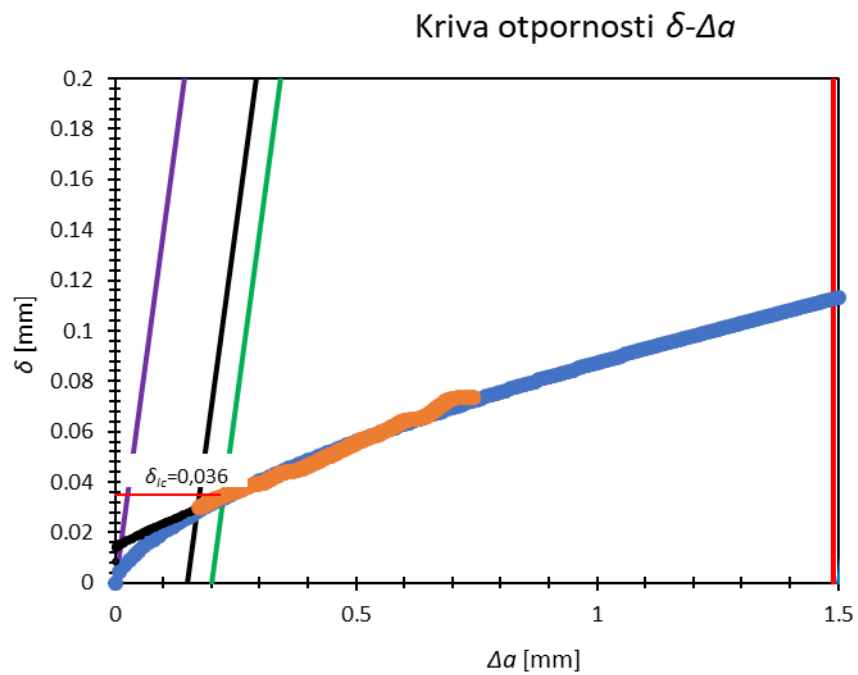
Kriva otpornosti $\delta-\Delta a$



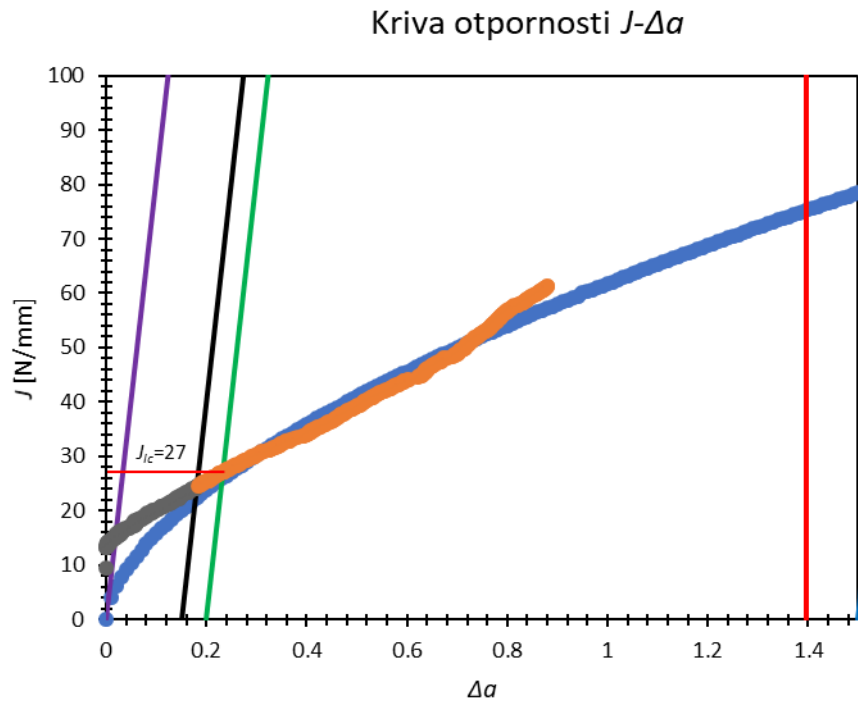
Slika P.B.14. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak C-S



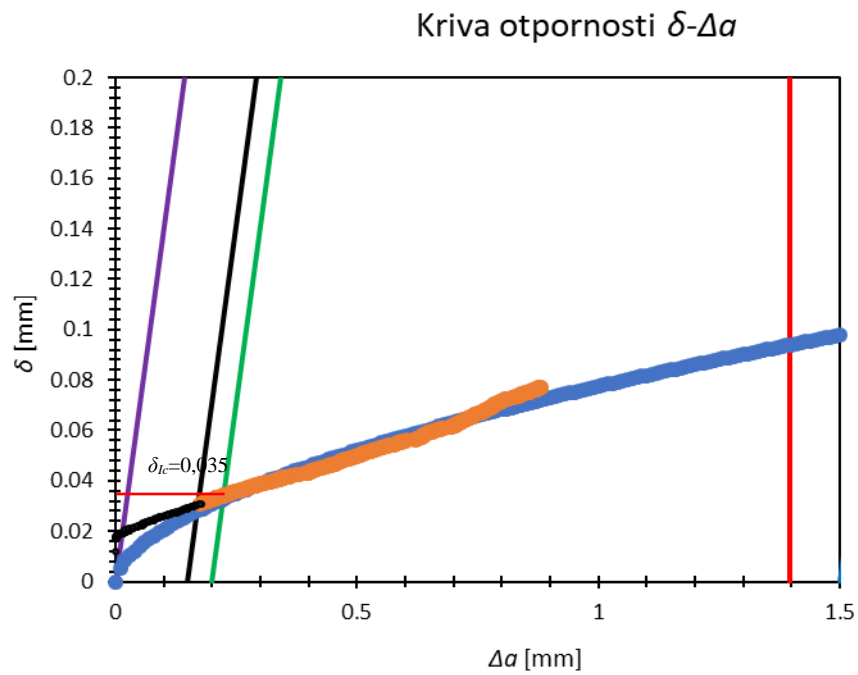
Slika P.B.15. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak C-R-P



Slika P.B.16. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak C-R-P

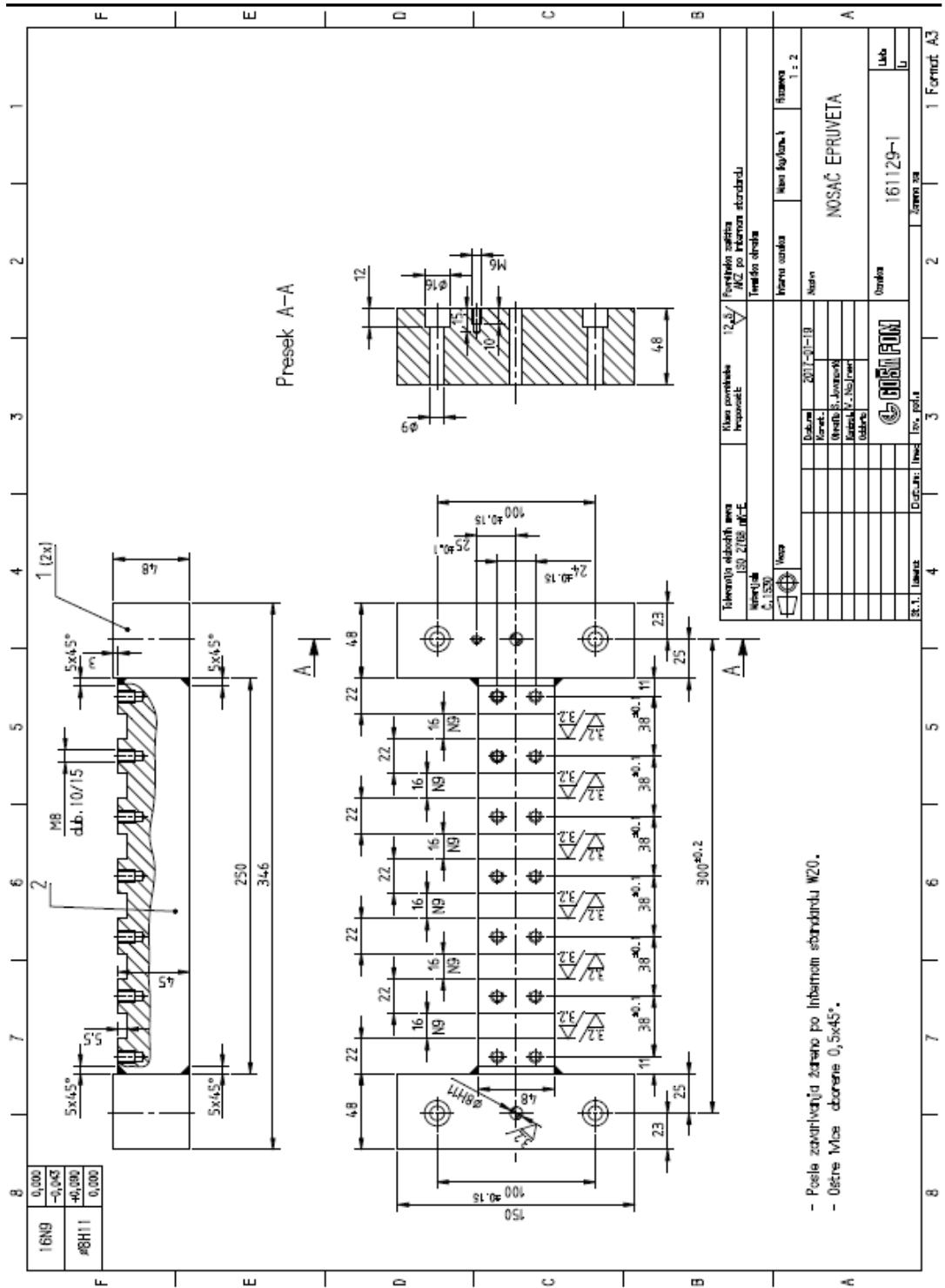


Slika P.B.17. Kritična vrednost J – integrala J_{Ic} za uzorak OM

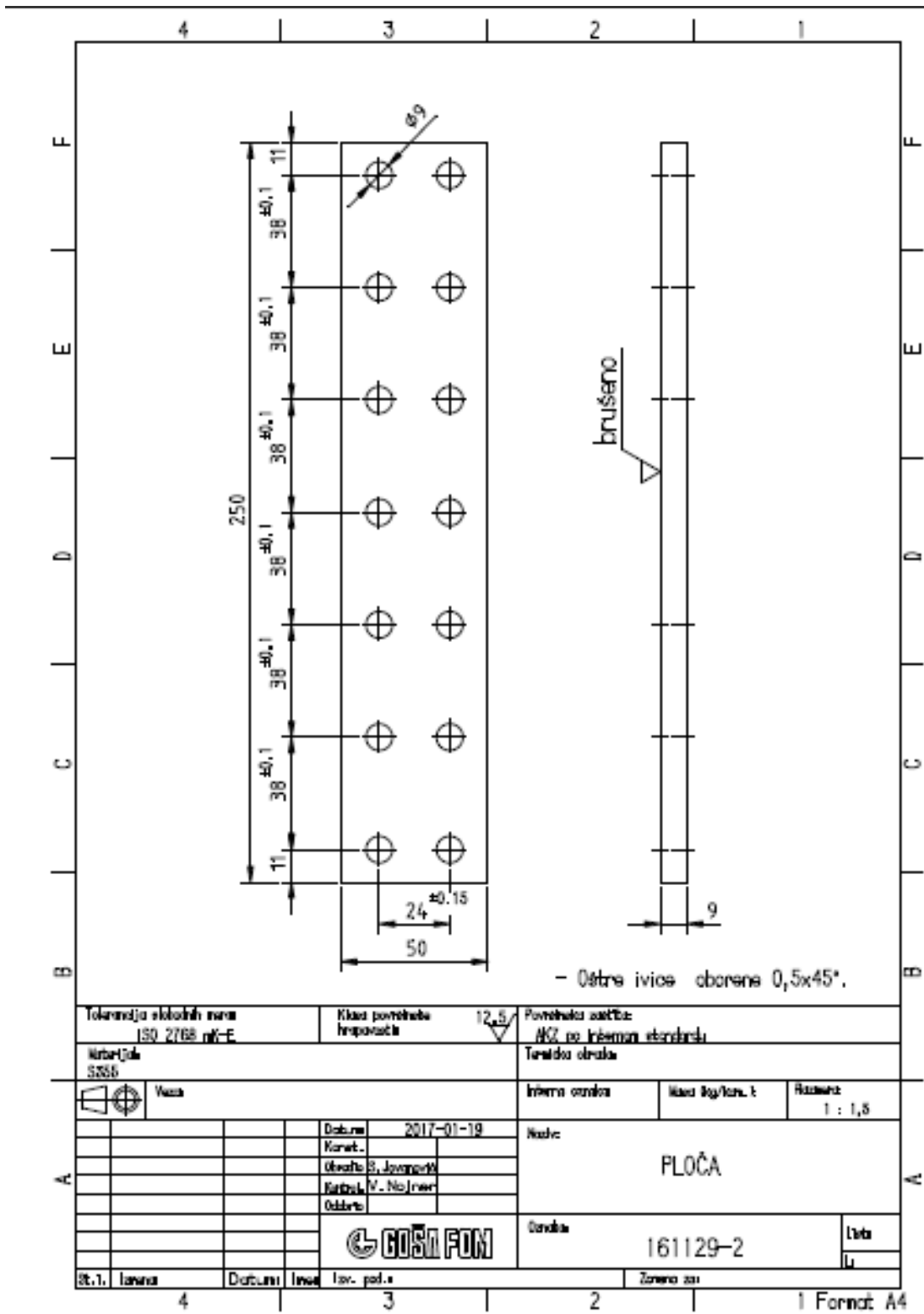


Slika P.B.18. Kritična vrednost otvaranja prsline δ_{Ic} za uzorak OM

PRILOG C



Slika P.C.1. Radionički crtež nosača epruveta



Slika P.C.2. Radionički crtež ploče za stezanje epruveta

BIOGRAFIJA AUTORA

Miodrag Milčić, diplomirani mašinski inženjer, rođen je 21.09.1987. u Leskovcu. Osnovnu školu i Gimnaziju je završio u Leskovcu.

Osnovne studije na Mašinskom fakultetu u Nišu upisuje 2006 godine. Diplomirao je 2011. godine na katedri za Mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering sa temom diplomskog rada „Eksperimentalno upoređenje MIG, TIG i FSW postupka zavarivanja za leguru aluminijuma 2024 T351“.

Nakon završenih osnovnih studija upisuje doktorske akademske studije 2011. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu. U nastavku doktorskih akademskih studija, u periodu od 2012. godine do 2014. godine, radi kao saradnik u nastavi na katedri za Mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering. 2014. godine je izabran u zvanje asistenta na katedri za Mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering.

2013. godine stiče zvanje Međunarodni inženjer zavarivanja (IWE) na specijalističkom kursu za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja na Mašinskom fakultetu u Nišu. Član je društva ADEKO (Asocijacija za dizajn, elemente i konstrukcije), DUZS (Društva za unapređenje zavarivanja Srbije) i DIVK (Društvo za integritet i vek konstrukcija).

Trenutno živi u Nišu. Oženjen je i otac dvoje dece.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Истраживање утицаја параметара заваривања трењем са мешањем на динамичку издржљивост завареног споја легуре алуминијума 2024 T351“

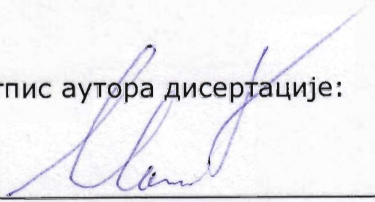
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 01.06.2020.

Потпис аутора дисертације:


Милчић Миодраг

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

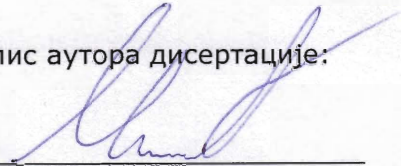
Наслов дисертације:

„Истраживање утицаја параметара заваривања трењем са мешањем на динамичку издржљивост завареног споја легуре алуминијума 2024 Т351“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 01.06.2020.

Потпис аутора дисертације:



Милчић Миодраг

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Истраживање утицаја параметара заваривања трењем са мешањем на динамичку издржљивост завареног споја легуре алуминијума 2024 T351“

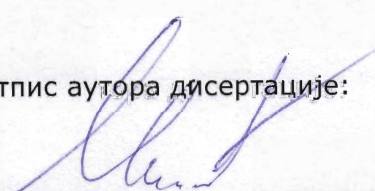
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)**⁴

У Нишу, 01.06.2020.

Потпис аутора дисертације:


Милчић Миодраг

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	Милчић Драган Миодраг
Датум и место рођења	21.09.1987. Лесковац

Основне студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет у Нишу
Студијски програм	Машинско инжењерство
Звање	Дипломирани машински инжењер
Година уписа	2006.
Година завршетка	2011.
Просечна оцена	9,73

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет	
Факултет	
Студијски програм	
Звање	
Година уписа	
Година завршетка	
Просечна оцена	
Научна област	
Наслов завршног рада	

Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Ниш
Факултет	Машински факултет у Нишу
Студијски програм	Машинско инжењерство
Година уписа	2017
Остварен број ЕСПБ бодова	180
Просечна оцена	9,67

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ НА ДИНАМИЧКУ ИЗДРЖЉИВОСТ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА 2024 Т351
Име и презиме ментора, звање	Др Бобан Анђелковић, редовни професор
Име и презиме коментора, звање	Др Јанез Крамбергер, ванредни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	Одлука број 8/20-01-007/16-017 од 26.10.2016.

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	220
Број поглавља	5
Број слика (шема, графика)	198
Број табела	22

Број прилога	3

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Dragan Milčić, Janez Kramberger, THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION-STIR-WELDED JOINTS OF 2024 T351 ALUMINUM ALLOYS, <i>Materiali in Tehnologije, INST ZA KOVINSKE MATERIALE I IN TEHNOLOGIE</i>, Volume 53, 6, pp. 771 - 776, 1580-2949, 620.1:67.017:621.791.1:669.715, 10.17222/mit.2019.062, 2019.</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> Циљ овог рада је анализирати утицај dominantnih parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem на механичке својства завarenih spojeva. Eksperimentalna ispitivanja su izvršena на pločama debljine 6 mm израđenih од легуре алуминијума AA 2024 T351. Број обртаја алата је држан константним 750 min^{-1}, а брзина заваривања је верирана (73, 116 и 150) mm / min. Добијени заварени spojevi су били са прихватљивом равном предњом површином, без унутрашњих грешака. У раду су дати резултати испитивања механичких својства завarenih spojeva: профил тврдоће завареног spoja, резултати испитивања затезних својстава, резултати испитивања на савијање и резултати испитивања ударне žilavosti. Профил расподеле тврдоће је ураđen дуž три horizontalna смера: у близини лица, у средини и близу корена завареног spoja. За испитивање ударне žilavosti коришћено је инструментално клатно Amsler RPK 300. Резултати ударне žilavost су дати за различите structure завареног spoja.</p>	M23
2	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Dragan Milčić, UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM NA KARAKTERISTIKU ZAVARENOG SPOJA PLOČA OD LEGURE ALUMINIJUMA 2024 T351, <i>Nauka+ Praksa, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš</i>, 20, 1, pp. 52 - 59, 1451-8341, 693.827:621.791.9, 2017.</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> Граđевинске конструкције од алуминијума потенцијално имају све већу примену захваљујући доброј корозионој постојаности, лакоћи легуре, отпорности на крти лом итд. У овом раду описан је утицај заваривања trenjem са меšanjem на структурне и механичке карактеристике легуре алуминијума 2024 T351. Eksperimentalna istraživanja zavarivanja су раđена на pločama debljine 6mm. Zvarivanje је извршено glodalicom помоћу посебно обликованог алата. При заваривању trenjem са меšanjem, rotacija алата у свим случајевима била 750 min^{-1}, а менјала се брзина заваривања: 73 mm/min, 116 mm/min, 150 mm/min. Сви узорци су заварени без грешака и преконтролисани радиografsки и vizuelно. У раду су дати резултати испитивања затезних механичких својстава, ударне žilavosti I микроструктуре завarenih spojeva.</p>	M51
3	<p>Miodrag Milčić, Dragan Milčić, Boban Anđelković, MODAL ANALYSIS OF FIXTURE WITH SPECIMENS FOR FATIGUE TESTING OF WELDED JOINTS ON ELECTRODYNAMIC SHAKER, <i>Machine Design, Vol.9 (2017) No. 4</i>, pp. 133 - 138, 1821-1259. DOI: 10.24867/MD.9.2017.4.133-138</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> За конструисање поузданих завarenih маšинских конструкција које раде у условима променљивих opterećenja, neophodni су подаци о понашању завarenih spojeva у тим условима. За испитивање на замарање применјују се servo-hidраулични pulzatori. Takva ispitivanja су врло заhtevna, skupa и дуго трају. У раду је дат приказ методологије испитивања на замор завarenih spojeva на vibracionim stolovima uređaja који се зову šejkeri. На elektrodinamičким системима за тестирање vibracija је могуће истовремено замарати већи број epruveta и тако смањити време испитивања. У раду је приказана методологија испитивања завarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem са меšanjem уз приказ развијених облика epruveta за испитивање и uređaja за фиксирање epruveta.</p>	M51
4	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Janez Kramberger, Dragan Milčić, Boban Anđelković, PONAŠANJE ZAVARENOG SPOJA LEGURE ALUMINIJUMA 2024 T351 OSTVARENOG ZAVARIVANJEM TRENJEM SA MEŠANJEM PRI UDARNOM LOMU, 3. MEĐUNARODNA NAUČNA KONFERENCIJA COMETA 2016, "Primijenjene tehnologije u mašinskom inženjerstvu", Jahorina, pp. 333 - 340, 978-99976-623-7-8, Istočno Satrajevo, Jahorina, RS, BiH, 7. - 9. Dec, 2016</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> Legure aluminijuma су наше široku primenu у automobilskoj и vazduhoplovnoj industriji. Obe industrije pomeraju granice novih inovativnih proizvoda, zahtevom за većom nosivošću и ujedno manjom masom уз robustan dizajn. У cilju određivanja uticaja parametara zavarivanja (odnos brzine rotacije алата и brzine zavarivanja translacije) на dinamičku izdržljivost завarenih spojeva, добијених zavarivanjem ploča postupkom zavarivanja trenjem са меšanjem на leguri AA 2024-T351, varirani су parametri zavarivanja. Primenom standardnih ispitivanja mehaničko-tehnoloških osobina завarenih spojeva omogućena је ocene kvaliteta завarenih spojeva. У раду је дат deo ispitivanja који се односи на испитивање udarnim dejstvom sile. За испитивање</p>	M33

	je korišćeno instrumentirano klatno u analizi ukupne energije udara i komponenti ukupne energije udara.	
5	<p>Miodrag Milčić, Dragan Milčić, Boban Anđelković, Nataša Zdravković, Design of fixator for vibration testing of welded joints specimens, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2017, pp. 583 - 588, 978-99938-39-73-9, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 26. - 27. May, 2017</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Ispitivanja na zamor zavarenih spojeva na servo-hidrauličnim pulzatorima je skupo i dugotrajno. Iz tog razloga je na Mašinskom fakultetu u Nišu razvijena metoda ispitivanja na zamaranje na visokofrekventnom elektrodinamičkom šejkeru Sentek Dynamics. Jedna od osnovnih stvari za ispitivanje na šejkeru je učvršćivanje (fiksiranje) predmeta ispitivanja. Povezanost epruveta i vibracionog stola šejkera se ostvaruje pomoću posebno oblikovanog fiksatora koji omogućava konzolno stezanje 12 epruveta. U radu je dat prikaz konstruisanja fiksatora za ispitivanje epruveta poseno oblikovanih za ispitivanja na zamaranje na elektrodinamičkom šejkeru.</p>	M33
6	<p>Boban Anđelković, Dragan Milčić, Biljana Đorđević, Miodrag Milčić, Nataša Zdravković, Measuring system for determining SN curve based on Arduino platform, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2017, pp. 577 - 582, 978-99938-39-73-9, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 26. - 27. May, 2017</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Rad je povezana sa prethodnim radom. Za ispitivanje na zamaranje 12 fiksiranih epruveta na visokofrekventnoj elektrodinamičkoj mašini (šejkeru) Sentek Dynamics, neophodno je registrovati trenutak loma i na taj način da se odredi broj ciklusa do loma. S obzirom da je na fiksatoru stegnuto 12 epruveta na početku ispitivanja, potrebno je otkriti trenutak loma svake epruvete do kraja ispitivanja seta epruveta. Upotreba konvencionalne merne opreme je izuzetno skupa, a verovatnoća oštećenja opreme je velika. Iz tih razloga, u ovom radu, je dat prikaz razvijenog jeftinog, jednostavnog, pouzdanog i autonomnog mernog sistema sa velikim mernim potencijalom zasnovan na ARDUINO platformi, sa zadatkom utvrđivanja na kojoj epruveti se dogodio lom i koliko je ta epruveta radila da loma.</p>	M33
7	<p>Miodrag Milčić, Dragan Milčić, Boban Anđelković, Igor Radisavljević, Aleksandar Živković, Slobodan Jovanović, Friction stir welding of aluminium alloys 2024, 9. INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PROFESSIONAL CONFERENCE SBW 2017 „ENGINEERING TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING OF WELDED CONSTRUCTIONS AND PRODUCTS, SBW 2017.“, pp. 163 - 175, 978-953-6048-89-2, Slavonski Brod, Croatia., 25. - 27. Oct, 2017</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu je prikazan razvijeni test setup za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva na visoko frekventnoj mašini Sentek Dynamics. Veza između armature mašine za ispitivanje i uzoraka za ispitivanje je ostvarena pomoću specijalno dizajniranog fiksatora, koji omogućava konzolno stezanje epruveta. U cilju skraćenja vremena trajanja ispitivanja, razvijeni fiksator omogućava istovremeno ispitivanje 12 epruveta. Fiksator je izrađen od čelika sa odgovarajućim vezama za armaturu mašine za ispitivanje. U cilju razvijanja metodologije ispitivanja dinamičke izdržljivosti definisani su i izrađeni setovi tegova za opterećivanje epruveta i ostvarivanje željenih nivoa naponskih stanja u zavarenom spoju epruveta. Urađena je modalna analiza sklopa fiksatora i epruveta u cilju definisanja parametara ispitivanja dinamičke izdržljivosti.</p>	M33
8	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Janez Kramberger, Nataša Zdravković, Influence of Kinematic Factors of Friction Stir Welding on the Characteristics of Welded Joints of Plates Made of EN AW-2024 T351 Aluminium Alloy, The 4th International Conference MECHANICAL ENGINEERING IN XXI CENTURY, pp. 197 - 202, 978-86-6055-103-2, Niš, 19. - 20. Apr, 2018</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu se, na osnovu eksperimentalnih istraživanja zavarenih spojeva ostvarenih trenjem sa mešanjem, zaključuje da odnos između broja obrtaja alata i brzine zavarivanja direktno utiče na vrednost udarne žilavosti i energije loma na iniciranje i širenje prsline. Asimetrija zavarenog spoja i promene metalurških transformacija koje se javljaju oko trna alata i ispod ramena alata, tokom procesa zavarivanja, utiču na vrednost udarne žilavosti u različitim oblastima zavarenog spoja. Profil raspodele mikro tvrdoće zavisi od nivoa generisane toplote na osnovu trenja alata i materijala koji se zavaruju i plastične deformacije materijala u zoni trna. Ovo istraživanje ukazuje da zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja $n/v = 750/116 \text{ o / min / (mm / min)}$ postiže bolja svojstva i mikrostrukturu u odnosu na zavarne spojeve ostvarene parametrima zavarivanja $n/v = 750/73 \text{ i } 750/150 \text{ o / min / (mm / min)}$.</p>	M33
9	<p>Dragan Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Miodrag Milčić, Jovan Radovanović, Nataša Zdravković, Effect of FSW Welding Speed on Mechanical Properties of AA2024 T351 Aluminum Alloy, The 4th IIW South</p>	M33

	<p>– East European Welding Congress “Safe Welded Construction by High Quality Welding“, pp. 1 - 7, 978-86-82585-13-8, Beograd, 10. - 13. Oct, 2018</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu je dat uticaj brzine zavarivanja postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem na profil raspodele mikrotvrdoće. Konstatovana je efikasnost spoja čak 97% osnovnog metala za parametre zavarivanja $n=750 \text{ min}^{-1}$ i $v=116 \text{ mm / min}$. Takođe, najveće izduženje zavarenog spoja se postiže se parametrima zavarivanja 750/116 i iznosi 7,2%. Odnos između broja obrtaja alata i brzine zavarivanja n/v direktno utiče na vrednost udarne žilavosti i energije loma koji su potrebni za iniciranje i širenje prsline; Najveće vrednosti udarne energije izmerene su na uzorcima zavarenim sa parametrima zavarivanja $n = 750 \text{ min}^{-1}$ i $v= 116 \text{ mm / min}$ za zarez na strani napredovanja.</p>	
10	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Dragan Milčić, Janez Kramberger, Boban Anđelković, Mechanical behaviour of Al 2024 alloy welded by friction stir welding, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 393, The 10th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (KOD 2018) 6–8 June 2018, Novi Sad, Serbia .</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu su prikazani rezultati strukturnih i mehaničkih ispitivanja legiranih legura aluminija AA 2024 zavarenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Pomoću optimizovanog alata i zavarivanja spojene su ploče debljine 6 mm. U ovom radu su data istraživanja uticaj brzine zavarivanja na makro i mikrostrukтури, tvrdoći zavarenih spojeva. Takođe su zbog heterogene strukture zavarenog spoja u radu su dati rezultati ispitivanja udarne žilavosti u različitim oblastima zavarenog soja (ZM i ZTMU). S obzirom da je ispitivanje udarne žilavosti vršeno na instrumentiranom klatnu definisana je energija potrebna za iniciranja i energija potrebna za razvoj prsline.</p>	M33
11	<p>Tomaž Vuherer, Janez Kramberger, Dragan Milčić, Miodrag Milčić, Srećko Glodež, Fatigue behaviour of friction stir welded AA-2024 aluminium alloy sheets, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 659, 1, 1757-8981, Kragujevac, Serbia, 5. - 7. Sep, 2019</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Predstavljeni rad se bavi mehaničkim svojstvima i svojstvima zamaranja zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem legure aluminija AA-2024 T351. Korišćenjem optimizovanog alata za zavarivanje izrađeni su sučeoni zavareni spojevi ploča debljine 6 mm. U prvom delu rada dat je uticaj brzine zavarivanja na mikrostrukтуру i mehanička svojstva zavarenih spojeva ostvarenih različitim brzinama zavarivanja. U nastavku je analizirano ponašanje na zamaranje tretiranih zavarenih spojeva na osnovu eksperimentalnog ispitivanja na servo-hidrauličkoj mašini za ispitivanje zamora na sobnoj temperaturi sa odnosom napona $R = 0,1$ Eksperimentalni rezultati pokazuju da parametri zavarivanja imaju značajan uticaj na mehanička i zamorna svojstvima zavarenih spojeva AA-2024 T351.</p>	M33
12	<p>Miodrag Milčić, Zijah Burzić, Igor Radisavljević, Tomaž Vuherer, Dragan Milčić, Vencislav Grabulov, “Experimental investigation of fatigue properties of FSW in AA2024-T351”, ScienceDirect, Procedia Structural Integrity vol.13, pp. 1977-1984 (ECF22 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity), 2018.</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu su, osim rezultata mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava zavarenih spojeva, prikazani rezultati ispitivanja na zamor zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem sa različitim parametrima. Rezultati istraživanja pokazuju da zavareni spojevi ostvareni parametrima zavarivanja $n/v=750/116 \text{ min}^{-1} / (\text{mm} / \text{min})$ imaju veću dinamičku izdržljivost u odnosu na druge zavarene spojeve, koji su bili predmet istraživanja, ostvarene parametrima zavarivanja $n/v= 750/73$ i $750/150 \text{ min}^{-1} / (\text{mm} / \text{min})$.</p>	M33
13	<p>Miodrag Milčić, Tomaž Vuherer, Igor Radisavljević, Dragan Milčić, “Experimental Investigation of Mechanical Properties on Friction Stir Welded Aluminum 2024 Alloy”, In: Mitrovic N., Milosevic M., Mladenovic G. (eds) Experimental and Numerical Investigations in Materials Science and Engineering. CNNTech 2018, CNNTech 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 54. Springer, Cham (Print ISBN978-3-319-99619-6, Series Online ISSN2367-3389, Online ISBN978-3-319-99620-2), 2019.</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>U radu su sveobuhvatno prikazani rezultati ispitivanja zavarenih spojeva legure aluminijuma AA 2024 T351 zavarenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Za parametre zavarivanja, koji su izabrani za ovo istraživanje, broj obrtaja je držan konstantnim 750 min^{-1}, a brzina zavarivanja se varira saglasno mašini na kojoj je vršeno eksperimentalno zavarivanja 73, 116, 150 mm / min, dati su rezultati makro i mikro-strukturnih svojstava, profil mikrotvrdoće, zatezna i savojna svojstva i svojstva udarne žilavosti.</p>	M14

НАПОМЕНА: уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

образложење

Кандидат Миодраг Милчић поднео је 31.05.2016. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу захтев за одобрење теме докторске дисертације под радним насловом „Истраживање утицаја параметара заваривања трењем са мешањем на динамичку издржљивост завареног споја легуре алуминијума 2024 T351“ из уже научне области Машинске конструкције.

Научно – стручно веће за техничко – технолошке науке Универзитета у Нишу је, на својој седници од 26.10.2016., донело Одлуку број 8/20-01-007/16-017 којом је усвојило предложену тему и именовала проф. др. Бобана Ађелковића за ментора и проф. др. Јанеза Крамбергера за коментора предложене докторске дисертације.

Кандидат Миодраг Милчић је предао текст докторске дисертације 19.02.2020. Машинском факултету у Нишу.

Научно – стручно веће за техничко – технолошке науке Универзитета у Нишу је, на својој седници од 02.03.2020., донело Одлуку број 8/20-01-002/20-024 о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на Машинском факултету у Нишу, кандидата Миодрага Милчића, под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ НА ДИНАМИЧКУ ИЗДРЖЉИВОСТ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА 2024 T351“.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (*до 500 речи*)

Докторска дисертација се састоји од 5 поглавља и одговарајућих прилога, коришћене литературе (128 библиографских јединица) и кратке биографије аутора. Форма и садржај рада испуњавају важеће стандарде за израду докторских дисертација.

У *првом поглављу* објашњавају се предмет и циљеви истраживања и дају уводне напомене о примењеним методама.

У *другом поглављу* приказано је стање истраживања из области докторске дисертације. Кроз посебне целине приказане су основна својства алуминијумских легура серије 2 са аспекта заварљивости и примене, поступак заваривања трењем са мешањем, алати за заваривање трењем са мешањем, генерисање топлоте, преглед параметара заваривања, са истицањем доминантних параметара на механичка својства, макро и микро структуру заварених спојева са прегледом истраживања у области поступка заваривања трењем са мешањем. У наставку овог поглавља представљен је феномен замора материјала машинских елемената и машинских конструкција у условима променљивог оптерећења са карактеризацијом процеса замора материјала – настајања и ширења прслине. Дат је приказ добијања се С-Н криве (Велерова крива), на основу које се одређује динамичка издржљивост материјала. Класични приступ процеса конструисања обухвата период иницијације прслине, а како заварене конструкције у току животног века раде са присутном прслином, која услед променљивог оптерећења расте, то су у даљем току дати аспекти механике лома, који су неопходни за истраживања у дисертацији. Изводи из теорије механике лома написани су са посебном пажњом на, примену линеарно еластичне механике лома, примену еласто-пластичне механике лома, фактор интензитета напона и брзине раста заморне прслине. На крају овог поглавља дати су теоријски аспекти ударне жилавости материјала.

Треће поглавље је посвећено извршеним експерименталним истраживањима заварених спојева легуре алуминијума 2024 T351 остварених заваривањем трењем са мешањем. За извођење сучеоних заварених спојева плоча дебљине 6 мм применом поступка завривања трењем са мешањем коришћена је алатна машина, глодалица и алат са трном конусног облика са стандардним навојем. За истраживања у оквиру дисертације, усвојен је константан број обртаја алата ($n=750 \text{ min}^{-1}$) и променљива брзина заваривања ($v=73; 116; 150 \text{ mm/min}$).

Извршена су испитивања заварених спојева радиографском методом, металографском методом, испитивање механичких својстава на затезање и савијање, у условима статичког оптерећења. Извршена су испитивања заварених спојева у условима променљивих оптерећења ($R=0,1$), добијене S-N криве и одређена динамичка издржљивост за $N=10^7$ циклуса. Такође су, експерименталним путем, одређене вредности параметара механике лома: K_{Ic} , CTOD, J-integral и брзина раста прслине da/dN . Дефинисана је метода испитивања динамичке издржљивости применом електродинамичког вибрационог стола као и математички модел на којем се он базира. Сва испитивања су спроведена у складу са важећим стандардима. Оваква обимна и комплексна експериментална испитивања дају раду посебан значај а добијене резултате чине применљивим за практичну примену.

У *четвртом поглављу* кандидат је дао резултате испитивања заварених спојева легуре алуминијума 2024 T351 остварених поступком заваривања трењем са мешањем на јасан и прегледан начин. Резултати свих испитивања су упоредно приказани и анализирани. Анализирани је утицај параметара заваривања на механичка својства завареног споја, при статичком, периодично променљивом и ударном оптерећењу. Приказани су резултати визуелног и радиографског испитивања заварених спојева остварених различитим брзинама заваривања, резултати испитивања макро и микроструктуре материјала шава, као и резултати испитивања механичких својстава. Резултати испитивања затезањем су дати табеларно и дијаграмски а резултати испитивања савијањем су приказани на фотографијама. Дати су резултати мерења микротврдоће у три зоне: испод површине са стране лица, на средини споја и са стране корена зава. Због хетерогености завареног споја, енергија удара и параметри

механике лома су испитивани у свим зонама. Дати су резултати испитивања енергија удара у виду вредности енергије за стварање, ширење прслине и укупне енергије удара, табеларно и дијаграмски за различите позиције зареза у односу на правац заваривања, са приказом морфологије лома. Вредности параметара механике лома: критична вредност J - интеграла - J_{Ic} , жилавост лома K_{Ic} и отварање прслине δ_{Ic} , као и вредности J_{max} и δ_{max} , су дате за различите параметре заваривања и различите позиције зареза у односу на правац заваривања. Одређени су коефицијенти у Парисовој једначини за све заварене спојеве остварене различитим брзинама заваривања и приказане добијене вредности прага замора K_{th} .

Испитивањем заварених спојева на замарање у условима напрезања на затезање на серво-хидрауличном пулзатору са односом оптерећења $R=F_{min}/F_{max}=0.1$ и фреквенцијом испитивања 35 Hz, одређене су вредности динамичке издржљивости за заварене спојеве остварене различитим параметрима заваривања. Развијена је метода испитивања динамичке издржљивости на основу тестирања вршених на електро-динамичком вибрационом столу.

Пето поглавље представља закључак изведених истраживања и анализе резултата из поглавља три и четири. Наведен је научни допринос до којег је кандидат дошао у току истраживања и рада на докторској дисертацији. Наведене су смернице и предлози за будућа истраживања у овој области.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Кандидат Миодраг Милчић је, спроведеним истраживањима, у потпуности испунио постављене циљеве докторске дисертације, уз поштовање претходно дефинисаног оквирног садржаја.

Истраживања спроведена у овој дисертацији су била усмерен на анализу утицаја параметара заваривања (брзине заваривања) на механичка својства заварених спојева (затезна својстава, расподела тврдоће завареног споја) и технолошка својстава заварених спојева установљена испитивањем на савијање. Спроведеним испитивањима су одређена својства ударне жилавости, својства динамичке издржљивости заварених спојева, параметри механике лома као и брзине раста заморне прслине у различитим структурама заварених спојева остварених различитим параметрима заваривања.

Истраживања су обухватила више научних праваца. Систематизована су постојећа знања из више научних области које се баве овом проблематиком. Направљена је анализа утицаја параметара поступка заваривања трењем са мешањем легуре алуминијума 2024 Т351 на динамичку издржљивост. У циљу практичног истраживања, кандидат је развио методу истраживања динамичке издржљивости на електро-динамичком вибрационом столу и експериментално окружење за ово истраживање. Такође је развио математички модел којим су израчунаване посредно мерене величине током испитивања – сопствена фреквенца, динамичка издржљивост. Ове резултате је упоредио са уобичајеним начинима испитивања динамичких карактеристика и дошао до важних закључака.

Кандидат је истраживањима одредио вредности параметара Парисове једначине, односно брзине раста заморне прслине, и тиме добио могућност за процену преосталог радног века динамички оптерећене заварене конструкције израђене заваривањем трењем са мешањем од легуре алуминијума 2024 Т351.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Тема докторске дисертације је веома значајна у научном и практичном погледу. Поднета докторска дисертација представља оригиналан научни и стручни допринос кандидата. Резултати истраживања и закључци имају велику примену у науци и пракси.

Научни доприноси докторске дисертације су:

- Истраживање и анализа утицаја параметара заваривања трењем са мешањем легуре алуминијума 2024 Т351 на динамичку издржљивост заварених спојева,
- Развој методологије испитивања динамичке издржљивости коришћењем електро-динамичког вибрационог стола,
- Дефинисању параметара испитивања нумеричком симулацијом - секвенцијално упарена статичка структурна, модална и хармонијска анализа, са циљем одређивања напонског стања у завареном споју епрувете при различитим фреквенцијама и дефинисаног померања стола електро-динамичког шејкера,
- Развој математичког модела за аквизицију и обраду резултата испитивања динамичке издржљивости на електро-динамичком вибрационом столу,
- Експериментално одређивање S-N криве спојева легуре алуминијума 2024 Т351 заварене трењем са мешањем са различитим параметрима заваривања,
- Експериментално одређивање параметара раста заморне прслине за карактеристичне зоне завареног споја за различите параметре заваривања трењем са мешањем легуре алуминијума 2024 Т351,
- Експериментално одређене вредности жилавости лома и вредности отварања прслине за различите структуре заварених спојева остварених заваривањем трењем са мешањем са различитим брзинама заваривања,
- Експериментално одређене вредности ударне жилавости за различите структуре заварених спојева остварених заваривањем трењем са мешањем са различитим брзинама заваривања.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат Миодраг Милчић, дипл. маш. инж. је испољио изузетан ниво самосталности у раду, сналажљивост, креативност и склоност ка научном и истраживачком раду. Кандидат поседује значајно теоријско и практично знање, способност да га креативно комбинује и развија и синтетизује нове научне истине. Резултати спроведених истраживања су публиковани на конференцијама и у часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, потврђују да је кандидат оспособљен за самостални научни рад. У току израде докторске дисертације је показао мултидисциплинарно знање. Кандидат је показао добро разумевање и креативност у обради, тумачењу и пласирању добијених резултата истраживања. Самостално је креирао лабораторијско окружење за испитивање динамичких карактеристика заварених спојева.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу прегледа радне верзије поднете докторске дисертације, а имајући у виду објављене научне радове кандидата, чланови Комисије за преглед и оцену докторске дисертације закључују следеће:

- Докторски рад у потпуности одговара теми коју је одобрило Наставно научно веће Машинског факултета у Нишу и Научно стручно веће Универзитета у Нишу.
- Докторска дисертација представља оригиналан научни и стручни допринос у истраживању утицаја брзине заваривања на статичку и динамичку носивост заварених спојева остварених заваривањем трећем са мешањем алуминијумске легуре 2024 T351, као и истраживање ударне жилавости и параметара механике лома (жилавест лома, брзина раста заморне прслине) заварених спојева за различите структуре завареног споја.
- Кандидат је показао висок ниво самосталности, креативности и систематичности у бављењу научно – истраживачким радом.
- Резултати научног рада кандидата имају висок степен практичне применљивости.
- Научни доприноси и оригиналност докторске дисертације потврђени су објављивањем већег броја научних радова.

Имајући у виду ове чињенице, Комисија предлаже Наставно научно веће Машинског факултета у Нишу и Научно стручном веће Универзитета у Нишу, да се рад кандидата Миодрага Милчића, дипломираног машинског инжењера, под називом

„ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЋЕМ СА МЕШАЊЕМ НА ДИНАМИЧКУ ИЗДРЖЉИВОСТ ЗАВАРЕНОГ СПОЈА ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА 2024 T351“

прихвати као докторска дисертација и кандидат позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке НСВ о именовану Комисије	НСВ број 8/20-01-002/20-024	
Датум именовања Комисије	02.03.2020	
Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	Др Бобан Анђелковић, редовни професор	ментор, председник
	Машинске конструкције	Машински факултет у Нишу, Универзитет у Нишу
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)
2.	Др Јанез Крамбергер, ванредни професор	коментор, члан
	Конструисање	Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)
3.	Др Венцислав Грабулов, научни саветник	члан
	Металургија – метални материјали - заваривање	Институт за испитивање материјала а.д. Београд
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)
4.	Др Мирослав Мијајловић, ванредни професор	члан
	Машинске конструкције	Машински факултет у Нишу, Универзитет у Нишу
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)
5.	Др Милан Банић, доцент	члан
	Машинске конструкције	Машински факултет у Нишу, Универзитет у Нишу
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)

Датум и место: