

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET

Simon A. Sedmak

**PROCENA INTEGRITETA I VEKA  
ZAVARENIH SPOJEVA  
MIKROLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE  
ČVRSTOĆE PRI DEJSTVU STATIČKOG I  
DINAMIČKOG OPTEREĆENJA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Simon A. Sedmak

**INTEGRITY AND LIFE ASSESSMENT  
OF WELDED JOINTS MADE OF MICRO-  
ALLOYED HIGH STRENGTH STEELS  
UNDER STATIC AND DYNAMIC  
LOADING**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2019

Mentor:

Dr Zoran Radaković, redovni profesor

Mašinski fakultet, Beograd

Članovi komisije:

Dr Radica Prokić-Cvetković, redovni profesor

Mašinski fakultet, Beograd

Dr Aleksandar Grbović, vanredni profesor

Mašinski Fakultet, Beograd

Dr Ivica Čamagić, redovni profesor

Fakultet Tehničkih Nauka, Priština

Dr Ljubica Milović, redovni profesor

Tehnološko-Metalurški Fakultet, Beograd

**Datum odbrane:**

# **PROCENA INTEGRITETA I VEKA ZAVARENIH SPOJEVA MIKROLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE PRI DEJSTVU STATIČKOG I DINAMIČKOG OPTEREĆENJA**

Rezime:

Integritet zavarenih spojeva predstavlja veoma značajan faktor pri eksploataciji zavarenih konstrukcija, usled njihove heterogenosti i sklonosti ka pojavi i rastu prslina, kao posledica samog postupka zavarivanja. Stoga se može reći da zavareni spoj predstavlja najkritičniji deo ovakve konstrukcije, i u slučaju posuda pod pritiskom je neophodno posebno obratiti pažnju na njihov kvalitet. U praksi, u većini slučajeva do otkaza zavarenih (kao i mnogih drugih) konstrukcija dolazi usled zamora, koji je još uvek u određenoj meri neistražena tema u oblasti integriteta konstrukcija.

U ovom konkretnom slučaju je analiziran mikrolegirani niskouglenični sitnozrni normalizovani čelik povišene čvrstoće za posude pod pritiskom, P460NL1. Iako zamor u principu ne predstavlja značajan problem kod posuda pod pritiskom, predmetni čelik se koristi u proizvodnji cisterni za transport amonijaka, što znači da je tokom eksploatacije izložen promenljivom (dinamičkom) opterećenju. Stoga je odlučeno da se ispita otpornost zavarenih spojeva od ovog materijala na nastanak i rast zamorne prsline, kako eksperimentalno, tako i numerički, primenom proširene metode konačnih elemenata.

U okviru ovog istraživanja je urađen veliki broj eksperimenata, koji su obuhvatili ispitivanje zatezanjem, savijanjem u tri tačke, merenje temperature tokom zavarivanja, tvrdoće i žilavosti, kao i metalografska i fraktografska ispitivanja, kako bi se detaljno odredile mehaničke osobine materijala i zavarenog spoja, kao i njihove mikrostrukture i njihov uticaj na dobijene rezultate.

Pri ovim ispitivanjima su korišćene epruvete isečene iz ploče dimenzija 500x500x14 mm, pri čemu su za odgovarajuća ispitivanja na ovim epruvetama napravljeni zarezi, u zoni uticaja toplote, koja je predstavljala oblast zavarenog spoja na kojoj je bio glavni fokus ovog istraživanja.



Ispitivanja su krenula od pretpostavke da su razlike u temperaturi tokom zavarivanja na suprotnim krajevima ploče dovele do različite geometrije samog zavarenog spoja, kao i da se brzina rasta zamorne prsline menjala u zavisnosti od toga kroz koje oblasti je prslina prolazila tokom svog rasta. U tu svrhu su epruvete za ispitivanje žilavosti i zamora (savijanjem u tri tačke) podeljene u četiri grupe, u zavisnosti od kraja ploče iz kojeg su uzete, odnosno od položaja zareza u zoni uticaja toplote.

Pored eksperimentalne analize, u ovoj disertaciji je prikazana i numerička simulacija ponašanja epruveta opterećenih savijanjem u tri tačke, uzimajući u obzir različito ponašanje zasebnih oblasti zavarenog spoja (osnovni metal, metal šava i ZUT). Numerički proračun je urađen primenom proširene metode konačnih elemenata (PMKE), koja je upravo i razvijena devedesetih godina prošlog veka sa ciljem da omogući simulaciju rasta zamorne prsline. Simulacije su bile zasnovane na eksperimentalno određenim vrednostima koeficijenata Paris-ove jednačine,  $C$  i  $m$  za svaku zonu kroz koju je prslina prošla pri svakom ispitivanju. Dobijeni rezultti su poređeni međusobno u odnosu na razlike među samim epruvetama, u pogledu položaja zareza i debljine ZUT.

Dobijeni rezultati su pokazali dobro slaganje sa eksperimentalnim, čime je primena proširene metode konačnih elemenata verifikovana.

**Ključne reči:** zamor, integritet i vek konstrukcija, zona uticaja toplote, mikrolegirani čelik povišene čvrstoće, proširena metoda konačnih elemenata, koeficijenti Paris-ove jednačine

Naučna oblast: Mašinstvo

**Uža naučna oblast:** Mehanika loma, nauka o materijalima

# **INTEGRITY AND LIFE ASSESSMENT OF WELDED JOINTS MADE OF MICRO-ALLOYED HIGH STRENGTH STEELS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING**

Abstract:

Structural integrity of welded joints represents a significant factor in welded joint exploitation, due to their heterogeneity and tendency towards crack initiation and propagation, resulting from the welding procedure itself. Hence, it can be said that the welded joint represents the most critical part of such structures, and in the case of pressure vessels, it is necessary to ensure high welded joint quality. In practice, failures of welded (and other) structures are more often than not caused by fatigue, which even today still represents a relatively unexplored topic within the field of structural integrity.

In this case, the analysis of a micro-alloyed low-carbon fine-grained normalised high strength pressure vessel steel, P460NL1 is presented. Even though fatigue is generally not a considerable problem for pressure vessels, the material investigated in this research is also used in manufacturing of ammonia transportation tanks, which implies it is subjected to variable (dynamic) load during exploitation. Hence, it was decided to assess the resistance of welded joints made of this material to fatigue crack initiation and propagation, both experimentally and numerically, using the extended finite element method.

The research performed within the scope of this dissertation involved a large number of experiments, including tensile and three-point bending tests, measuring of temperature during welding, hardness and toughness, as well as metalography and fractography tests, in order to determine the mechanical properties of the materials and the welded joints in detail, along with their microstructures and their influence on the obtained test results.

Specimens cut out of a welded plate with dimensions of 500x500x14 mm were used for the experiments, whereas certain tests required the making of notches in the specimens, inside the heat affected zone, and this welded joint region was the focus of the research.

The experimental tests were based on the assumption that temperature differences that were measured on the opposite ends of the plate during the welding process resulted in different welded joint geometry, along with the assumption that fatigue crack growth rate changes depending on the regions through which the crack passed during its propagation. For

this purpose, specimens used in toughness and fatigue (three-point bending) tests were divided into four groups, depending on the part of the plate from which they were taken, as well as the notch position in the heat affected zone.

In addition to the experimental analysis, this dissertation also shows the numerical simulation of the behaviour of specimens subjected to three-point bending, taking into account different properties of individual welded joint regions (parent material, weld metal and the HAZ). Numerical calculations were performed using the extended finite element method (XFEM), which was developed in the early nineties for the exact purpose of enabling the numerical simulation of fatigue crack propagation. Simulations were based on the experimentally determined values of Paris law coefficients,  $C$  and  $m$ , for every region through which the crack propagated during each test. Obtained results were compared to each other, in terms of differences in the specimens themselves, i.e. the notch position and HAZ thickness.

Obtained results have indicated good compliance with the experimental ones, which verified the application of extended finite element method in this case.

**Keywords:** fatigue, structural integrity and life, heat affected zone, micro-alloyed high strength steel, extended finite element method, Paris law coefficients

**Naučna oblast:** Mechanical engineering

**Uža naučna oblast:** Fracture mechanics, material science

# SADRŽAJ

## POGLAVLJA

1. UVOD .....	1
○ Inspiracija .....	1
○ Integritet zavarenih konstrukcija .....	2
○ Uopšteno o zamoru .....	4
○ Metoda konačnih elemenata .....	6
○ Tema istraživanja .....	8
2. PREGLED LITERATURE .....	12
○ Uvod .....	12
○ Naponsko stanje oko grešaka u zavarenom spoju .....	12
○ Uticaj mikrostrukture na rast zamorne prsline u mikrolegiranim čelicima .....	15
○ Mehaničke osobine i brzina rasta prsline u zavarenom spoju .....	
panciranog čelika .....	17
○ Analiza uticaja prsline na integritet feritno – austenitnih .....	
zavarenih spojeva .....	24
○ Ocena integriteta zavarenih tankozidnih aluminijumskih konstrukcija .....	28
3. MEHANIKA LOMA .....	29
○ Osnove .....	29
○ Linearno-elastična mehanika loma .....	31
▪ Oblici rasta i otvaranja prsline .....	32
▪ Energija deformacije .....	33
▪ Faktor intenziteta napona .....	34
▪ Faktori intenziteta napona za određene konfiguracije .....	36
▪ Veza promena energije deformacije – faktor intenziteta napona .....	37
○ Plastična zona oko vrha prsline .....	37

○ Kritični faktor intenziteta napona .....	40
○ Elasto-plastična mehanika loma .....	42
▪ Otvaranje vrha prsline – CTOD .....	43
▪ $J$ – integral .....	45
▪ Veza J-integrala i faktora intenziteta napona $K$ .....	47
▪ Veza J-integrala i CTOD .....	47
○ Zamor .....	48
▪ Ciklično promenljivo opterećenje .....	48
▪ Rast prsline usled zamora .....	49
▪ Osnovni model rasta prsline pri konstantnoj amplitudi opterećenja .....	52
▪ Plastična zona oko vrha prsline pri dinamičkom opterećenju .....	53
▪ Zatvaranje prsline pri dinamičkom opterećenju .....	54
4. OSNOVNI PRINCIPI METODE KONAČNIH ELEMENATA .....	55
○ Uvodna razmatranja .....	55
○ Osnovni pojmovi .....	56
▪ Diskretizacija .....	57
▪ Interpolacioni modeli .....	59
▪ Matrica krutosti i vektor opterećenja .....	59
▪ Određivanje nepoznatih pomeranja .....	60
▪ Određivanje polja deformacija i napona .....	60
○ Proširena metoda konačnih elemenata .....	61
▪ Osnovni principi .....	61
▪ Osobine proširene metode konačnih elemenata .....	63
▪ Izbor tipa čvorova mreže .....	67
▪ Primena PMKE na procenu parametara mehanike looma .....	69
▪ Određivanje pravca rasta prsline .....	71
▪ Rast zamorne prsine i evkivalentni faktor intenziteta napona .....	73
○ Proširena metoda konačnih elemenata u <b>ANSYS-u</b> .....	74

5. MATERIJALI I NJIHOVE PRIMENE NA POSUDE POD PRITISKOM .....	76
○ Čelik P460NL1 .....	76
▪ Osobine čelika P460NL1 .....	77
○ Dodatni materijal – VAC 65 žica .....	78
○ Posude pod pritiskom za transport .....	79
○ Tehnologija zavarivanja .....	80
▪ Uopšteno o zavarivanju .....	81
▪ Uticaj heterogenosti na zavareni spoj .....	83
▪ Izbor materijala i postupka .....	85
6. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA .....	86
○ Uvodni deo .....	86
○ Postupak zavarivanja .....	88
▪ Parametri zavarivanja .....	90
▪ Određivanje vremena hlađenja $t_{8/5}$ .....	95
○ Raspodela temperature .....	98
○ Ispitivanje zatezanjem .....	100
○ Makro- i mikrostrukture zavarenog spoja .....	101
○ Tvrdoća .....	116
○ Ispitivanje žilavosti .....	118
○ Ispitivanje rasta zamorne prsline .....	138
○ Fraktografija .....	154
7. NUMERIČKE SIMULACIJE PRIMENOM PMKE .....	159
○ Postavka numeričkog proračuna .....	159
○ Definisane parametara .....	161
○ Rezultati simulacija .....	164
8. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI .....	181
○ Postavka numeričkog proračuna .....	181

▪	Uticaj temperature i vremena hlađenja.....	181
▪	Ispitivanje zatezanjem .....	183
▪	Merenje tvrdoće sa tačke gledišta mikrostrukture .....	184
▪	O žilavosti i grupama epruveta .....	186
▪	Zamor .....	187
○	Analiza rezultata numeričkih simulacija .....	190
○	Zaključci .....	193
9.	REFERENCE .....	195

# 1. Uvod

## 1.1 Inspiracija

Tema ove doktorske disertacije je vezana za ispitivanje ponašanja zavarenih spojeva od čelika P460NL1 izloženih dinamičkom (zamornom) opterećenju, pri čemu ispitivanje obuhvata eksperimente i numeričku simulaciju. Zamor je sam po sebi, relativno nova tema istraživanja u oblasti mehanike loma i integriteta i veka konstrukcija, i dan-danas još uvek nije do kraja razjašnjen fenomen. U ovom slučaju, ideja je bila da se otpornost na zamor zavarenih spojeva poveže sa mikrostrukturom različitih oblasti, i to za nekoliko različitih slučajeva položaja zareza u epruveti, odnosno položaja zamorne prsline.

Što se tiče izbora materijala, on je bio uslovljen iskustvom autora i njegovih saradnika vezanim za čelike za posude pod pritiskom, kojima su se gore navedeni intenzivno bavili tokom poslednjih nekoliko godina. Među ovim čelicima, najčešće je analiziran upravo čelik P460NL1, zbog svojih veoma povoljnih svojstava za primenu u izradi posuda pod pritiskom. Uprkos tome, ponašanje konstrukcija od ovog čelika izloženih zamornom opterećenju (što je zapravo čest slučaj u praksi sa posudama pod pritiskom) još uvek nije detaljno razmatrano, što je takođe u velikoj meri doprinelo odluci da se za osnovni materijal usvoji upravo ovakav čelik.

Prvobitna zamisao je bila da fokus bude pre svega na numeričkoj simulaciji, ali usled činjenice da je kvalitetnu analizu ovakve vrste nemoguće sprovesti bez brojnih i pouzdanih eksperimentalnih ispitivanja, težište je prebačeno na eksperimentalni deo, na koji se metoda konačnih elemenata u velikoj meri oslanjala. Od nekih izvornih ideja vezanih za simulacije (deljene zone uticaja toplote) se odustalo nakon što su eksperimenti pokazali da u ovom slučaju heterogenost ZUT-a nije imala presudan značaj na ponašanje pri zamoru. Umesto da se zavareni spoj podeli striktno na svoje osnovne oblasti (osnovni metal, metal šava, zona uticaja toplote), podela je izvršena na osnovu promena u mikrostrukтури, te se tako pored gorepomenutih oblasti takođe javljaju i njihove kombinacije. Uvođenje uticaja mikrostrukture u celu priču je takođe inspirisalo i deo disertacije vezan za uticaj raspodele temperature tokom samog postupka zavarivanja. Ovaj uticaj je razmatran samo u određenoj meri, i dalje,



detaljnije, proučavanje efekata koje ima unos toplote, odnosno promena temperature duž zavarenog spoja će biti tema nekog narednog istraživanja.

Iz ovoga se može zaključiti da je izbor teme doktorske disertacije predstavljao kombinaciju prethodnog iskustva autora i materijala čije je ponašanje u prisustvu zamorne prsline još uvek neistraženo, čime je stvoren značaj prostor za napredak i rad na nečemu što bi zapravo moglo da ima značajan doprinos nauci, posebno u oblasti mehanike loma i integriteta zavarenih konstrukcija. Naravno, na izbor teme disertacije uticala je i višegeneracijska porodična tradicija proučavanja mehanike loma, kao i primene metode konačnih elemenata u tu svrhu.

## **1.2 Integritet zavarenih konstrukcija**

Integritet konstrukcija, odnosno njihova sposobnost da ne efikasan i bezbedan način funkcionišu u za to predviđenim uslovima eksploatacije, predstavlja veoma bitan aspekt sa tačke gledišta sigurnosti. Iz potrebe za poboljšanim integritetom, naročito u slučaju zavarenih konstrukcija, koje su našle primenu u širokom rasponu različitih oblasti, su se razvile naučne oblasti poput mehanike loma, koja će između ostalog biti tema ove disertacije. U tu svrhu, razvijeni su dva koncepta mehanike loma, linearno elastična i elasto-plastična mehanika loma, koje proučavaju mehanizme krtog, odnosno duktilnog loma, respektivno [1-3]. Mehanika loma ima za cilj da u značajnoj meri smanji rizike od lomova konstrukcija, koji neretko mogu imati katastrofalne posledice (naročito kod zavarenih posuda pod pritiskom). Ovaj postupak obuhvata otkrivanje mesta grešaka u konstrukciji i određivanje njihovog uticaja na njen integritet, odnosno određivanje trenutka u kome bi te greške (pre svega prsline) prekoračile standardima propisane granice, i dovele do otkaza. U skladu sa dobijenim rezultatima, preporučuju se adekvatne mere za reparaciju konstrukcije, ukoliko se za tim ukaže potreba, kako bi se radni vek konstrukcije produžio što je više moguće, pri tome ne ugrožavajući bezbednost okoline.

Primena mehanike loma je zasnovana na određivanju odgovarajućih parametara (poput faktora intenziteta napona, otvaranja vrha prsline i J-integrala) na osnovu kojih se određuje preostali radni vek konstrukcije [3]. Ovi parametri su, kao što se može videti, vezani

za prisustvo prslina, koje su u slučaju zavarenih spojeva neizbežne, u manjoj ili većoj meri. U zavisnosti od svog položaja i opterećenja koja deluju u njihovoj okolini, ove prsline mogu da krenu da rastu, i pri dostizanju određene dužine, dovedu do otkaza i loma konstrukcije. Stoga je veoma bitno pratiti njihovo ponašanje tokom eksploatacije, kao i sprečavanje njihovog nastanka (mada je to nemoguće u potpunosti izvesti) i/ili njihovo zadžavanje u dozvoljenim granicama, koje zavise pre svega od uslova eksploatacije.

Kako bi se omogućilo da integritet konstrukcije ostane neugrožen tokom predviđenog radnog veka, takođe treba uzeti u obzir i aktivnosti koje prethode njenom puštanju u rad, poput izbora materijala, definisanja geometrije i naravno samog postupka zavarivanja. Kod definisanja ovih aspekata, najvažnije je izbeći potencijalne koncentracije napona, koje predstavljaju najpovoljnija mesta za početak (i kasniji rast) prslina. Pri razmatranju koncentracije napona, značajan faktor predstavljaju i takozvani zaostali naponi, koji se uglavnom javljaju usled uticaja metalurških, geometrijskih i tehnoloških faktora, i koji su takođe u manjoj ili većoj meri neizbežni.

U skladu sa gorenavedenim, ova disertacija će se baviti proučavanjem pripreme i samog postupka zavarivanja ploča od mikrolegiranog sitnozrnog čelika za posude pod pritiskom, P460NL1 [4], kao i ispitivanju njegovog ponašanja u uslovima kojima su posude od ovakvih materijala izložene tokom eksploatacije. U narednim poglavljima će biti razmatrane teorijske osnove, kao i praktični eksperimenti i numerička analiza ponašanja navedenog zavarenog spoja. Ali pre toga, osvrnimo se i na uslove eksploatacije predmetnog čelika i na način na koji su izabrane metode ispitivanja njegovog ponašanja, kao i na same metode.

### **1.3 Uopšteno o zamoru**

Praksa je pokazala da je najčešći od mnogobrojnih razloga otkazivanja posuda pod pritiskom zamor. Ovaj fenomen predstavlja postepeno razaranje materijala, do trenutka kada njegov poprečni presek više ne može da nosi opterećenje, a usled promena u materijalu prouzrokovanih opterećenjem koje je po prirodi ciklično, odnosno čija vrednost se menja

tokom vremena. U ovakvi uslovima, a nakon dovoljnog velikog broja ciklusa, može doći do loma konstrukcije pri naponima značajno nižim od granice tečenja, za razliku od statičkog loma, što predstavlja poseban problem. U osnovi ovog mehanizma otkaza je prslina, koja pod dejstvom opterećenja u jednom trenutku počinje stabilno da raste, da bi na kraju prešla u nestabilnu fazu rasta, pri čemu dolazi do konačnog loma. Zamorni lom je po prirodi duktilnog karaktera, sve do trenutka u kome se poprečni presek smanji dovoljno da više ne može da izdrži opterećenje kojem je izložen, kada nastupa krta lom preostalog preseka.

Što se samog fenomena tiče, zamor predstavlja komplikovan metalurški proces koji je teško detaljno i precizno opisati, što dovodi i do poteškoća sa njegovim modeliranjem. Štaviše, zamor je tek odnedavno ozbiljno uzet u obzir pri oceni integriteta konstrukcija, što se može videti na primeru standarda koji se bave greškama u zavarenim spojevima, a koji tek od pre 2 godine sadrže i smernice vezane za greške izazvane delovanjem zamornog opterećenja [5]. Takođe, zamor je primenu u metodi konačnih elemenata, o kojoj će takođe biti reči, pronašao tek početkom devedesetih godina prošlog veka, i još uvek je u fazi razvoja, uprkos zanačajnom napretku poslednjih godina.

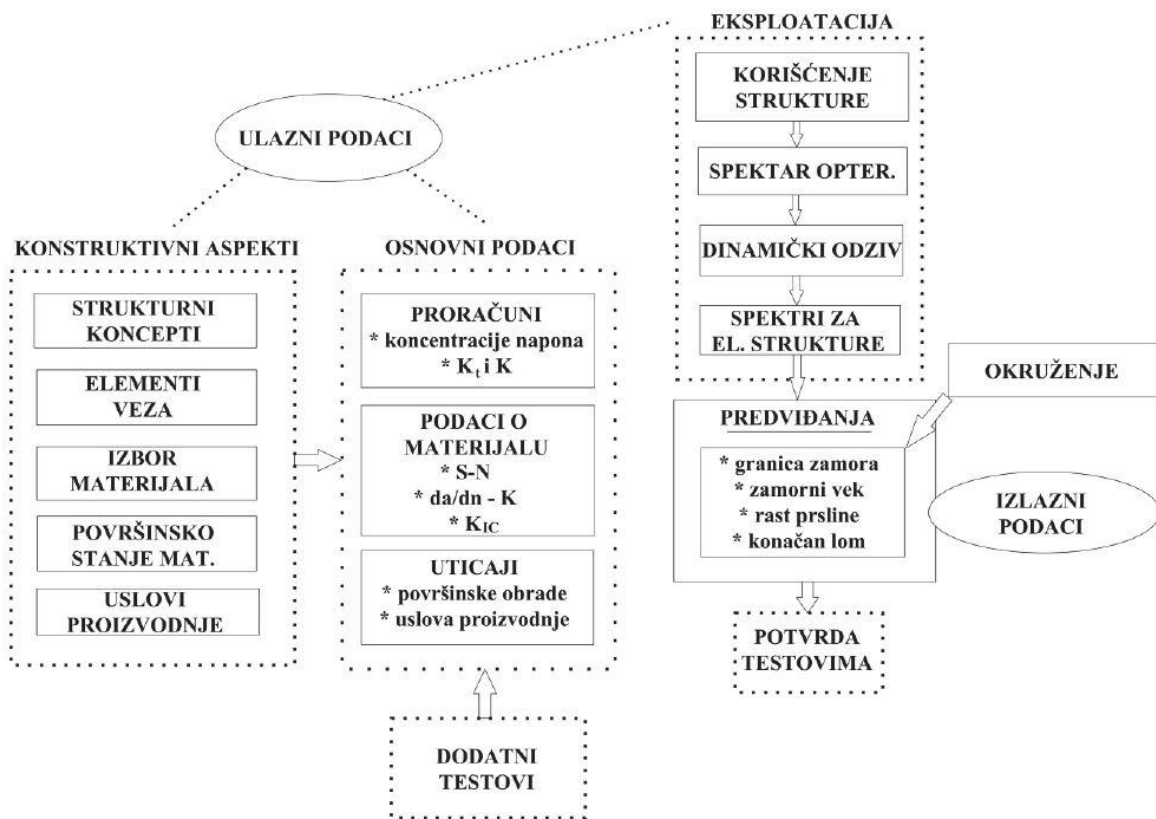
Usled svoje složene prirode, zamor je prošao kroz nekoliko faza proučavanja, počevši od takozvanog koncepta "dinamičke čvrstoće", koja je predstavljala granični napon pri kome neće doći do zamornog loma bez obzira na broj ciklusa opterećenja, a koja se određivala primenom Wohler-ovih kriva [6]. Međutim, ova metoda se pokazala nedovoljno pouzdanom, pre svega zbog činjenice da je kod mnogih materijala koji se koriste u praksi jako teško jednoznačno odrediti granicu zamora, kao i usled činjenica da će svaka konstrukcija ipak na kraju otkazati nakon određenog broja ciklusa, koliko god taj broj bio ogroman. Stoga se prešlo na određivanje "čvrstoće (otpornosti) na zamor", koja predstavlja nivo napona tokom određenog veka, odnosno koja je, za razliku od dinamičke čvrstoće, ograničena.

Danas, određivanje potrebnih zamornih karakteristika konstrukcija se u velikoj meri oslanja na mehaniku loma, odnosno na određivanje parametara brzine rasta zamorne prsline, i njihove zavisnosti od broja ciklusa opterećenja, u uslovima koji odgovaraju eksploataciji. Od velikog značaja u ovom slučaju su parametri mehanike loma, kao i koeficijenti Paris-ove jednačine, o kojima će biti (mnogo) više reči u narednim poglavljima, a čije određivanje za različite uslove je predstavljalo jedan od osnovnih ciljeva ovog istraživanja. Pri projektovanju

konstrukcija otpornih na zamor, nepohodno je uzeti u obzir nekoliko faktora, poput odgovarajućeg definisanja geometrije, površinske obrade materijala (primera radi, nadvišenja zavarenog spoja su strogo zabranjena u slučaju spojeva koji su izloženi dinamičkom opterećenju), primene materijala koji su otporni na rast zamorne prslina itd. Što se samog rasta zamorne prslina tiče, on se sastoji od tri faze, početne u kojoj dolazi do nastanka prslina, srednje faze, tokom koje prslina raste manje-više konstantnom brzinom (stabilni rast prslina), i završne faze, u kojoj se odvija nestabilni rast prslina, koji dovodi do loma.

Iz ovoga se može zaključiti da je prisustvo prslina u konstrukcijama koje rade pod dinamičkim opterećenjem od velikog značaja za njihovo ponašanje i broj ciklusa opterećenja koje mogu da izdrže, odnosno za njihov radni vek. Cilj projektovanja pouzdanih konstrukcija je da se radni vek poveća, što se može postići "usporavanjem" rasta prslina. Ovakvo produženje radnog veka može se ostvariti na nekoliko načina, na primer, preraspodelom zaostalih napona, izborom geometrije sa manje izraženim i naglim promenama dimenzija i poprečnog preseka, unošenjem pritisnih napona kako bi se uravnotežili zaostali naponi nastali pri zavarivanju (koji uglavnom imaju nepoželjno, zatezno dejstvo).

Pri proračunu otpornosti konstrukcije na zamor, inženjeri se obično vode standardizovanim postupcima, koji se pre svega oslanjaju na neke opšte usvojene uslove, koji ne moraju obavezno odgovarati uslovima eksploatacije, te stoga postoji rizik od potcenjivanja, ili još gore, precenjivanja nosivosti strukture. Zbog toga je pri oceni zamornog veka od velikog značaja iskustvo i poznavanje same prirode procesa zamora. U okviru određivanja zamornih karakteristika konstrukcije, potrebno je izvršiti brojna eksperimentalna ispitivanja, sa posebnim osvrtom na odgovarajuće uslove eksploatacije. Neka od ovih ispitivanja su sastavni deo istraživanja prikazanog ovde, pri čemu su uzeti različiti uslovi pri određivanju potrebnih karakteristika (pre svega koeficijenata Paris-ove jednačine). Ovim pristupom dobijene su veoma različite vrednosti, iako je u pitanju bio isti materijal. Takođe se pokazalo da i mikrostruktura materijala ima veliki uticaj na otpornost zavarenog spoja na rast zamorne prslina, i da ona predstavlja još jedan važan faktor pri ovakvim procenama. Na slici 1.1 ispod je dat pregled svih faktora koje treba uzeti u obzir pri određivanju zamornog veka konstrukcije [8].



Slika 1.1 Metodologija određivanja zamornih karakteristika i ocene radnog veka konstrukcije izložene dinamičkom opterećenju [8].

Fenomen zamora će biti detaljnije razrađen i objašnjen u narednom poglavlju, u okviru teorijskog dela disertacije.

## 1.4 Metoda konačnih elemenata

Pored teorijskog i eksperimentalnog dela, ovo istraživanje obuhvatilo je i numeričku simulaciju ponašanja zavarenih spojeva izloženih zamornom opterećenju, zasnovanu na prethodno dobijenim rezultatima. Numerička simulacija različitih zavarenih konstrukcija predstavlja temu kojom se autor često i intenzivno bavio, kao što se može videti u literaturi [4,8,9]. Iako se u velikoj meri oslanja na razne aproksimacije, primena metode konačnih elemenata ima brojne prednosti, pre svega u smislu ponovljivosti proračuna i lakom menjanju ulaznih parametara, kao i mogućnosti predviđanja mesta u konstrukciji (u ovom konkretnom

slučaju zavarenom spoju) gde će doći do koncentracije napona, odnosno identifikaciji mesta koja su najkritičnija što se integriteta konstrukcije tiče. Cilj primene ove metode je bio da se razviju modeli koji bi se sastojali od različitih oblasti zavarenog spoja, pri čemu bi se razlike ogledale u vrednostima Paris-ovih koeficijenata, određenih ispitivanjem Šarpijevih epruveta na savijanje u tri tačke, sa promenljivim opterećenjem u obliku momenta savijanja.

Sama metoda konačnih elemenata, kojoj će detaljnije biti posvećeno treće poglavlje ove disertacije, sastoji se iz diskretizacije modela na takozvane konačne elemente, povezane međusobno u tačkama koje se zovu čvorovi, i definisanja graničnih uslova i uslova opterećenja. Nakon zadavanja svih ovih parametara, pristupa se rešavanju sistema linearnih jednačina i određivanju matrica krutosti sistema, na lokalnom i zatim globalnom nivou. Na osnovu svega ovoga se određuju pomeranja čvorova, odnosno deformacije u modelu, da bi se preko njih na kraju izračunali naponi.

Međutim, kada se u priču uvede i zamor, neophodno je primeniti posebnu, modifikovanu verziju metode konačnih elemenata, poznatiju kao proširena metoda konačnih elemenata, PMKE. Suština ove metode se sastoji u primeni funkcija poboljšanja koje simuliraju prisustvo diskontinuiteta (u ovom slučaju prslina) u modelu, i omogućava proračun rasta prslina i određivanje faktora intenziteta napona bez potrebe za ponovnim generisanjem mreže u okolini vrha prslina. Proširena metoda konačnih elemenata takođe omogućava i definisanje vrednosti Paris-ovih koeficijenata, odnosno simulaciju zamornog opterećenja, koncept koji nije moguće u potpunosti realizovati primenom klasične MKE.

U ovom radu, ideja je bila da se napravi određen broj modela, zasnovanih na stvarnim epruvetama za savijanje u tri tačke, sa odgovarajućim aproksimiranim geometrijama različitih oblasti zavarenog spoja (metal šava, osnovni materijal, zona uticaja toplote), i da se upoređi rast prslina, postavljen je u vrhu zareza svake epruvete, sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Pri tome, treba imati na umu da se pri savijanju u tri tačke išlo do trenutka kada zamorna prslina dostigne dužinu od 5 mm, dok je u slučaju simulacija prslina rasla do loma. Stoga je pri poređenju uzeta u obzir dužina koju je simulirana prslina dostigla nakon broja ciklusa opterećenja koji je odgovarao stvarnom broju ciklusa na kraju svakog eksperimenta, i takođe je uzeta u obzir i lokacija u kojoj se vrh prslina nalazio u tom trenutku. Svi proračuni urađeni su iterativno, za različite gustine mreže, kako bi se obezbedila odgovarajuća

konvergencija rezultata, i dobilo što realnije i preciznije simulirano ponašanje zamorne prsline.

Ukupno je urađeno 4 modela, među kojima su se neki sastojali od 2, a neki od 3 različite zone, u pogledu mikrostrukture (kao i Paris-ovih koeficijenata). Numeričke simulacije su urađene u softverskom paketu ANSYS, iako je prvobitna ideja bila da se koristi ABAQUS, usled činjenica da je u ANSYS-u moguće definisati više različitih vrednosti Paris-ovih koeficijenata, dok ABAQUS tu mogućnost zasad još nema.

Pored trećeg poglavlja, u kome su date teorijske osnove klasične i proširene metode konačnih elemenata, i sedmo poglavlje ove disertacije bavi se ovom temom, i u njemu će biti detaljno opisani postupci simulacije, uz dobijene rezultate. Potrebno je naglasiti da su u ovom slučaju (kao i u mnogim drugim u praksi) za merodavnu i dovoljno preciznu simulaciju bili neophodni kvalitetni i detaljno obrađeni eksperimentalni rezultati. Ovo je naročito izraženo kod ispitivanja ponašanja pri zamoru, gde je od velike važnosti eksperimentalno određivanje Paris-ovih koeficijenata za svako zasebno ispitivanje. Rezultati dobijeni u okviru ovog istraživanja su potvrdili ovu praksu, budući da je pokazano da i epruvete od istog materijala mogu imati značajno drugačije ponašanje u smislu rasta zamorne prsline, u zavisnosti od položaja zareza i unete toplote pri zavarivanju na različitim krajevima spoja.

## **1.5 Tema istraživanja**

U ovom delu uvoda će biti prikazane i ukratko objašnjene sve aktivnosti koje su urađene u okviru izrade predmetne disertacije. Svi ovi eksperimenti i numeričke simulacije bave se temom koja je dosad slabo razrađena, s obzirom na prethodno pominjane probleme vezane za zamor. Pored toga, i sam materijal koji je predmet ove disertacije, čelik P460NL1, još uvek nije detaljno ispitivan u smislu zamornog ponašanja, pre svega u smislu određivanja koeficijenata Paris-ove jednačine. Sam postupak njihovog određivanja je takođe specifičan u ovom slučaju, s obzirom na razlike među epruvetama u smislu položaja zareza i njihove lokacije u samoj zavarenoj ploči. Ovakvo deljenje tih epruveta u različite grupe dovelo je do bitnih razlika i u rezultatima ispitivanja savijanjem u tri tačke, za razliku od uobičajenih eksperimenata u kojima su se vrednosti ovih koeficijenata uglavnom poklapale, za sve

ispitane epruvete, čak i u slučajevima da su one bile uzete iz više materijala (koji svi pripadaju istoj grupi čelika, na primer). Različiti položaji zareza u zoni uticaja toplote omogućili su i da se uzme u obzir uticaj mikrostruktura različitih oblasti zavarenog spoja, budući da je u sled njegove geometrije zamorna prslina prolazila kroz više oblasti, i krive koje su pratile njen rast su se menjale u skladu sa tim prelazima. Uzimanjem u razmatranje uticaja mikrostrukture je takođe uključena i temperatura kao uticajni faktor, s obzirom da je usled većeg zagrevanja krajnjeg dela ploče tokom zavarivanja došlo do proširenja zone uticaja toplote u odnosu na njene dimenzije u početnom delu, u kom su izmerene niže temperature tokom samog procesa zavarivanja. Uticaj temperature uzet je u obzir i preko merenja vremena hlađenja  $t_{8/5}$ , sa ciljem da se potvrdi preciznost usvojene metoda za određivanje neophodnih temperatura predgrevanja i međuprolaza.

Obimom istraživanja u okviru izrade ove disertacije obuhvaćeno je sledeće:

- Definisane postupka i parametara zavarivanja (jačine struje, napona, brzine zavarivanja, unosa toplote...), kao i određivanje temperature predgrevanja i međuprolazne temperature. Takođe je izračunato i vreme hlađenja  $t_{8/5}$ .
- Zavarivanje dve ploče, dimenzija 500x200x14 mm - ova faza obuhvatala je primenu MAG postupka, i elektrode VAC 65 kao dodatnog materijala. U okviru ove faze su izvedene i sve neophodne pripreme materijala za zavarivanje, uključujući predgrevanje i obaranje ivica žleba. Tokom samog postupka zavarivanja, izmerene su temperature u prethodno definisanim tačkama duž ivice žleba, primenom kontaktnog termometra. Sve aktivnosti obuhvaćene ovom fazom su urađene u pogonu GOŠA u Smederevskoj Palanci.
- Sečenje epruveta iz zavarene ploče za potrebe eksperimentalnog ispitivanja. Za potrebe zatezanja su napravljene 2 epruvete poprečnog preseka 25x14 mm, za ispitivanje žilavosti na instrumentiranom Charpy-jevom klatnu je napravljeno ukupno 14 epruveta, 2 iz osnovnog metala i 12 sa zarezom u ZUT, dok je za ispitivanje savijanjem u tri tačke izrađeno ukupno 12 epruveta, takođe sa zarezom u ZUT. Epruvete sa zarezima u ZUT (za oba eksperimenta) su podeljene u četiri grupe, prema tome sa koje strane ploče su uzete, kao i lokaciji zareza (u korenu ili licu ZUT). Takođe su urađene dve epruvete za ispitivanje tvrdoće, uzete sa različitih krajeva zavarene ploče.



- Eksperimentalna ispitivanja na epruvetama uzetim iz prethodno pomenute ploče. Ova ispitivanja obuhvatila su zatezanje, žilavost, tvrdoću, savijanje u tri tačke (zamor) kao i metalografska ispitivanja (mikro i makrostrukture). Poslednje dve stavke su iskorišćene kao osnova za numeričku simulaciju. Metalografska ispitivanja, urađena uz pomoć elektronskog mikroskopa u cilju određivanja mikrostrukture prelomnih površina su urađena na epruvetama za zamor (savijanje u tri tačke), koje su naknadno polomljene na Charpy-jevom klatnu. Svi eksperimenti su urađeni na Vojno-tehničkom Institutu u Beogradu.
- Obradu rezultata, pri čemu je akcenat bio na određivanju Paris-ovih koeficijenata na osnovu dijagrama  $da/dN-\Delta K$ , dobijenih savijanjem u tri tačke, kako za celokupne krive, tako i za njihove segmente koji su odgovarali određenim zonama zavarenog spoja kroz koje je zamorna prslina prošla. Ovako dobijene vrednosti koeficijenata su zatim upotrebljene kao ulazni parametri za numeričku simulaciju.
- Utvrđivanje međusobne povezanosti dobijenih rezultata, odnosno uticaja temperature i mikrostruktura na otpornost prema rastu zamorne prsline. Poređenje rezultata ispitivanja žilavosti u pogledu energija nastanka i energije rasta prsline i njihovih međusobnih odnosa u zavisnosti od položaja zareza u ZUT-u. Određivanje veze između izmerenih vremena hlađenja  $t_{8/5}$  i tvrdoća u zoni uticaja toplote kako bi se objasnilo prisustvo izvesnih oblasti u kojima je tvrdoća prekoračila dozvoljene vrednosti za ovu vrstu materijala.
- Izrada numeričkih modela sa posebno definisanim oblastima zavarenog spoja i zamornom prslinom zadatom u vrhu zareza. Defnisanje graničnih uslova, opterećenja i generisanje mreže konačnih elemenata. Numerička simulacija rasta zamorne prsline primenom eksperimentalno dobijenih vrednosti koeficijenata Paris-ove jednačine. Poređenje dobijenih rezultata sa eksperimentima i eventualna optimizacija modela.

## 2. Pregled literature

### 2.1 Uvod

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati određenih radova koji su se bavili ovom tematikom, pre svega iz oblasti zamora i primene čelika P460NL1, u kombinaciji sa metodom konačnih elemenata, uključujući radove sa međunarodnih konferencija, iz časopisa, kao i doktorske disertacije. Kroz ove radove će biti objašnjeno kako je došlo do ideje za izbor teme, i kako je sve izgledalo od samog početka. Preciznije, radovi predstavljeni u okviru ovog pregleda literature će biti fokusirani na sledeće:

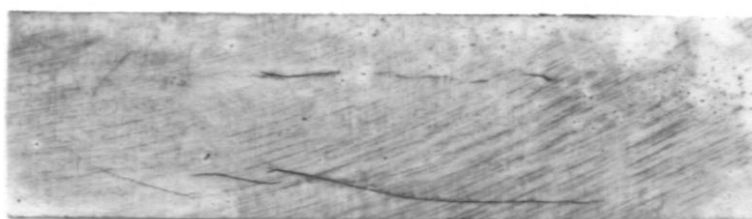
- Eksperimentalno ispitivanje i numeričku analizu epruveta od čelika P460NL1, sa posebnim osvrtom na zonu uticaja toplote.
- Određivanje koeficijenata Parisove jednačine,  $C$  i  $m$ , eksperimentalnim metodama.
- Rast zamorne prsline.
- Primenu odgovarajućih standarda pri analiziranju zamora.
- Uticaj temperature predgrevanja i temperature pri zavarivanju na vreme hlađenja zavarenog spoja.

### 2.2 Naponsko stanje oko grešaka u zavarenom spoju

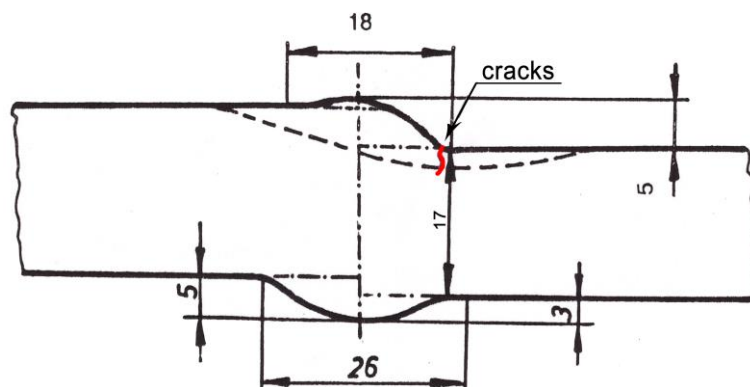
Prvi rad koji će biti obuhvaćen ovim pregledom je vezan za numeričku analizu naponskog stanja oko grešaka u zavarenom spoju, s obzirom da je ovo bio prvi rad autora koji se bavio čelikom P460NL1 [4]. U ovom radu je analizirana posuda pod pritiskom za skladištenje tečnog ugljen-dioksida, u kojoj su otkrivene prsline. Cilj je bio da se utvrdi uticaj ovih prsline na integritet posude, odnosno da se odredi koncentracija napona koje one izazivaju. Spoj sa prslinom je zavaren elektrolučno pod praškom (EPP postupak), sa čelikom P460NL1 kao osnovnim materijalom, i žicom EPP2NiMo2 kao dodatnim materijalom, u kombinaciji sa praškom OP 121 TT.

Nakon ispitivanja metodama bez razaranja (vizuelna inspekcija, ispitivanje magnetnim česticama i ultrazvučno ispitivanje), utvrđeno je prisustvo prsline, koje se mogu

videti na slici 4.1. Ukupna dužina greške koju su sačinjavale ove prsline (koje su se nalazile na veoma malim međusobnim rastojanjima) je bila 60 mm, dok je maksimalna dubina, izmerena ultrazvučnom metodom, iznosila 3 mm, i ova vrednost je usvojena za potrebe numeričke analize. Za zavarene spojeve ove vrste, zahtevan nivo kvaliteta je nivo B, u skladu sa odgovarajućim propisima. Zavareni spoj je takođe imao i nadvišenje, koje se može videti na slici 4.2, zajedno sa dimenzijama. Nadvišenje je iznosilo 4 mm, što je značajno veće od dozvoljene vrednosti od 1.7 mm za ovaj slučaj, tako da je i ono uzeto u obzir kao greška u zavarenom spoju.



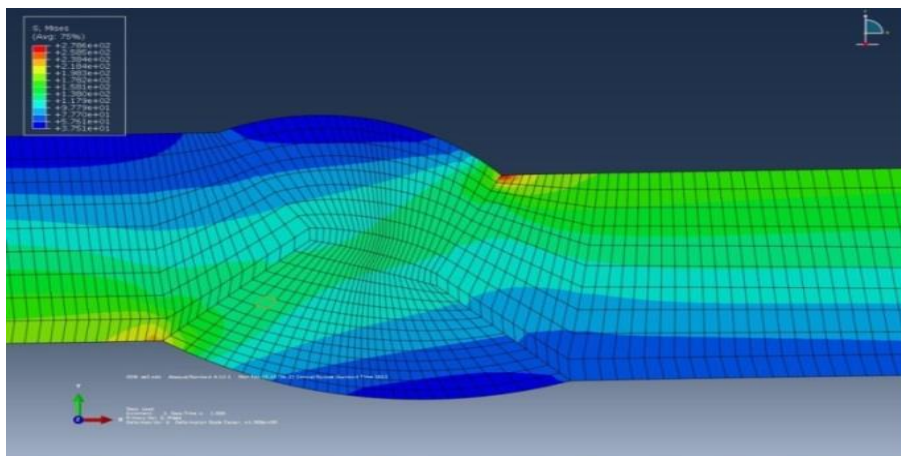
Slika 4.1. Prsline u zavarenom spoju rezervoara za CO<sub>2</sub> [9].



Slika 4.2. Dimenzije zavarenog spoja [9].

Rezervoar za CO<sub>2</sub> je opterećen unutrašnjim pritiskom od 2.6 MPa, pri čemu je voda korišćena kao fluid za ispitivanje, sa temperaturom u rasponu od 10° do 20°C. Računski određena vrednost normalnih napona, koji su korišćeni pri simulaciji, iznosila je 115 MPa. U obzir su uzeti i zaostali naponi, koji su usvojeni kao 85% vrednosti granice tečenja dodatnog materijala (450 MPa), odnosno iznosili su oko 383 MPa. Ovako visoka vrednost usvojena je usled nemogućnosti primene dovoljnog broja metoda za smanjivanje zaostalih napona koje se inače koriste pri zavarivanju čelika P460NL1, a kao posledica odabranog postupka zavarivanja.

Na slici 4.3 se mogu videti rezultati numeričke analize, u smislu raspodele i koncentracije napona



Slika 4.3. Raspodela napona u numeričkom modelu [9].

Može se videti da se najveća koncentracija javila upravo na očekivanim mestima, usled promene geometrije, ako i prisustva greške (prslina) sa gornje desne strane zavarenog spoja. Maksimalna vrednost je iznosila 279 MPa, što u kombinaciji sa zaostalim naponima daje vrednost od 662 MPa. Na osnovu ovih rezultata je zaključeno da je prisustvo prslina dovelo do napona koji su iznad granice tečenja, bez obzira na činjenicu da su greške tipa prslina bile u dozvoljenim granicama, prema standardu SRPS EN ISO 5817 [58]. U nepovoljnijem slučaju, lokalni napon je uvećan 2.4 puta u odnosu na model bez prslina, što je u kombinaciji sa zaostalim naponima dovelo do gorepomenutog prekoračenja granice tečenja.

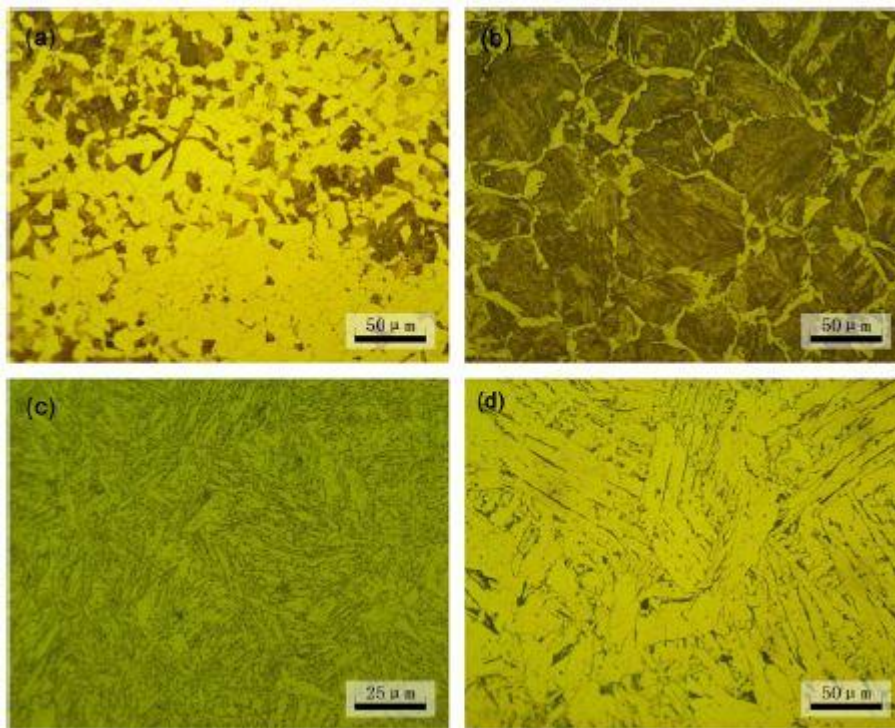
Ideja ovog rada bila je da se osmisle numerički modeli koji mogu verodostojno da prikažu ponašanje zavarene konstrukcije u prisustvu različitih grešaka, i dobijeni su zadovoljavajući rezultati, naravno na osnovu prethodno eksperimentalno određenih podataka neophodnih za simulaciju. Ovaj primer naveden je kao uvodni usled toga što je bio prvi autorov rad koji se bavio ovim čelikom, kao i zbog svoje jednostavnosti.

## 2.3 Uticaj mikrostrukture na rast zamorne prsline u mikrolegiranim čelicima

U narednom primeru će biti prikazana analiza uticaja temperature na ponašanje epruveta od čelika Q345 izloženih zamornom opterećenju. Ovaj rad uzet je u obzir iz razloga što se bavi uticaj temperature na mikrostruktura različitih oblasti zavarenog spoja, što je bio i jedan od predmeta istraživanja u okviru ove disertacije, a u nedostatku literature vezane za zamorna ispitivanja predmetnog čelika [10].

U ovom konkretnom slučaju, izvršeno je ispitivanje savijanjem u četiri tačke, uz istovremeno praćenje rasta prsline metodom akustične emisije, sa ciljem da se utvrde mehanizmi uticaja mikrostrukture na zamorno ponašanje i na akustičnu emisiju, odnosno da se utvrdi korelacija između signala akustične emisije i parametara zamora. Ove veze su uspostavljene preko jednačine veoma nalik Parisovoj, u kojoj se pored raspona faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , i brzine rasta prsline, pojavljuju i dve nove konstante, koje zavise od materijala i uslova ispitivanja. Pored toga, ovaj rad posvećuje pažnju i uticaju mikrostrukture na akustičnu emisiju. Ovo je delom bilo inspirisano i činjenicom da se mikrolegirani čelici često upotrebljavaju pri različitim temperaturama, što za rezultat ima veoma raznovrsne mikrostrukture.

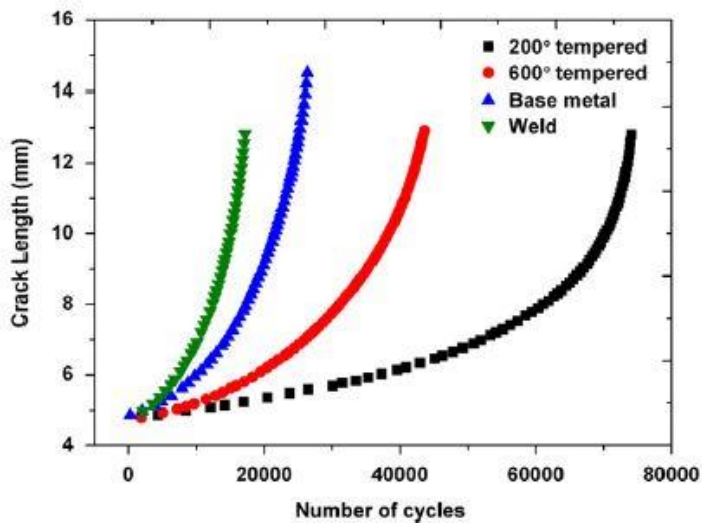
Eksperimentalni deo rada se sastojao u ispitivanju zatezanjem u četiri tačke, sa epruvetama podeljenim u 4 grupe, prema načinu obrade. Prve dve grupe su činile epruvete od osnovnog materijala i iz zavarenog spoja, bez prethodne obrade, dok su druge dve grupe obuhvatale epruvete kaljene i otpuštene na temperaturama od 200° i 600°C, respektivno, nakon čega su dodatno kaljene na sobnoj temperaturi. Na slici 4.4 se mogu videti mikrostrukture za epruvete od osnovnog materijala (a), epruvete obrađene na 200°C (b), epruvete na 600°C (c) i epruvete iz zavarenog spoja (d). Na slikama su primetne razlike u mikrostrukтури za svaku varijantu termičke obrade, u zavisnosti od temperature.



Slika 4.4. Raspodela napona u numeričkom modelu [10].

Ispitivanje zateznih osobina epruveta je pokazalo najveće vrednosti zatezne čvrstoće i granice tečenja za epruvete obrađivane na 200°C, pri čemu je u ovom slučaju elongacija bila najmanja, usled izraženo martenzitne strukture koja se javila. Kod ostale tri epruvete su dobijeni slični rezultati, sa izraženijom elongacijom i nižim vrednostima zatezne čvrstoće i granice tečenja, pri čemu su razlike među njima bile posledice različitih veličina zrna u pretežno feritnim strukturama. Ovim je potvrđeno da temperatura ima značajan uticaj na mikrostrukturu ovakvih čelika, kao i na njihove mehaničke osobine.

Ispitivanje rasta zamorne prsline je pokazalao da čelici povišenih granica tečenja i zatezne čvrstoće (u ovom slučaju feritno/perlitne ili martenzitne strukture) imaju veću otpornost na rast prsline, odnosno da mogu da izdrže znatno veći broj ciklusa (i do 5 puta) u odnosu na neobrađene čelike (slika 4.5). Treba naglasiti da su Parisovi koeficijenti u ovom slučaju određeni eksperimentalno, za sve grupe epruveta, i da su приметne značajne razlike u njihovim vrednostima, kao što je bio slučaj i u ispitivanju u okviru ove disertacije.



Slika 4.5. Krive a-N za sve četiri grupe [10].

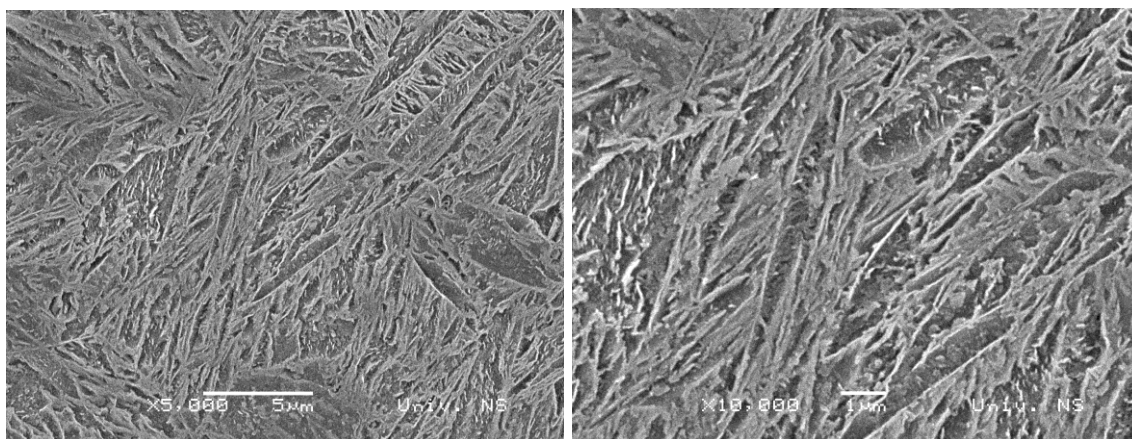
## 2.4 Mehaničke osobine i brzina rasta zamorne prsline u zavarenom spoju pancirnog čelika

U ovom delu pregleda literature će biti prikazana doktorska disertacija Aleksandra Čubrila, iz 2018. godine. Tema ove disertacije je zamor u zavarenim spojevima pancirnog čelika, uz poseban osvrt na negativan uticaj vodonika. Iako uticaj vodonika nije uzet u razmatranje u slučaju čelika P460NL1 (jedna od prednosti ovog materijala je u tome što je otporan na hladne prsline), disertacija sadrži eksperimentalna ispitivanja koja su veoma slična temi ovog rada, i koja su u određenoj meri poslužila kao inspiracija. Iz tog razloga, ovaj pregled će se koncentrisati na eksperimentalni deo, kao i na određivanje energije nastanka i rasta prsline.

I u ovom slučaju, ploče su zavarene primenom postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi gasa, upri čemu je korišćen MIG postupak, sa različitim mešavinama. Korišćene mešavine su argon i 2,5% ugljen-dioksida, odnosno argon + 1.5% kiseonika. Obe mešavine su pogodne za zavarivanje pancirnih čelika, pri čemu se prva koristi pri zavarivanju feritnim ili austenitnim dodatnim materijalom, dok se druga primenjuje u slučaju žice punjene metalnim prahom. Iako su postupci zavarivanja u ove dve disertacije u osnovi slični, postoje značajne razlike, usled zahtevanih mehaničkih osobina zavarenog spoja (pancirni čelici zahtevaju značajno povišenu čvrstoću, P460NL1 zahteva povećanu žilavost). Takođe valja

ponoviti da je u slučaju pancirnih čelika veoma bitan sadržaj ugljenika, kao i sprečavanje vodonika da prodre u ZUT, korišćenjem austenitnog dodatnog materijala, u kojem se vodonik rastvara u mnogo većoj meri. Iz ovoga se vidi značaj mikrostrukture svih oblasti zavarenog spoja, odnosno pravilnog izbora tehnologije zavarivanja.

U okviru eksperimentalnog dela disertacije je urađeno ispitivanje mikro-tvrdoće, i utvrđeno je da se mikrostruktura predmetnog pancirnog čelika sastojala od kaljenog i otpuštenog martenzita (temperature otpuštanja je iznosila 280°C, temperatura kaljenja – 920°C), kao što se može videti na slici ispod.

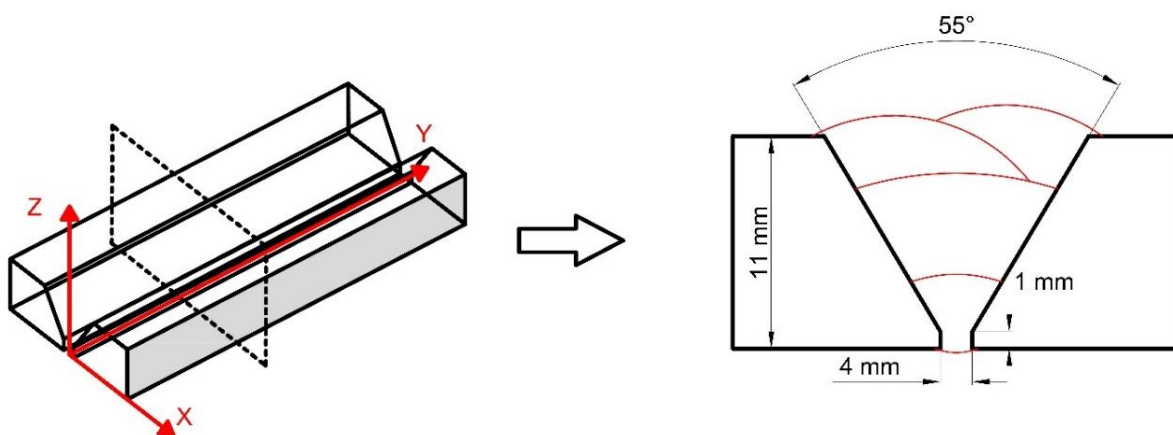


Slika 4.6. Mikrostrukture pancirnog čelika Protac 500 [11].

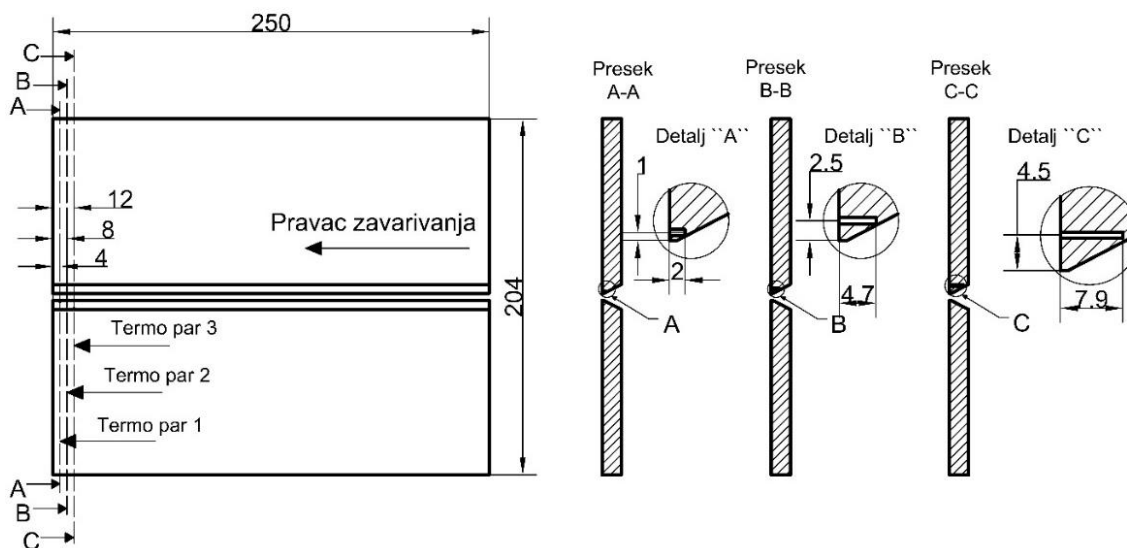
Pri zavarivanju pancirnih čelika se koriste identične temperature predgrevanja i međuprolaza, i njihove vrednosti su u rasponu od 80 do 120°C. Ovakvim izborom temperatura se obezbeđuju znatno veće količini gornjeg i donjeg beinita u poređenju sa martenzitnim fazama grubozrnog područja, čime se u toj oblasti tvrdoća ograničava na vrednost od 540 HV, pri čemu tvrdoća na rastojanju od 15.9 mm od ose metala šava ne sme biti manja od 509 HV, u skladu sa odgovarajućim standardom. U ovom slučaju su ipak odabrane nešto veće vrednosti temperature predgrevanja (150°C) i međuprolazne temperature (160°C), kako bi se brzina hlađenja održavala u rasponu od 1-5°C u sekundi, što je bilo neophodno za dobijanje mikrostrukture čija tvrdoća je u prethodno pominjanim granicama (ovo ograničavanje tvrdoće sa gornje strane je neophodno da bi se smanjila sklonost zavarenog spoja ka pojavi prslina).



Zavarene ploče su imale dimezije 200 x 100 x 11 mm, pri čemu su ivice žleba oborene na ugao od  $27.5^\circ$  (kod ovakvih materijala i ploča većih debljina je uobičajeno da se ide na manje vrednosti ugla, odnosno na zavarivanje u uskom žljebu, [12]). Konfiguracija više-prolaznog zavarivanja je prikazana na slici 4.7, sa obeleženim dimenzijama. Sa slike se može videti da su urađena 4 prolaza. Temperature pri zavarivanju su merene pomoću termoparova, slično postupku primenjenom u radu [12]. Šema termoparova je prikazana na slici 4.8. Svaki termopar je postavljen tako da meri temperaturu pri različitim prolazima tokom zavarivanja.

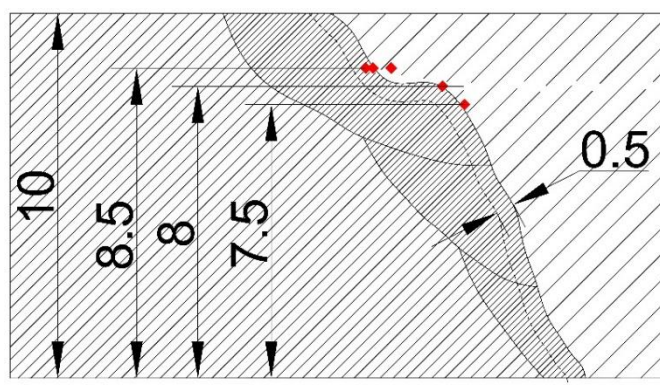


Slika 4.7. Šema zavarivanja pancirnog čelika Protac 500 [11].



Slika 4.8. Raspored termoparova u odnosu na pravac zavarivanja [11].

Ispitivanje tvrdoće je izvršeno nakon procesa zavarivanja, pomoću Digital Micro Vickers Hardness Tester HVS mašine, proizvođača Laizhou Huazin Testing Instrument Co. Ltd, uz silu od 500g. Prvo merenje je izvršeno na rastojanju od 2 mm ispod gornje površine, i nakon postizanja odgovarajućih vrednosti tvrdoćem zavarivanje je nastavljeno na ostalim pločama. Nakon što su zavarene preostale ploče, usledelo je detaljnije merenje tvrdoće, kako bi se utvrdio njen raspored u zavarenom spoju. Primer rasporeda mernih mesta za tvrdoću se može videti na slici ispod.



Slika 4.9. Raspored mernih mesta za tvrdoću [11].

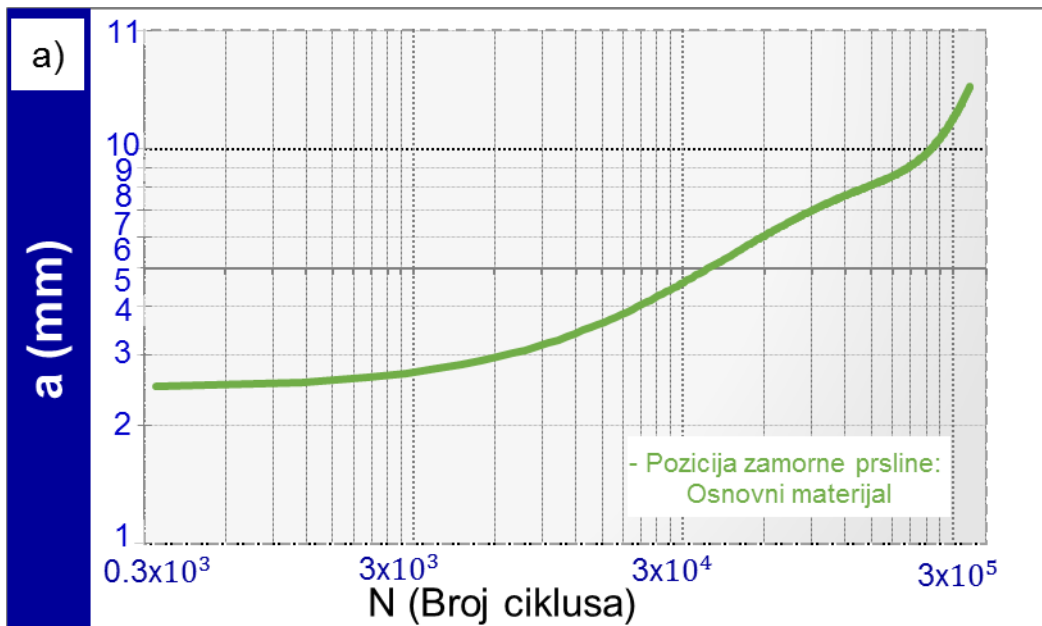
U okviru eksperimenata je urađeno i ispitivanje žilavosti loma u zoni uticaja toplote na uzorcima sa oštrim zarezom. Ispitivanja su urađena na temperaturama od  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  i  $20^{\circ}\text{C}$ . Energija udara zavisi od mikrostrukture i hemijskog sastava čelika, pri čemu kod pancirnih čelika ova energija raste sa povećanjem unosa toplote pri zavarivanju (povećanju vremena hlađenja  $t_{6/2}$ , odnosno vremena potrebnog da se čelik ohladi sa  $600$  na  $200^{\circ}\text{C}$ ). Iz ovoga se može zaključiti da unos toplote ima uticaja i na žilavost loma, što će kasnije biti prikazano i za čelik P460NL1, u smislu odnosa energije nastanka i energije rasta prsline.

Vrednosti ukupne energije loma u slučaju zareza u OM su bile u rasponu od  $27.9$  do  $34.2$  J, pri čemu je udeo energije nastanka prsline značajno veći i kretao se od oko  $75\%$  do  $97\%$ , u zavisnosti od temperature ispitivanja. Energija udara na liniji stapanja bila je značajno veća pri svim temperaturama, i iznosila je od  $40.0$  do  $75.3$  J, pri čemu je odnos energije nastanka i energije rasta prsline značajno varirao, od  $6:1$  do  $1:3$ . Energija nastanka prsline je imala veći udeo uglavnom u slučajevima temperatura od  $20$  i  $-40^{\circ}\text{C}$ , dok je u preostala dva slučaja energija rasta prsline bila dominantna. Kod epruveta sa zarezom u metalu šava,

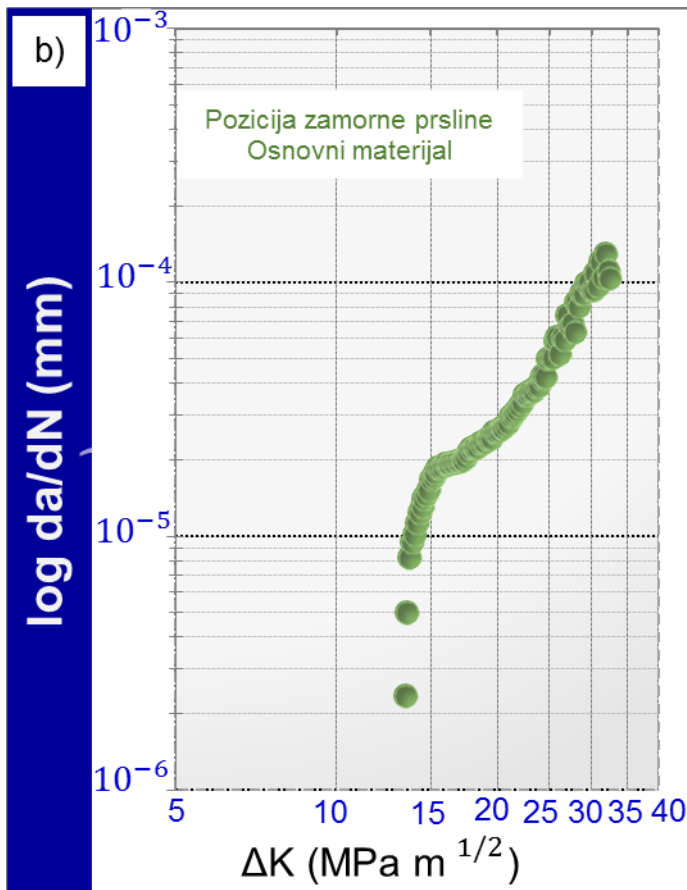
izmerene vrednosti ukupne energije su bile u rasponu od 61.5 do 84.4 J, pri čemu je u svim slučajevima energija rasta prsline bila od 1.5 do 3 puta veća od energije nastanka. Može se primetiti da su u slučaju metala šava vrednosti bile daleko ujednačenije, bez ekstrema kao u slučaju linije stapanja, koji se mogu objasniti izrazitom heterogenošću ove oblasti zavarenog spoja. Ovakve vrednosti ukupne energije loma su karakteristične za materijale povišene čvrstoće, i očekivano manje od vrednosti dobijenih ispitivanjem mikro-legiranih čelika povišene čvrstoće i žilavosti, usled razlika u mikrostrukturama.

Što se ispitivanja rasta zamorne prsline tiče, eksperiment je urađen u skladu sa pominjanim standardom ASTM E647, kojim je propisano merenje rasta zamorne prsline  $da/dN$ , i proračun raspona faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ . Brzina rasta prsline je ispitana u svim oblastima zavarenog spoja, primenom konstantne amplitude opterećenja tokom rasta i sa rastućim opsegom raspona FIN, odnosno u istom režimu kao i određen broj epruveta ispitanih u okviru ove doktorske disertacije. I ovo ispitivanje je urađeno na RUMUL-ovom Fraktomatu 7609/213 u Vojnotehničkom Institutu, kao i zamorna ispitivanja na epruvetama od čelika P460NL1. U ovom slučaju su korišćene merne folije RUMUL RMF A-10, s obzirom da su epruvete za ispitivanje zamora bile većih dimenzija (200x20x10 mm). Sva ispitivanja rasta zamorne prsline su urađena na sobnoj temperaturi.

Na osnovu rezultata ispitivanja rasta zamorne prsline, i dobijenih dijagrama a-N, odnosno  $da/dN - \Delta K$ , određeni su koeficijenti Parisove jednačine, fitovanjem odgovarajućih kriva, odnosno aproksimiranjem dela krive koji predstavlja stabilni rast zamorne prsline i određivanjem njenog nagiba ( $m$ ), kao i preseka sa y osom ( $C$ ). Na slikama 4.10 i 4.11 ispod, se mogu videti a-N i  $da/dN - \Delta K$  krive u logaritamskoj razmeri na osnovu kojih su određeni koeficijenti, za primer epruvete prsline u osnovnom materijalu.



Slika 4.10. Kriva zavisnosti duzine prsline od broja ciklusa [11].



Slika 4.11. Dijagram brzina prsline – raspon faktora intenziteta napona [11].

Dobijene vrednosti koeficijenata su određene kao srednja vrednost dva ispitivanja, dok je vrednost  $\Delta K$  iznosila  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , za prslinu u osnovnom materijalu. Vrednosti koeficijenata  $C$  i  $m$  za ovaj slučaj su iznosile  $10^{-9}$  m/ciklusu i 3.36, respektivno. Na sličan način su određene i vrednosti ovih koeficijenata u slučaju epruveta sa zamornom prslinom u ZUT-u, i iznosile su  $10^{-8}$  i 3.79. Pored ova dva slučaja, ispitan je i slučaj zamorne prsline u zoni uticaja toplote i metalu šava, pri čemu su dobijene nešto drugačije vrednosti. Koeficijent  $C$  je u ovom slučaju bio  $3 \cdot 10^{-13}$ , dok je koeficijent  $m$  iznosio 5.68, što predstavlja vrednost znatno veću od onih koje se pominju u literaturi, što potvrđuje osnovanost preporuka da se ovi koeficijenti određuju eksperimentalno kad god postoji mogućnost. Iz ovoga se može videti da vrednosti  $C$  i  $m$  za epruvete od istih materijala mogu značajno da se razlikuju u zavisnosti od položaja zamorne prsline, odnosno mikrostruktura kroz koje ona prolazi tokom svog rada. Na kraju, određeni su koeficijenti i za epruvete sa zamornom prslinom u samom metalu šava, po istom principu kao i u ostalim slučajevima. Odgovarajuće vrednosti koeficijenata su iznosile  $4 \cdot 10^{-11}$  za  $C$ , odnosno 5.25 za  $m$ .

Na osnovu svih prethodno opisanih ispitivanja, došlo se do zaključka da je brzina rasta zamorne prsline bila najveća u metalu šava, potom u kombinaciji ZUT-MŠ, dok je najmanja bila u osnovnom materijalu. Brzina rasta prsline u metalu šava, odnosno austenitnom dodatnom materijalu koji je upotrebljen kako bi se povećavala otpornost na nastanak prsline, je bila značajno veća u odnosu na ostale oblasti, kao posledica značajne koncentracije napona u ovom delu zavarenog spoja. Gore navedeno takođe znači da je otpornost na rast prsline u linearnoj oblasti bila najveća u slučaju osnovnog materijala, što se odrazilo i na otpornost na nastanak prsline.

Ovaj primer je predstavljen sa ciljem da prikaže eksperimentalni postupak ispitivanja epruveta sa zamornom prslinom, dobijanja odgovarajućih rezultata i njihove interpretacije u smislu određivanja koeficijenata  $C$  i  $m$ , što je jedan od ciljeva ove doktorske disertacije, uz osvrt na druge eksperimente koji su bili zajednički za oba rada (merenje tvrdoće, žilavosti...), tim pre što su svi ovi eksperimenti urađeni na istom mestu, korišćenjem iste opreme. Eksperiment koji je objašnjen u ovom delu pregleda literature je takođe potvrdio značaj eksperimentalnog pristupa određivanju Parisovih koeficijenata.

## **2.5 Analiza uticaja prslina na integritet feritno – austenitnih zavarenih spojeva**

U ovom delu će biti ukratko prikazana disertacija doktora Radomira Jovičića, koji je dao neizmeran doprinos autorovom radu, a koja se bavi ispitivanjem ponašanja feritno-austenitnih zavarenih spojeva sa prslinom, pri čemu je osnovni materijal takođe bio P460NL1. I u ovom slučaju je izbor ovog čelika bio uslovljen njegovim osobinama (povišena čvrstoća, dobra žilavost, otpornost na koroziju i relativno niska cena), pre svega mogućnosti rada u uslovima niskih temperatura. U ovakvim situacijama se priključci za posude pod pritiskom izrađuju od austenitnih čelika, koji i na ovakvim temperatura zadržavaju svoju dobru žilavost. Stoga je kombinacija ove dve vrste čelika često u upotrebi, i ovaj rad je koncentrisan na uticaj izrazite heterogenosti takvih zavarenih spojeva na njihov integritet. Izražena heterogenost je, između ostalog, posledica zavarivanja feritno-austenitnih spojeva austenitnim dodatnim materijalima, usled čega se javlja struktura zavarenog spoja koja se sastoji od najmanje pet različitih materijala [13].

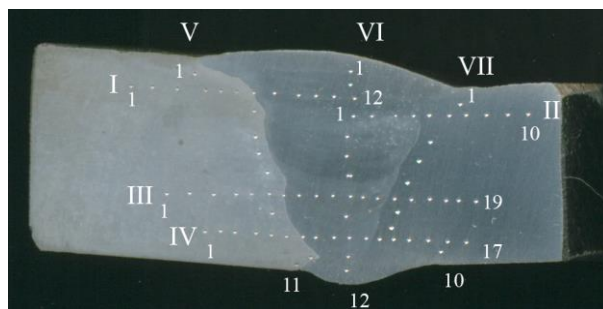
Kod heterogenih zavarenih spojeva ove vrste, dolazi do formiranja zone mešanja sa strane feritnog čelika, čiji se hemijski sastav menja od nelegiranog niskougljeničnog osnovnog materijala do visokolegiarnog metala šava. Kao posledica ovoga, dolazi do pojave zakaljenje martenzitne strukture, koja u mikrolegiranim čelicima dovodi po povećane sklonosti ka nastanku takozvanih hladnih prslina, čime se sigurnost u eksploataciji ovih čelika umanjuje. Gore pomenuti problemi, u kombinaciji sa izrazito različitim mehaničkim osobinama pojedinih oblasti zavarenog spoja u velikoj meri otežavaju predivšanje ponašanja FA spojeva pri eksploataciji zavarenih konstrukcija (u ovom slučaju posuda pod pritiskom), usled različitih stepena deformisanja ovih oblasti. Ovaj problem može otići dotle da se neki delovi zavarenog spoja deformišu plastično, dok drugi ostaju u elastičnoj zoni. Ovakvi slučajevi deformacije mogu dovesti do neuobičajenog ponašanja konstrukcije, kao što se može videti na primeru rezervoara iz HE „Bajina Bašta“, kod kog je, kao posledica značajnog andermečinga, došlo do „plastičnog rasterećenja“ [8].

Analiza uticaja prslina na integritet FA zavarenih spojeva je u ovom radu izvršena primenom elastoplastične mehanike loma (EPML), koji je zasnovan na primeni odgovarajućih parametara, J-integrala i otvaranja vrha prsline (CTOD), o kojima je već bilo

reču u uvodnom delu ove disertacije. Analiza je obuhvatala određivanje sile rasta prsline, R krive i veličine grešaka u zavarenom spoju i njihovo poređenje.

Usled izražene heterogenosti FA zavarenih spojeva, bilo je neophodno odrediti mikrostrukture i mehaničke osobine svih njegovih oblasti, primenom odgovarajućih eksperimentalnih metoda. U tom cilju su zavarene po 4 ploče, i ispitane su na zatezanje instrumentiranim Šarpijevim klatnom. Urađena su i metalografska ispitivanja, kao i ispitivanja mikrotvrdoće (Vikers). Uz sve ovo, određene su i J-R krive, primenom mehanike loma.

Ispitivanja zatezanjem su urađena kako bi se odredili napon tečenja,  $R_e$ , i koeficijent ojačavanja,  $H'$ , za metale šava sa obe strane (feritne i austenitne), kao i za MŠ. U slučaju sitnozrne i grubozrne zone uticaja toplote, ove vrednosti su određene na osnovu merenja Vickersove tvrdoće, HV10. Ova merenja su izvršena duž 4 karakteristične linije, kako bi se obuhvatile sve neophodne mikrostrukture i mogu se videti na slici 4.12.



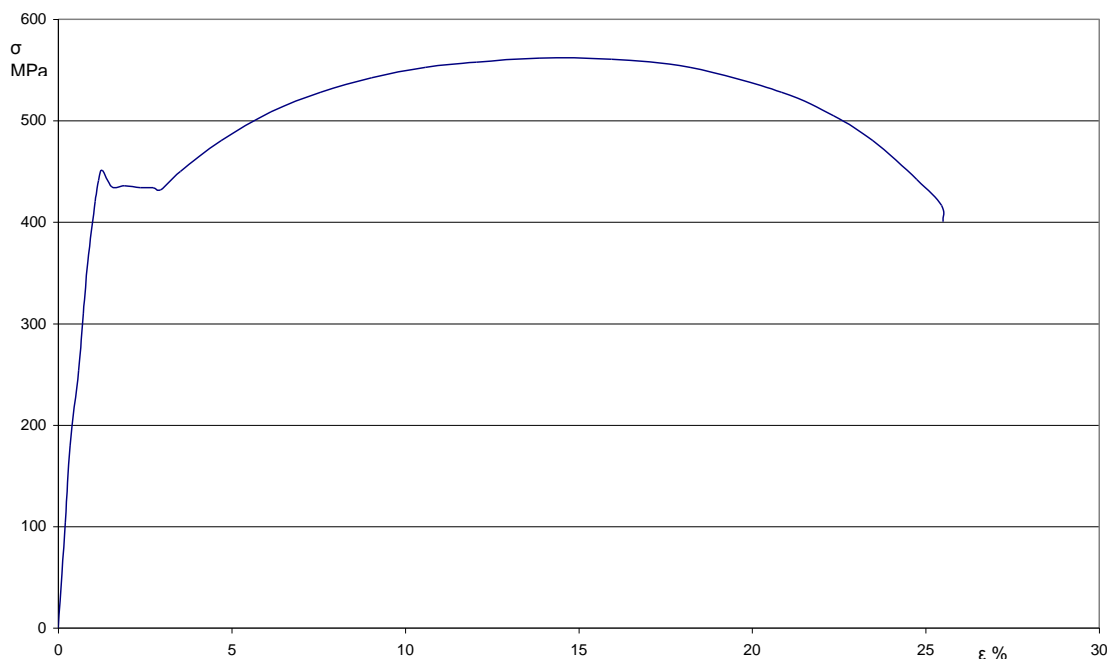
Slika 4. Raspored mernih mesta i karakterističnih linija u FA zavarenom spoju [13].

Najveća vrednost napona tečenja je utvrđena za metal šava (545 MPa), dok je spoj OM – austenitni čelik imao najnižu vrednost (315 MPa). Sa druge strane, austenitni spoj je imao najveći koeficijent ojačavanja, što je bilo i očekivano. Naponi tečenja u sitnozrnim i grubozrnim ZUT-ovima su imali vrednosti od 450-550 MPa u spoju sa mikrolegiranim čelikom, odnosno 306-343 MPa u spoju sa austenitnim čelikom, dok su tvrdoće izmerene Vickersovom metodom bile u rasponu od 195-226 HV, za oba materijala.

Merenje raspodele deformacija je urađeno uz pomoć mernih traka, koje su raspoređene u merne lance, postavljene sa svake strane ploče. Svaki merni lanac se sastojao od po 10 mernih traka dužine 0.625 mm, i bio je podeljen na dva dela od po 5 mernih traka,

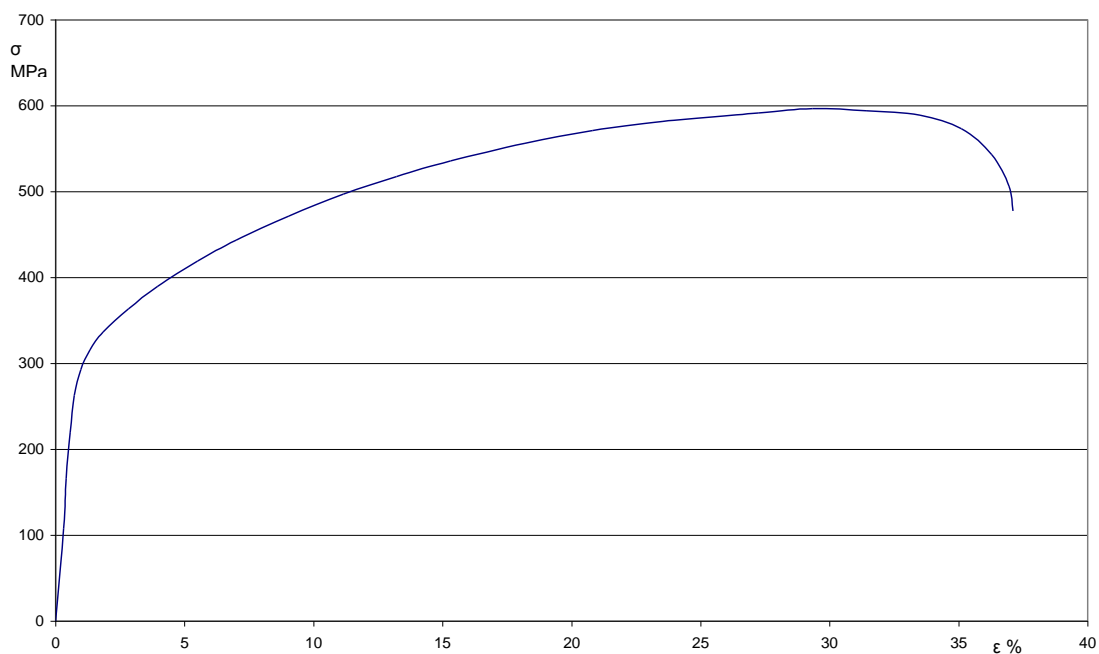
kako bi se pokrile obe zone uticaja toplote. Tri merne trake su pokrivala svaki ZUT, na krajevima i sredini, dok su preostale dve postavljene u MŠ, odnosno OM. Najveća prosečna deformacija je izmerena u spoju osnovnog materijala i austenitnog čelika (očekivano, s obzirom na značajno nižu granicu tečenja u poređenju sa ostalim zonama i samu veličinu zone), i iznosila je 11.34%. Najmanje deformacije su zabeležene u oblasti koju je obuhvatila metal šava i finožrni ZUT mikrolegiranog čelika, i iznosile su 1.35%. Manje vrednosti deformacija za oblasti u kojima se nalazi FZ ZUT su između ostalog posledica značajno većeg koeficijenta ojačavanja, u poređenju sa grubozrnim ZUT-om, iako ovaj drugi ima приметно višu granicu tečenja.

Na slika 4.13 i 4.14 ispod se mogu videti dijagrami  $\sigma - \epsilon$  za oba osnovna materijala, odnosno mikrolegirani čelik (P460NL1) i austenitni čelik (X6CrNiMoTi 17 12 2). Iz dijagrama sa slike 4.13 se može videti da su vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće bliske onima koje su određene za P460NL1 u okviru ove disertacije, pri čemu je zatezna čvrstoća u ovom slučaju nešto niža, ali i dalje u granicama propisanim odgovarajućim standardima.



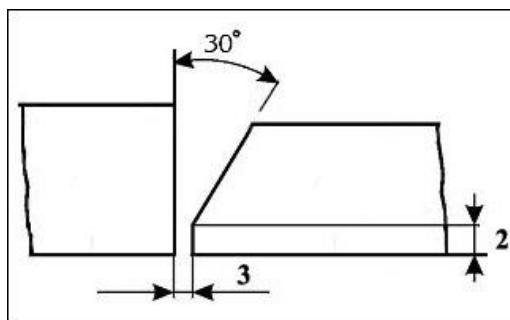
Slika 4.13. Dijagram napon – deformacija za mikrolegirani čelik (P460NL1) [13]





Slika 4.14. Dijagram napon – deformacija za austenitni čelik (X6CrNiMoTi 17 2 2) [13]

Prethodno pominjane ploče koje su zavarene za potrebe ispitivanja, su zavarene ručnim elektrolučnim postupkom, pri čemu je kao dodatni materijal korišćena obložena elektroda INOX R 29/9, proizvođača Železarna Jesenice. Dimenzije zavarenih ploča iznosile su 500 x 200 mm. Ploče od austenitnog čelika su imale debljinu od 12 mm, dok su ploče od mikrolegiranog čelika imale debljinu od 14 mm. Oblik i dimenzije žleba su prikazane na slici 4.15. S obzirom na karakteristike zavarljivosti oba osnovna materijala, predgrevanje je bilo neophodno samo u slučaju mikrolegiranog čelika, pri čemu je temperatura predgrevanja određena u skladu sa Itto-Bessyo metodom.



Slika 4.15. Oblik i dimenzije žleba [13]

Kao i u prethodno objašnjenom primeru [12], i u ovom slučaju se rizik od nastanka hladnih prslina smanjuje primenom dodatnih materijala koje karakteriše austenitna struktura, za koju je pomenuto da se u njoj vodonik (koji doprinosi nastanku ovakvih prslina) mnogo više rastvara. U ovom slučaju, cilj je bio da se sav vodonik unet u metal šava tokom zavarivanja zadrži tamo, kako bi se sprečila njegova difuzija u ZUT. Međutim, iskustva iz prakse su pokazala da se hladne prsline ipak javljaju u ZUT i u slučaju austenitnog MŠ, što znači da je neophodno pri proračunu temperature predgrevanja treba uzeti u obzir i sadržaj vodonika.

Ručno elektrolučno zavarivanje je izvedeno uređajem KEMPPI Mastertig AC/DC 2500, pri temperaturi od oko 15°C. Temperatura predgrevanja je u svim slučajevima iznosila 200°C, pri čemu su među prolazne temperature bile u rasponu od 190-220°C. Vrednosti temperatura su praćene pomoću kontaktnog termometra, slično kao i kod zavarivanja izvedenog u okviru ove disertacije. Nakon zavarivanja, pristupilo se ispitivanju metodama sa i bez razaranja. Prvi deo ispitivanja je obuhvatio IBR metodama vizuelnog pregleda i radiografije, kao i ispitivanje penetrantima i ultrazvukom. Utvrđeno je prisustvo završnog kratera sa zrakastim prslinama u ploči br. 1, kao i pojedinačne pore u preostale tri ploče.

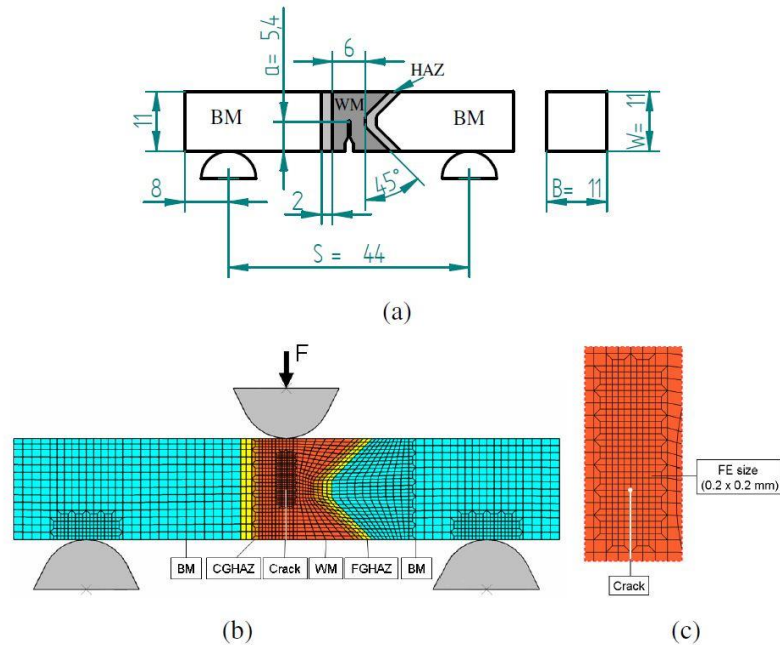
## **2.6 Ocena integriteta zavarenih tankozidnih aluminijumskih konstrukcija**

Ova doktorska disertacija je uzeta u obzir ne zbog materijala kojim se bavi, već zbog numeričke analize kojom je prikazan rast prsline, pri čemu je zona uticaja toplote podeljena na dve podoblasti, grubozrnu i sitnozrnu, sa različitim mehaničkim osobinama (ulaznim podacima za proračun). Ova simulacija je delom inspirisala numerički deo analiziranja rasta prsline u okviru predmetne disertacije, pre svega usled posmaranja ZUT-a kao celine sa različitim mikrostrukturama, što odgovara u velikoj meri i realnom stanju (mada realne zone uticaja toplote imaju mnogo više podoblasti, u zavisnosti od broja prolaza pri zavarivanju). I u ovom slučaju je uzeta u obzir mogućnost rasta prsline kroz zonu uticaja toplote, čak i pod pretpostavkom da se početna prslina nalazila u MŠ ili OM. Stoga je pri numeričkim simulacijama zavarenih spojeva od velike važnosti uzeti u obzir i heterogenost zone uticaja toplote, koja je neretko upravo iz tog razloga najkritičniji deo samog zavarenog spoja. U zoni

uticaja toplote je rast zrna najizraženiji, naročito u oblasti linije stapanja, što dovodi do degradacije mehaničkih osobina, odnosno do pada žilavosti i plastičnosti, pri čemu je ovaj efekat izraženiji pri zavarivanju u jednom prolazu u odnosu na višeprolazni postupak. U ovoj disertaciji je takođe primenjena metoda konačnih elemenata, i korišćen je softverski paket ABAQUS. Modelirane su dve epruvete za savijanje u tri tačke, kao i dve zatezne ploče sa prslinama u ZUT-u i metalu šava [14], u dve i tri dimenzije. Numerička analiza je zasnovana na tzv. Kompletnom Gurson-ovom modelu (Complete Gurson Model - CGM [15]).

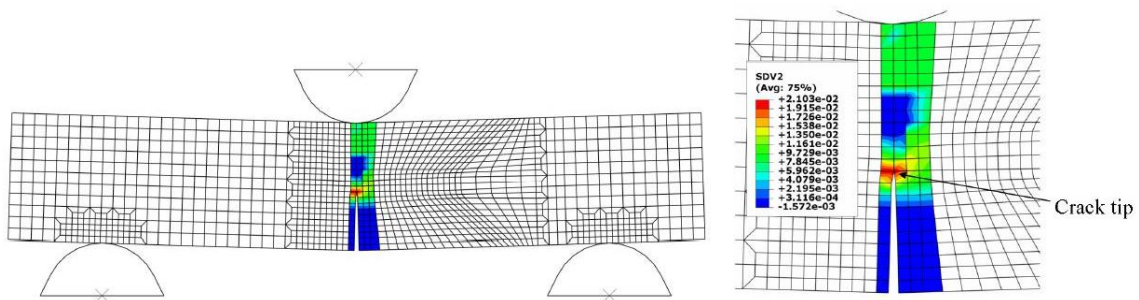
Ovaj model korišćen je za simuliranje samog domena prsline, dok je za ostatak modela usvojena elasto-plastično ponašanje. Prslina je u slučaju metala šava definisana u ovoj elasto-plastičnoj oblasti, dok je u slučaju ZUT-a u CGM oblasti. Kao što je napomenuto, zavareni spoj je podeljen na četiri oblasti, usled podele ZUT-a na grubozrni i sitnozrni deo. Plastično (nelinearno) ponašanje ovih oblasti je definisao na osnovu stvarnih kriva napon-deformacija, pri čemu se ove krive dobijaju primenom određenih formula koje pretvaraju vrednosti napona i deformacija sa inženjerske krive u stvarne vrednosti (na ovaj način ABAQUS uzima u obzir smanjenje poprečnog preseka pri delovanju opterećenja koje izaziva plastičnu deformaciju).

Dvodimenzionalni modeli sa prslinom u MŠ, odnosno ZUT su analizirani uz pretpostavku ravnog stanja deformacija, primenom četvorouganih konačnih elemenata sa osam čvorova i Gauss-ovom integracijom. Veličina elemenata oko vrha prsline je definisana na način koji odgovara srednjoj slobodnoj putanji između nemetalnih uključaka u ispitivanom materijalu. Geometrija epruvete za savijanje u tri tačke i mreža konačnih elemenata za ove modele su prikazane na slici 4.16 ispod. Na slici se takođe vide i granični uslovi, kao i opterećenje. Konačni elementi na mestima gde se očekuju koncentracije napona su i veće deformacije su standardno usitnjeni u odnosu na ostatak modela. Definisane sile na način prikazan na slici je uobičajen postupak kod simuliranja savijanja u tri tačke, usled nemogućnosti da se koncentrisana sila nanese direktno na model i da se dobije rezultat koji ima ikakve veze sa realnošću, što je autor ove disertacije naučio na teži način [66].



Slika 4.16 Dimenzije SENB epruvete (a), mreža konačnih elemenata (b) i detaljniji prikaz KE u oblasti oko vrha prsline [14]

Nastanak prsline se primenom CGM modela predviđa na osnovu kriterijuma loma, koji predstavlja trenutak u kom dolazi do oštećenja konačnih elemenata u vrhu prsline, i može se definisati na nekoliko načina, pri čemu je u ovom slučaju kao kriterijum usvojena kritična vrednost J-integrala. U trenutku kada J-integrala pređe svoju kritičnu vrednost, dolazi do rasta prsline. Kod CGM modela se ispunjavanje ovog uslova određuje praćenjem vrednosti udela zapremine praznine (void volue fraction), i njegovo dostizanje kritične vrednosti predstavlja trenutak u kome se određuju parametri rasta prsline. Na slici 4.17 je prikazana raspodela udela zapremine praznina, sa detaljnijim prikazom elemenata u okolini vrha prsline.



Slika 4.17. Raspodela udela zapremine praznina tokom rasta prsline [14].

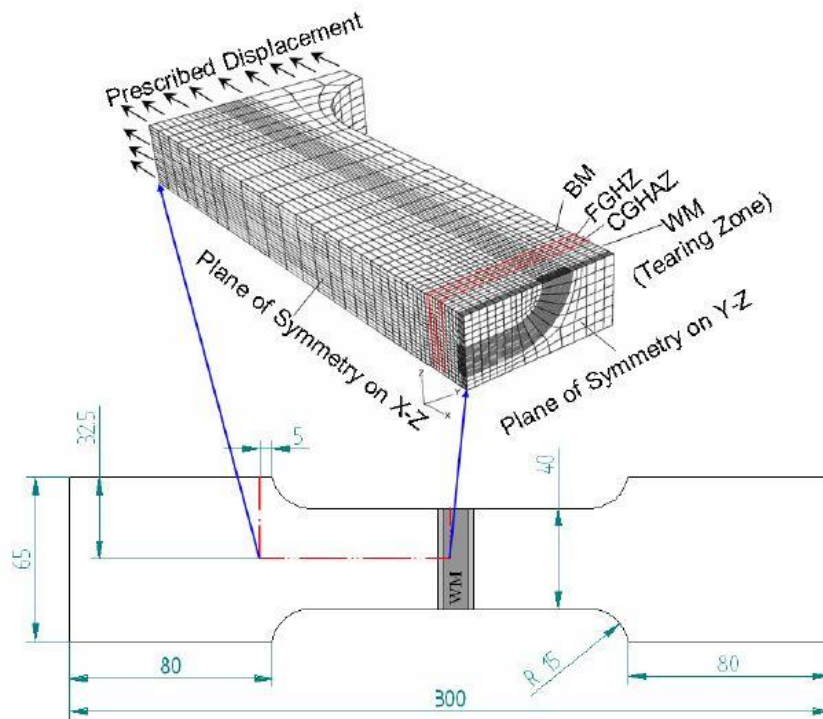
Rast prsline se može simulirati na četiri načina primenom metode konačnih elemenata, pri čemu je u ovoj simulaciji upotrebljena takozvana tehnika smanjenja krutosti, zasnovana na  $J$ - $R$  krivama dobijenim za MŠ i ZUT modele sa prslinom. Dužina prsline je određena na osnovu putanje koju su formirali oštećeni elementi, koji se mogu videti na slici 4.18, obeleženi vidno različitim bojama u odnosu na ostatak modela. Dužina prsline je jednostavno određena množenjem originalne dužine odgovarajućeg elementa brojem potpuno oštećenih elemenata. Pri tome je pretpostavljena da do potpunog gubitka nosivosti dolazi pri dostizanju određene vrednosti udela zapremine praznina [14], i na osnovu ovoga se potom određuje kritična vrednost  $J$ -integrala.

Jedan od ključnih faktora koji treba uzeti u obzir pri numeričkoj analizi rasta prsline je veličina elemenata u mreži, i njeno pravilno usvajanje predstavlja najzahtevniji i najobimniji deo celog proračuna. Cilj je da se pronađe veličina elemenata pri kojoj će se ostvariti konvergencija, odnosno pri kojoj dalje smanjivanje mreže neće uticati više na rezultat (osim što eventualno može da dovede do nemogućnosti proračuna). Veličina elemenata u ovom proračunu je, kao što je prethodno pomenuto određena kao približna vrednost srednje slobodne putanje između nemetalnih uključaka. U zoni uticaja toplote su definisani elementi manji od ove vrednosti, dok su u slučaju MŠ usvojeni elementi većih dimenzija. Dobro slaganje dobijenih numeričkih rezultata sa eksperimentalnim je potvrdilo validnost ovakvog pristupa određivanju veličine konačnih elemenata [14].

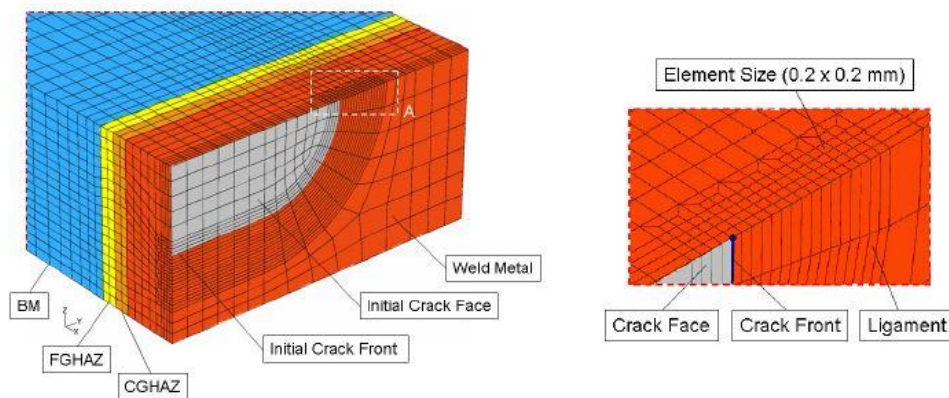
Numerička simulacija 3D modela je urađena za zatezne ploče od čelika povišene čvrstoće, koje se često koriste pri izradi posuda pod pritiskom. U ovom slučaju su definisane polueliptične prsline, ponovo u ZUT i u MŠ, uz usvajanje  $J$ - $R$  krive kao kriterijuma za definisanje početka rasta prsline. U skladu sa graničnim uslovima, usvojene su četvrtina modela u slučaju prsline u MŠ, dok je kod prsline u sitnozrnoj zoni uticaja toplote model prepolovljen (usled različitih uslova simetrije). Kod ovih modela je sila definisana preko pomeranja u pravcu  $X$  ose.

Kod ovih modela je takođe usvojena pretpostavka da se oštećenje prouzrokovano rastom prsline javlja samo u uskoj oblasti ravni prsline, odnosno nije bilo potrebe za usvajanje odgovarajućeg konstitutivnog modela za celu ploču, čime je značajno smanjeno

vreme potrebno za proračun, bez gubitaka u smislu preciznosti. Gustina mreže konačnih elemenata je ponovo zavisila od očekivanih deformacija u određenim delovima ploče, pri čemu je oblast oko prsline modelirana primenom CGM metode, dok je za grublji deo mreže (osnovni materijal, grubozrni ZUT) korišćen kriterijum Mizesove plastičnosti. Veličina konačnih elemenata je usvojena na isti način kao i slučaju dvodimenzionalnih modela. Na slici 4.18 su prikazane dimenzije zateznih ploča, kao i mreža konačnih elemenata, sa svim odgovarajućim oblastima zavarenog spoja i opterećenjem zadatim preko pomeranja.

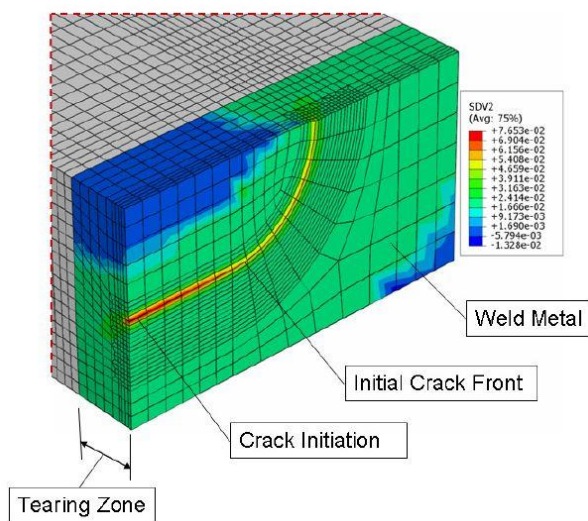


(a)

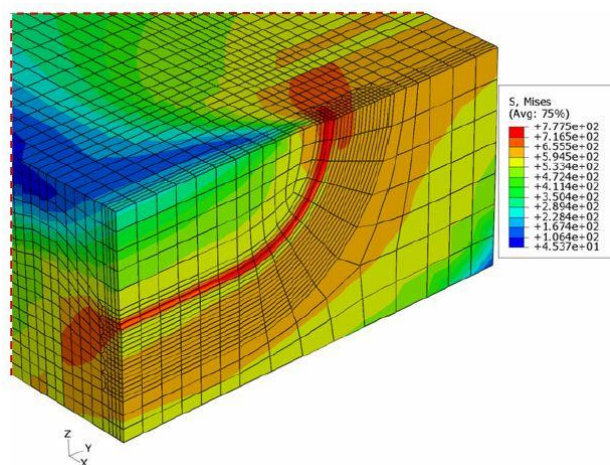


Slika 4.18 Geometrija zateznih ploča i mreža konačnih elemenata u okolini prsline [14].

Na slika 4.19 i 4.20 su prikazane raspodele udela zapremine praznina, odnosno Mizesovih napona oko prsline u zateznoj ploči. Kao i u slučaju epruveta za savijanje u tri tačke, određivanje ovih vrednosti vezano je za J-integral, koji je za dobijen za stacionarnu prslinu pod opterećenjem. Najveći priraštaj udela zapremine praznina je dobijen za epruvetu za savijanje u tri tačke od MŠ, dok je najmanji dobijen za slučaj zatezne ploče sa prslinom u sitnoznom ZUT-u (ovaj slučaj prsline će biti analiziran i prikazan u predmetnom doktoratu).



Slika 4.19. Raspodela udela zapremine praznina oko prsline u zateznoj ploči [14].

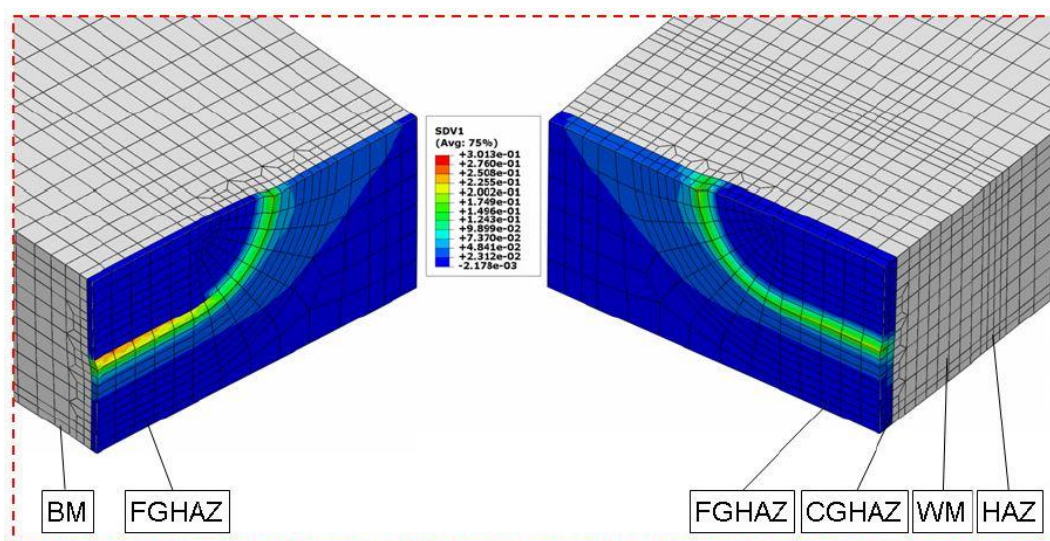


Slika 4.20. Raspodela napona oko prsline u zateznoj ploči [14].



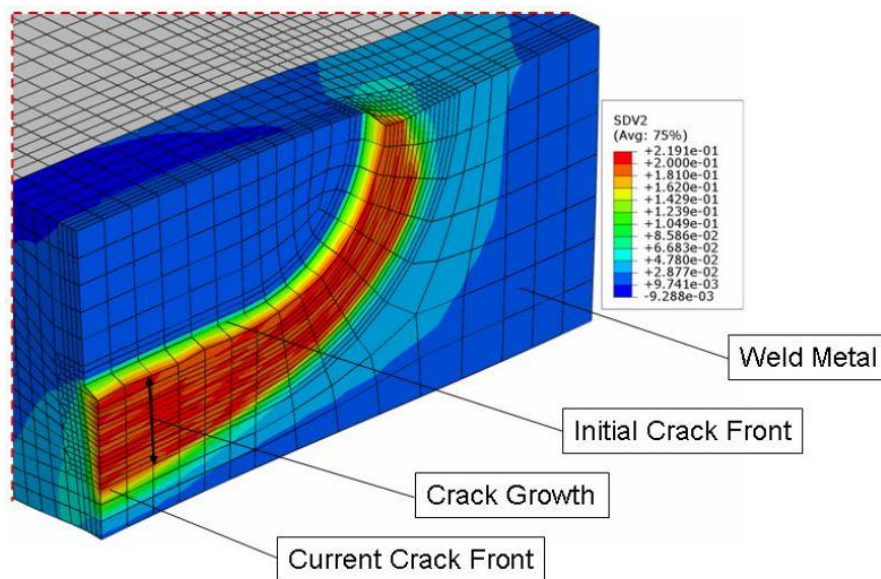
Na slici 4.21 je prikazano polje ekvivalentnih plastičnih deformacija pri početku rasta prsline za slučaj zatezne ploče sa prslinom u sintoznom ZUT-u. Najveće vrednosti plastične deformacije su očekivano dobijene u blizini vrha prsline. Na slici su takođe jasno prikazane različite oblasti zavarenog spoja, uključujući oba ZUT-a, metal šava i osnovni materijal.

Na slici 4.22 je prikazana raspodela udela zapremine praznina, pri čemu se mogu videti oštećeni elementi, označeni crvenom bojom, koji ujedno predstavljaju putanju rasta prsline. U ovom slučaju je prikazan model zatezne ploče sa površinskom prslinom u metalu šava.



Slika 4.21. Raspodela ekvivalentne plastične deformacije u zateznoj ploči sa prslinom u sintoznom ZUT-u [14].





Slika 4.22. Raspodela udela zapremine plina u zateznoj ploči sa prslinom u MŠ [14].

Rezultati prikazani na prethodnim slikama, kao i ostali rezultati dati u [14] su pokazali dobro slaganje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima u pogledu raspodele i vrednosti napona i deformacija, kao i predviđanja nastanka i daljeg rasta prsline, pri čemu je posebna pažnja posvećena pravilnom izboru veličine elemenata kako bi se obezbedila konvergencija rezultata, kao i definisanju graničnih uslova i njihovom uticaju na nastanak i rast prsline, u skladu sa realnim uslovima u kojima se prsline nalazi. U ovom slučaju je uzeto u obzir troosno naponsko stanje, koje ima značajan uticaj na ponašanje prsline i proces duktilnog loma, pri čemu je uticaj ovih uslova i opterećenja, uz geometriju prsline bio značajno veći od uticaja mehaničke heterogenosti, koja je neizbežna unutar zone uticaja toplote. Sa druge strane, heterogenost je uzeta u obzir pri definisanju veličine konačnog elementa, kako bi se srednja slobodna putanja između nemetalnih uključaka prikazala što vernije.

Za potrebe numeričke analize, zavarene ploče su podeljene u četiri oblasti:

- Osnovni materijal
- Metal šava
- Krupnozorni ZUT
- Sitnozorni ZUT

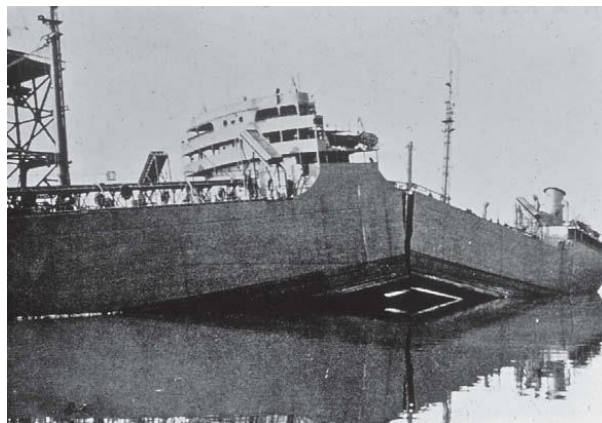
Mehaničke karakteristike (među kojima su od najveće važnosti bile vrednosti napona i deformacije) su određene za svaku od ovih oblasti, merenjem njihovih odgovarajućih vrednosti primenom metode korelacije digitalnih slika, uz pomoć ARAMIS softvera. Na ovaj način je omogućeno precizno određivanje pomeranja i deformacija u svakoj zasebnoj zoni, bez potrebe da se uzimaju epruvete iz odgovarajućih oblasti zone uticaja toplote, što predstavlja još jednu od mogućnosti.

Takođe je potrebno ponoviti da su za različite oblasti definisani različiti modeli ponašanja, u skladu sa položajem i očekivanim rastom prsline. Oblast u okolini prsline je modelirana primenom kompletnog Gursonovog modela, kako bi se što preciznije prikazalo njeno ponašanje.

## 3. Mehanika loma

### 3.1 Osnove

U ovom poglavlju je prikazana oblast kojom se ovaj rad bavi, mehanika loma, odnosno njena istorija, praktična primena i teorijske osnove. Mehanika loma predstavlja naučnu disciplinu koja se bavi proučavanjem ponašanja konstrukcija i elemenata u kojima su prisutne prslina, pri različitim uslovima opterećenja. U zavisnosti od vrste i intenziteta opterećenja, kao i od radnih uslova, prisustvo prslina u konstrukcijama može imati značajan negativan uticaj na njihovo ponašanje i u najekstremnijim slučajevima može dovesti do loma. Kada se uzme u obzir da pri izradi zavarenih čeličnih konstrukcija neizostavno dolazi do pojave prslina, usled prirode procesa zavarivanja, postaje jasno da je ova oblast od velike važnosti za konstrukcije ove vrste. Mehanika loma je počela da dobija na značaju nakon što su njenom primenom objašnjeni lomovi brodova tipa Liberty [1] i mlaznih aviona Comet [16], koji se mogu videti na slici 2.1.



<http://surf.to/comet>

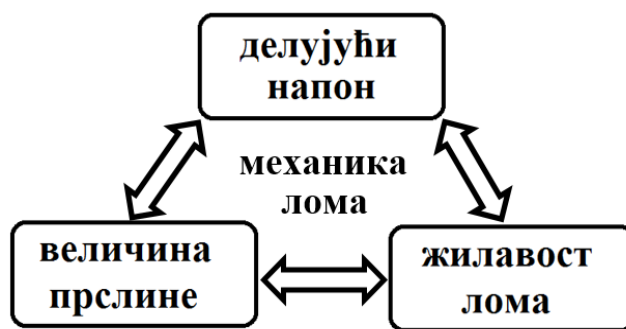
*Photo credit: Trevor Friend*



**Slika 2.1** Lomovi brodova tipa Liberty i aviona tipa Comet

Temelje mehanike loma su, početkom dvadesetog veka, postavili Inglis, svojim radovima vezanim za koncentraciju napona [17], kao i Griffith, koji se bavio brzinom oslobađanja energije [18]. Tokom pedesetih godina prošlog veka, Irwin je postavio temelje linearno-elastične mehanike loma. Tom prilikom je u ovu oblast uveden pojam faktora intenziteta napona, odnosno njegove kritične vrednosti [19]. Za potrebe analiziranja slučajeva u kojima je prisutna značajna plastična deformacija, razvijena je oblast elasto-plastične mehanike loma, sa odgovarajućim parametrima – otvaranjem vrha prsline (Crack tip opening displacement - CTOD) i  $J$ -integrala [20,21]. Dalji razvoj ove oblasti obuhvatio je njenu primenu na oblasti poput zamora, puzanja i korozije.

Parametri mehanike loma, kako linearno-elastični tako i elasto-plastični, predstavljaju opterećenje i geometriju konstrukcije (elementa), ali takođe predstavljaju i karakteristiku materijala, na osnovu koje se može proceniti otpornost materijala na rast prsline. Na osnovu ovih zaključaka je uspostavljen takozvani klasični trougao mehanike loma [1], prikazan na slici 2.2. Pored analiziranja lomova koji se se već desili, mehanika loma se pokazala kao pouzdan i praktičan alat za njihovo sprečavanje, čime je postavila temelje nove naučne discipline – integriteta konstrukcija [22].



**Slika 2.2.** Klasični trougao mehanike loma [22]

Gorepomenuti integritet konstrukcija predstavlja relativno novu naučnu oblast koja se pre svega bavi analizom stanja i dijagnostikom ponašanja konstrukcija, kao i procenom njihovog veka i pronalaženjem načina da se taj vek produži. U integritet konstrukcija spada i analiza mogućnosti revitalizacije konstrukcija, koja obuhvata uklanjanje prsline ili onemogućavanje njihovog daljeg napredovanja. Pored analiziranja konstrukcija u kojima su uočene greške tipa prsline (koje su najčešće odgovorne za otkaze konstrukcija [23,24]), ova

oblast obuhvata i analizu stanja u konstrukciji bez prsline, kako bi se utvrdio uticaj faktora intenziteta napona na njeno ponašanje. Analize vezane za integritet konstrukcija se mogu izvršiti na više različitih načina, koji obuhvataju eksperimentalne metode ispitivanja, metodu konačnih elemenata (MKE) [25], kao i primenu bezkontaktnog optičkog merenja (Digital Image Correlation – Korelacija Digitalnih Slika [26]). Ova disertacija se upravo bavi kombinovanom primenom prva dva od ova tri pristupa, sa ciljem njihovog međusobnog poređenja i utvrđivanja na koje načine se oni mogu unaprediti kako bi se dobili merodavni rezultati.

Ove metode su zasnovane na detaljnom i preciznom određivanju polja pomeranja, na osnovu koga se računaju deformacije i rezultujući naponi, na osnovu čije raspodele je moguće proceniti na kojim mestima u konstrukciji će se javiti njihove najveće vrednosti, odnosno koja mesta predstavljaju slabe tačke u kojima bi potencijalno moglo da dođe do loma. Ovaj pristup je naročito značajan za konstrukcije koje su izložene radnim uslovima povoljnim za nastanak i razvoj prsline, poput posuda pod pritiskom i konstrukcija izloženih dinamičkom opterećenju, kod kojih je prisutna i opasnost od zamora. Takođe treba uzeti u obzir i konstrukcije u kojima se javljaju puzanje, odnosno korozija. Treba napomenuti da primena ovih metoda takođe zahteva i određene aproksimacije vezane za opterećenje i geometriju konstrukcije, od kojih u velikoj meri zavisi tačnost dobijenih rezultata. U narednom delu teksta biće detaljno prikazane osnove linearno-elastične i elasto-plastične mehanike loma.

## **3.2 Linearno-elastična mehanika loma**

Linearno-elastična mehanika loma se bavi analizom ponašanja (rasta) prsline u materijalima u kojima su naponi u zoni linearno-elastične deformacije, odnosno materijalima kod kojih su plastične deformacije male (krti materijali). Osnovna pretpostavka linearno-elastične mehanike loma je da je plastična oblast u vrhu prsline lokalizovana tokom njenog rasta [1]. Kao što je prethodno rečeno, osnovni parametar linearno-elastične mehanike loma je faktor intenziteta napona (odnosno njegova kritična vrednost), koji će biti detaljno opisan u daljem tekstu.

### 3.2.1 Oblici rasta i otvaranja prsline

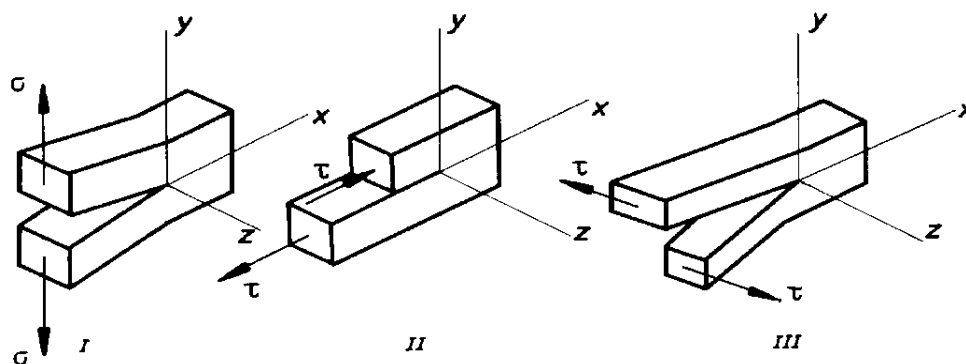
Kada je u pitanju rast prsline, postoje dva glavna oblika u skladu sa orijentacijom prsline u odnosu na pravac u kojem deluje opterećenje:

- Rast prsline po ravnoj površini – ravan lom
- Rast prsline po površini pod uglom – kosi lom.

U prvom slučaju (ravan lom), površina prsline je normalna na pravac dejstva opterećenja, dok je kod kosog loma površina prsline nagnuta pod uglom, i u tom slučaju su prisutne veće deformacije. Na ovim površinama prsline se mogu primetiti glatka područja koja odgovaraju zamornom lomu i rastu prsline, kao i zrnasta područja površine koja nastaju usled krtog loma. Veoma često se javlja i kombinacija ova dva slučaja, odnosno deo prelomne površine odgovara zamornom lomu, dok ostatak ima izgled krtog loma, usled gubitka nosivosti poprečnog preseka nakon njegovog dovoljnog smanjenja.

Lomovi se, pored površine prsline, mogu razlikovati i po načinu na koji se prsline otvara, pri čemu imamo tri osnovna oblika, prikazana na slici 2.3:

- oblik I – cepanje: simetrično otvaranje površine prsline usled delovanja zateznih napona.
- oblik II – klizanje površina prsline u istoj ravni usled delovanja smičućih napona u pravcu prsline.
- oblik III – smicanje površina prsline u različitim ravnima usled delovanja smičućih napona u pravcu normalnom na pravac prsline.



Slika 2.3. Oblici otvaranja prsline [1]

Od tri prikazana načina otvaranja prsline, najopasniji je oblik I, tj. lomovi koji nastaju cepanjem, u slučaju kada opterećenje deluje kao zatezno. Ovakav tip loma je naročito čest

kod zavarenih čeličnih konstrukcija, koje su u velikom broju slučajeva izložene upravo ovakvoj vrsti opterećenja. Kod posuda pod pritiskom, oblik I je jedini mogući slučaju loma, usled načina na koji deluje opterećenje.

### 3.2.2 Energija deformacije

Energija deformacije predstavlja energiju koja se utroši na stvaranje nove površine prsline na nekom objektu tokom dejstva opterećenja, i data je sledećom formulom:

$$dE^{prslina} = G_C \cdot dA \quad (2.1)$$

gde  $G_C$  predstavlja kritičnu promenu energije, odnosno vrednost promene energije koja je neophodna za stvaranje nove površine (rast) prsline, dok ja  $dA$  novostvorena površina prsline za dvodimenzionalnu površinu i definisana je sledećim izrazom:

$$dA = B \cdot da \quad (2.2)$$

gde je  $B$  debljina objekta, a  $da$  dužina prsline.

Promena energije stvaranja nove površine prsline  $dA$ , neophodna za napredovanje prsline mora biti veća ili jednaka kritičnoj vrednosti promene energije:

$$G = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} \geq G_C \quad (2.3)$$

gde je  $\Pi$  ukupna energija sistema. Prethodni izraz predstavlja jednačinu održanja energije sistema koja se može napisati i u sledećem obliku:

$$d\Pi + dE^{prslina} = 0 \quad (2.4)$$

Promena ukupne energije sistema,  $d\Pi$  je definisana kao:

$$d\Pi = dU + dK + dW \quad (2.5)$$

Pri čemu su:

$dE^{prslina}$  – energija stvaranja nove površine prsline,

$dU$  – energija elastične deformacije,

$dK$  – kinetička energija sistema i

$dW$  – rad spoljašnjih sila.

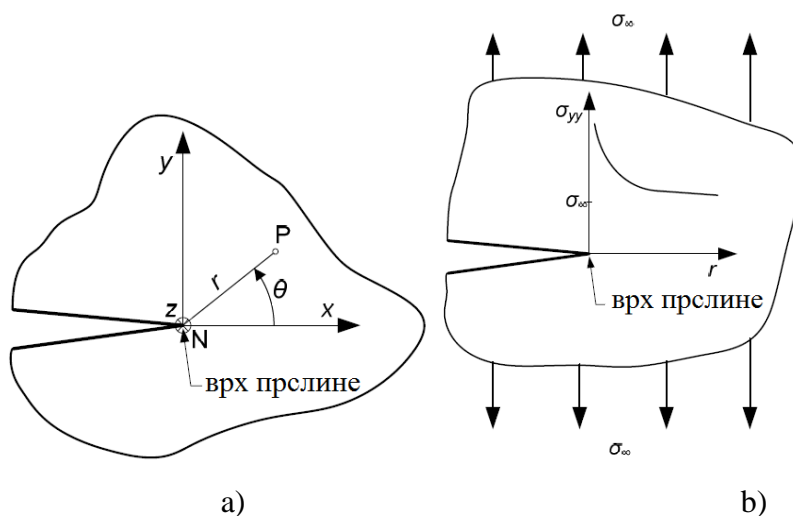
U slučaju da je deformacija konstantna, rad spoljašnjih sila je jednak nuli, na osnovu izraza (2.4) i (2.5) može se zaključiti da važi sledeće:

$$d\Pi + dE^{prslina} = dU + dK + dW \quad (2.6)$$

Rast prsline potroši svu raspoloživu energiju sistema, nakon čega prestaje, ili dolazi do loma posmatranog objekta [13].

### 3.2.3 Faktor intenziteta napona

U slučaju linearno-elastične mehanike loma, vrednosti napona i deformacije u nekoj tački u okolini vrha prsline teže beskonačnosti kada ta tačka teži vrhu prsline (tačke P i N na slici 2.4).



**Slika 2.4.** a) Raspodela napona oko vrha prsline za linearno-elastičnu deformaciju, b) polarni koordinatni sistem vrha prsline [1]

Naponi u blizini vrha prsline se mogu prikazati sledećim izrazom [1,14]:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum \left\{ \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \right\} \quad (2.7)$$

gde  $\sigma_{ij}$  predstavlja komponente tenzora napona,  $K$  je faktor intenziteta napona,  $f_{ij}$  je funkcija koja zavisi od ugla  $\theta$  i  $r$  je rastojanje posmatrane tačke od vrha prsline. Iz gornjeg izraza se može videti da u slučaju kad  $r$  teži nuli, naponi teže beskonačnosti. Ovi naponi pri tome



predstavljaju linearnu kombinaciju tri rešenja koja odgovaraju svakom od tri prethodno prikazana oblika otvaranja prsline:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{I,ij}(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{II,ij}(\theta) + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{III,ij}(\theta) \quad (2.8)$$

$K_I$ ,  $K_{II}$  i  $K_{III}$  predstavljaju vrednosti faktora intenziteta napona koje odgovaraju prvom, drugom i trećem obliku otvaranja, respektivno, pri čemu treba napomenuti da se u većini praktičnih slučajeva vrednosti za drugi i treći oblik zanemaruju, s obzirom da su mnogo manje od faktora intenziteta napona za prvi oblik otvaranja. Ovo je naročito izraženo kod posuda pod pritiskom, s obzirom da pri opterećenjima koja se u njima javljaju ne može doći do loma drugog ili trećeg oblika. Kao što je prethodno pomenuto, postoji singularitet napona koji zavisi od vrednosti  $1/\sqrt{r}$ :

$$r \rightarrow 0 \Rightarrow \sigma(r, \theta) \rightarrow \infty \quad (2.9)$$

Sam pojam faktora intenziteta napona je uveo Irwin, tokom proučavanja problema otvaranja prsline cepanjem, za potrebe određivanja opterećenja u vrhu prsline. U slučaju ovog oblika otvaranja prsline koja se nalazi u sredini ploče beskonačne dužine, naponi u  $x$  i  $y$  pravcima se mogu izraziti sledećim formulama:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.12)$$

$$\tau_{yz} + \tau_{xz} \quad (2.13)$$

U slučaju ravnog stanja napona (kod elemenata čija je jedna dimenzija značajno manja u odnosu na druge dve) važi:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.14)$$

dok za ravno stanje deformacija (kod elemenata konstantne debljine) važi:

$$\sigma_z = 0 \quad (2.15)$$

Faktor intenziteta je definisan sledećim empirijski određenim izrazom:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.16)$$

gde  $a$  predstavlja dužinu prsline, na osnovu čega se može zaključiti da faktor intenziteta napona zavisi i od geometrije.

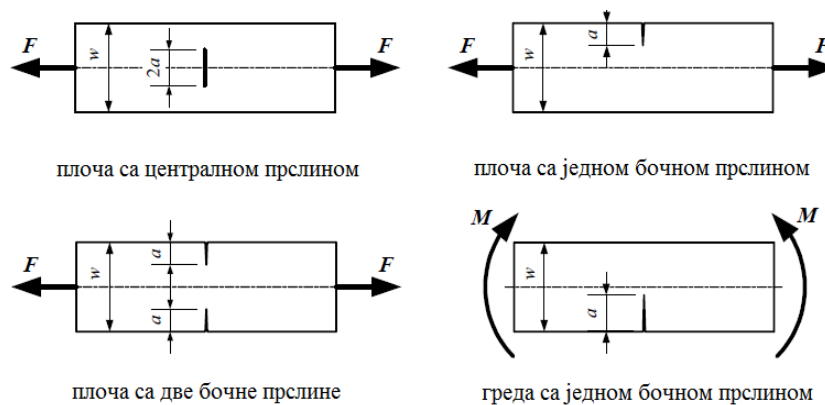
### 3.2.4 Faktori intenziteta napona za određene konfiguracije

Vrednost faktora intenziteta napona se određuje u zavisnosti od geometrije i opterećenja, najčešće primenom sledećeg izraza (koji se koristi kod konstrukcijskih elemenata jednostavne geometrije) [27]:

$$K_I = \beta\sigma\sqrt{\pi a} = Y\left(\frac{a}{W}\right)\sigma\sqrt{a} \quad (2.17)$$

gde  $Y\left(\frac{a}{W}\right)$  predstavlja funkciju koja zavisi od geometrije i vrste opterećenja. Na slici 2.5 su prikazani različiti slučajevi, u zavisnosti od položaja prsline u ploči, kao i uslova opterećenja [27]. U slučaju složenijih geometrija, analitičko određivanje faktora intenziteta napona je nepraktično ili nemoguće, pa se u tu svrhu koriste eksperimentalne ili numeričke metode (poput metode konanih elemenata i korelacije digitalnih slika).

Analitičko određivanje faktora intenziteta napona kod složenih geometrija i opterećenja često nije moguće, pa sa za njihovo određivanje koriste numeričke ili eksperimentalne metode kao što je optička beskontaktna metoda.



Slika 2.5 Jednostavne geometrijske konfiguracije sa različitim položajima prsline [28]

U slučajevima kad je konstrukcija (ili njen element) u kojoj se nalazi prsline izložena kombinovanom opterećenju, ukupni faktor intenziteta napona se može odrediti primenom principa superpozicije, odnosno kao suma faktora intenziteta napona za pojedinačne slučajeve opterećenja od kojih se kombinovano opterećenje sastoji. U takvim slučajevima se koriste posebno izvedeni izrazi koji se mogu naći i okviru [27].

### 3.2.5 Veza promena energije deformacije – faktor intenziteta napona

U slučaju linearno-elastičnog tela sa prslinom, moguće je izračunati promenu energije deformisanja preko faktora intenziteta napona prema sledećoj formuli [1]

$$G = \frac{1}{E^*} \left( K_I^2 + K_{II}^2 \right) + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2 \quad (2.18)$$

gde  $\mu$  predstavlja Lamé-ovu konstantu, tj. modul smicanja [16].

Kod ravnog stanja napona, važi  $E^* = E$ , stoga jednačina (2.18) postaje:

$$G = \frac{1}{E} \left( K_I^2 + K_{II}^2 \right) \quad (2.19)$$

Za ravno stanje deformacija važe sledeći izrazi [1]:

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (2.20)$$

Jednačina (2.18) u ovom slučaju ima sledeći oblik:

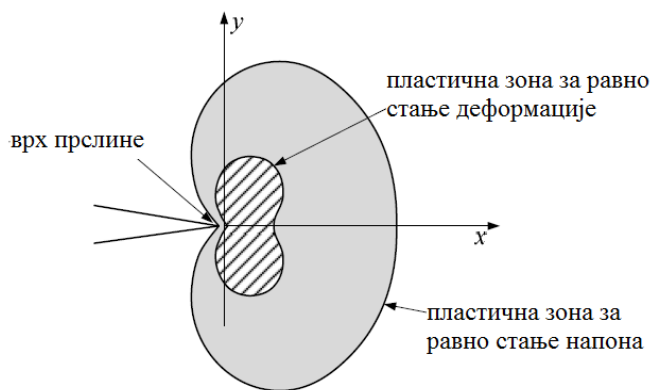
$$G = \frac{\left(1-\nu^2\right) K_I^2 + \left(1-\nu^2\right) K_{II}^2 + (1+\nu) K_{III}^2}{E} \quad (2.21)$$

### 3.3 Plastična zona oko vrha prsline

U mnogim slučajevima konstrukcija ili elemenata sa prslinom, veličin plastične zone oko vrha prsline se ne može zanemariti, odnosno moraju se uzeti u obzir i uticaj plastične deformacije na lom. Ovo važi kako za žilav, tako i za krt lom. Na slici ispod su prikazani oblici plastičnih zona za ravno stanje napona, odnosno ravno stanje deformacija. Kako bi se odredio uticaj plastične zone, odnosno njena veličina i oblik, potrebno je uvesti kriterijum

tečenja u jednačine (2.10) do (2.16). Jedan od najpoznatijih i najčešće primenjivanih kriterijuma je Misses-ov kriterijum tečenja [28], koji se može predstaviti u sledećem obliku:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_{ekv}^2 = 2\sigma_T^2 \quad (2.22)$$



**Slika 2.6** Oblik plastične zone oko vrha prsline za RSN i RSD prema teoriji von Misses-a [29]

Stvarnu raspodelu napona i deformacije unutar plastične zone je teško precizno definisati, međutim u slučaju problema linearno-elastične mehanike lome, za tim nema potrebe. Stoga se u praksi koriste pojednostavljeni modeli, od kojih su najpoznatiji i najčešće primenjivani Irwin-ov i Dugdale-ov model.

Kod Irwin-ovog modela, pretpostavlja se da plastična zona ima kružni oblik, uz ravno stanje napona. Poluprečnik ove kružne zone, koji predstavlja veličinu promene plastične deformacije, dat je sledećim izrazom [19]:

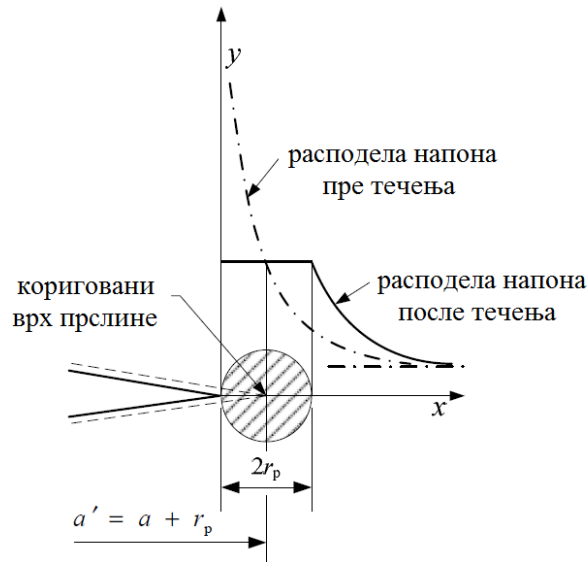
$$r_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.23)$$

U slučaju ravnog stanja deformacija, vrednost promene plastične deformacije je tri puta manja:

$$r_p = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.24)$$

Prema Irwin-u, plastična zona u vrhu prsline se može posmatrati kao produženje stvarne prsline, dužine  $a$  (slika 2.7). Na osnovu toga, uveden je pojam teorijska prslina, čija dužina je jednaka zbiru dužine prsline i poluprečnika plastične zone [19]:

$$a' = a + r_p \quad (2.25)$$

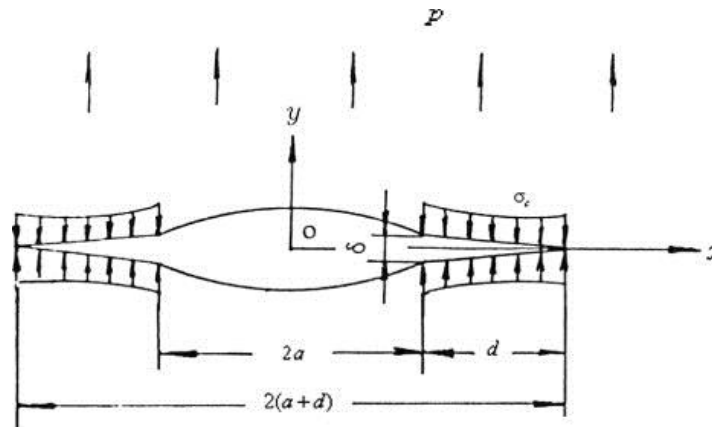


**Slika 2.7** Irwin-ova korekcija dužine prsline [19]

Primenljivost linearno-elastične mehanike loma zavisi od veličine plastične zone. Usvojeno je da se faktor intenziteta napona, kao parametar linearno-elastične mehanike loma, može koristiti u slučaju da je  $r_p \geq \frac{a}{8}$  za statičko opterećenje, dok je u slučaju dinamičkog opterećenja kriterijum  $r_p \geq \frac{a}{4}$ .

Dugdale-ov model uzima u obzir plastičnu zonu u vrhu prsline u slučaju tanke ploče, koji odgovara ravnom stanju napona. Osnovna pretpostavka je da se tečenje odvija u oblasti duž linije prsline zanemarljive visine [30]. Ova trakasta oblast tečenja se može posmatrati kao produžetak prsline (slika 2.8). Kod ovog modela, poluprečnik plastične zone se određuje prema sledećem izrazu:

$$r_p \approx \frac{\pi}{8} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.26)$$



Slika 2.8 Dugdale-ov model plastične zone

### 3.4 Kritični faktor intenziteta napona

Vrednost faktora intenziteta napona pri kojoj dolazi do nestabilnog rasta prsline pri konstantnom opterećenju se naziva kritična vrednost faktora intenziteta napona i data je sledećom formulom:

$$K_C = Y \left( \frac{a_c}{W} \right) \sigma_c \sqrt{a_c} \quad (2.27)$$

gde su:

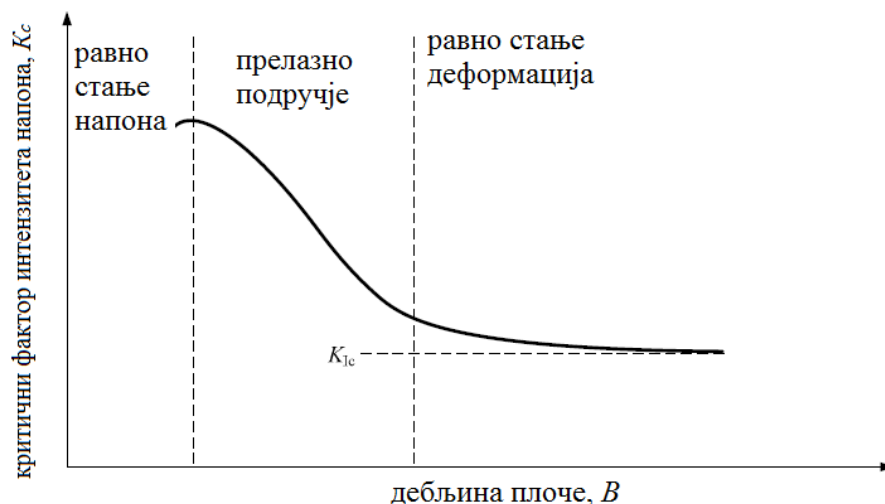
$K_C$  - kritični faktor intenziteta napona,

$\sigma_c$  - nominalni napon pri nestabilnom rastu prsline,

$a_c$  - kritična dužina prsline za nominalnu vrednost napona  $\sigma_c$ .

Kritični faktor intenziteta napona zavisi od materijala, opterećenja i debljine ploče, kao i u, manjoj meri, dužine prsline. Vrednost kritičnog faktora intenziteta napona se menja sa debljinom ploče, do određene debljine pri kojoj postaje konstantna (slika 2.9). Do ove pojave dolazi u trenutku kada ravno stanje napona u vrhu prsline prelazi u ravno stanje deformacije, pri dovoljno velikoj debljini ploče. Ova vrednost predstavlja minimalnu vrednost kritičnog faktora intenziteta napona, koja se naziva žilavost loma i obeležava se sa  $K_{Ic}$ .

Žilavost loma predstavlja veoma bitnu mehaničku osobinu materijala, s obzirom da definiše njegovu otpornost prema nestabilnom rastu prsline (tj. lomu). Ovaj parametar se najčešće ispituje uobičajenim metodama, uz primenu postupaka i epruveta definisanih u skladu sa standardim [31]. Ovakva ispitivanje kao rezultat daju krivu otpora (*R*-kriva), na kojoj se beleži parametar *K* u zavisnosti od otvaranja prsline.

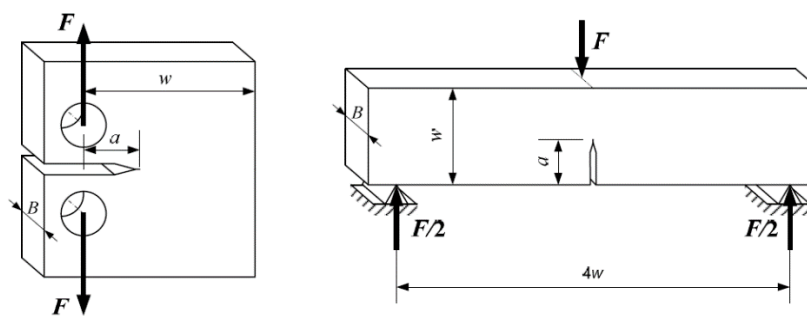


**Slika 2.9** Zavisnost kritičnog faktora intenziteta od debljine ploče

Dimenzije epruveta koje se koriste za određivanje vrednosti  $K_{Ic}$  moraju da zadovolje sledeći kriterijum, u skladu sa ASTM standardom [31].

$$a, B, (w - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.28)$$

gde  $a$ ,  $B$  i  $w$  predstavljaju dužinu prsline, debljinu epruvete i visinu, respektivno (slika 2.10). Na ovoj slici su prikazani i neki od oblika epruveta koje se koriste za ovakva ispitivanja, takozvanih CT (compact tension) epruveta (levo), odnosno epruvete sa zarezom (SENB – single edge notch bend).



**Slika 2.10** Primeri CT epruvete (levo) i SENB epruvete (desno) [18]

Na osnovu ispitivanja su izvedeni empirijski izrazi koji daju vezu između kritičnog faktora intenziteta napona  $K_c$  i žilavosti loma  $K_{Ic}$  i debljine ploče  $B$ . U ovu svrhu se najčešće koriste sledeći izrazi [31,32]:

$$\text{Irwin-ov izraz: } K_c = K_{Ic} \left[ 1 + \frac{1.4}{B} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \right)^2 \right] \quad (2.29)$$

$$K_c = K_{Ic} \sqrt{1 + \frac{1.4}{B^2} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \right)^4} \quad (2.30)$$

U praksi, najčešće se eksperimentalno određuje parametar  $K_{Ic}$ , žilavost loma.

### 3.5 Elasto-plastična mehanika loma

Kao što je prethodno pomenuto, u slučaju duktilnog loma u zoni oko vrha prsline se javljaju značajne plastične deformacije, što dovodi do pojave plastične zone čija veličina se ne može zanemariti. U ovom slučaju, polja napona i deformacija se ne mogu više definisati jednoznačnim parametrom, kao u slučaju faktora intenziteta napona (kod linearno-elastične deformacije), već je neophodno uvesti parametre kojima se može opisati ovakvo ponašanje, tj. parametre koji nisu ograničeni linearno-elastičnim ponašanjem. U tu svrhu su uvedeni parametri otvaranja vrha prsline (Crack tip opening displacement – CTOD) i  $J$ -integral, i oni će biti detaljno opisani u narednom delu ovog poglavlja.



### 3.5.1 Otvaranje vrha prsline – CTOD

Otvaranje vrha prsline, CTOD, predstavlja parametar koji je empirijski određen, ali i dalje ima značajnu praktičnu primenu, s obzirom da se lako određuje čak i u slučaju komplikovanijih problema i, što je najvažnije, daje dobre rezultate. Stoga se ovaj parametar često koristi kao mera žilavosti materijala.

Još jedna od prednosti otvaranja vrha prsline je mogućnost uspostavljanja veze između ovog parametra i faktora intenziteta napona, u oblasti srazmerno malog tečenja. Irwin je, tokom analiziranja prsline sa malom plastičnom zonom ispred vrha prsline, pretpostavio da se takva prsline ponaša isto kao i prsline sa oštrim vrhom, sa malo većom (korigovanom) dužinom. Kada se ova povećana dužina prsline usvoji kao merodavna vrednost za ravno stanje napona, dobija se sledeći izraz:

$$\delta_t = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_T E} \quad (2.31)$$

gde  $\delta_t$  predstavlja otvaranje vrha prsline. Treba napomenuti da je ovaj Irwin-ov model u prevelikoj meri uprošćen, i da model trake popuštanja koji je predložio Dugdale daje merodavnije (realnije) rezultate. U ovom slučaju, uticaj plastične zone ne uzima u obzir samo povećanje dužine prsline, već i delovanje pritisnih napona čije su vrednosti na nivou granice tečenja. Na osnovu ovog modela se dobija sledeći izraz:

$$\delta_t = \frac{8\sigma_T a}{\pi E} \ln \sec\left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_T}\right) = \frac{K_I^2}{\sigma_T E} \left[ 1 + \frac{1}{6} \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_T}\right)^2 + \dots \right] \quad (2.32)$$

pri čemu je funkcija  $\ln \sec$  razvijena u red. Ukoliko se zanemari svi članovi reda osim prvog, dolazimo do sledećeg izraza:

$$\delta_t = \frac{K_I^2}{\sigma_T E} = \frac{G}{\sigma_T} \quad (2.33)$$

S obzirom da su osnovne pretpostavke Dugdale-ovog modela ravno stanje napona i idealno plastični materijal, za drugačije uslove je neophodno uneti određene izmene u prethodnu jednačinu, čime se dobija sledeći izraz:

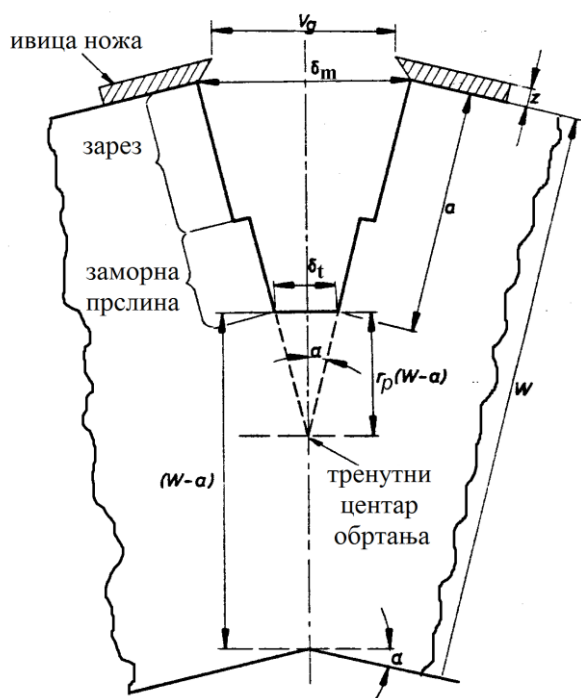
$$\delta_t = \frac{K_I^2}{m\sigma_T E} = \frac{G}{m\sigma_T} \quad (2.34)$$

gde je  $m$  bezdimenzionalna konstanta, čija vrednost je 1 za uslove RSN i idealno plastični material, dok je u slučaju RSD i materijala koji ojačava ova vrednosti između 1 i 2.6. Na slici 2.11 ispod je prikazana uobičajena definicija otvaranja vrha prsline. U praksi se često koristi i Schwalbe-ova definicija  $\delta_5$  [33], odnosno direktno određivanje CTOD.



**Slika 2.11** Definicija otvaranja vrha prsline (CTOD): rastojanje lica prsline na mestu vrha (levo), presek sa otvorom od 90° [6]

Standardno merenje otvaranja vrha prsline je zasnovano na pretpostavci o fiksnom centru obrtanju, na osnovu čega se CTOD može odrediti preko izmerene vrednosti otvaranja noževa,  $v_g$  (slika 2.12).



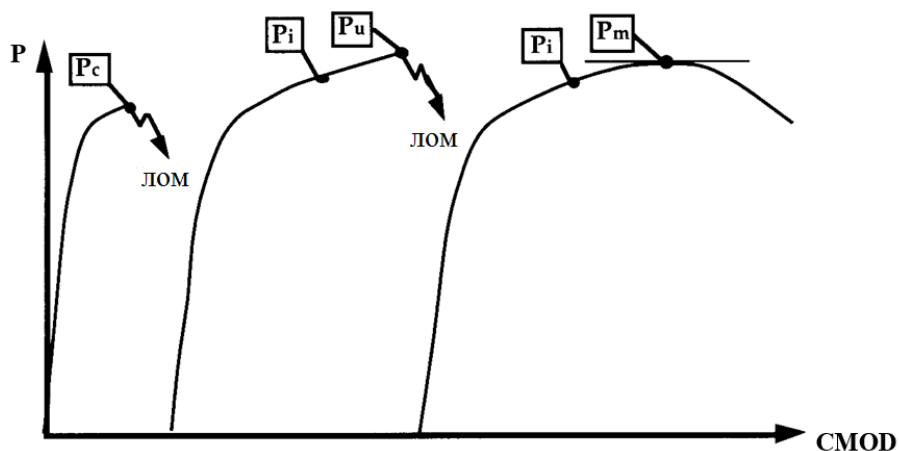
- $W$  - širina prsline
- $a$  - dužina prsline
- $\alpha$  - ugao savijanja
- $z$  - debljina noževa
- $r_p$  - radijus centra obrtanja
- $v_g$  - otvaranje noževa
- $\delta_m$  - otvaranje usta prsline
- $\delta_t$  - otvaranje vrha prsline

$$\delta_t = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_T E} + \frac{r_p(W-a_0)v_g}{[r_p(W-a_0)+a_0+z]} \quad (2.35)$$

Gornji izraz važi za debljine epruvete do 50 mm.

**Slika 2.12** Određivanje CTOD pri ispitivanju na savijanje sa odgovarajućim dimenzijama [20]

U slučaju elasto-plastičnog ponašanja materijala, dostizanju kritične vrednosti odgovora-rajućih parametara može da prethodi stabilni rast prsline, tako je lom u ovom slučaju žilav (duktilan). Na slici 2.13 su prikazane karakteristične zavisnosti sile od otvaranja usta prsline (CMOD – Crack mouth opening displacement).



**Slika 2.13** Karakteristični dijagrami sile - CMOD [6]

Indeks *c* na dijagramu prikazanom gore označava nestabilni rast prsline, pri čemu je  $\Delta a$  manje od 0.2 mm, dok se indeks *u* odnosi na nestabilni rast pri vrednostima većim od 0.2 mm. Sa druge strane, indeks *m* označava da je maksimalna sila prvi put dostignuta u plastičnoj oblasti, dok se indeks *i* odnosi na inicijaciju stabilnog rasta prsline, za koji je već rečeno da prethodi žilavom lomu. Na osnovu svega dosad pomenutog, moguće je analizirati stabilni rast prsline, uvođenjem krive otpornosti materijala na rast prsline, kojom je data zavisnost otvaranja vrha prsline (CTOD) od priraštaja dužine prsline  $\Delta a$ .

### 3.5.2 *J* – integral

Leta gospodnjeg 1968-og, James Rice je predložio primenu integrala nezavisnog od konture oko vrha prsline kao parametra elasto-plastične mehanike loma, u cilju karakterizacije rasta prsline. Ovaj parametar je nazvan *J*-integral. Njegova primena u mehanici loma je zasnovana na tri karakteristike [21]:

10. Nezavisnost of putanje integracije, što za rezultat ima jednostavno numeričko, eksperimentalno i analitičko određivanje.

11. Mogućnost opisa polja napona i deformacija oko vrha prsline pri elasto-plastičnom ponašanju.

12. Mogućnost identifikacije sa brzinom oslobađanja energije, čime je definisan kao energetska parametar.

U slučaju ravanskog nelinearnog elastičnog tela od homogenog izotropnog materijala,  $J$ -integral duž zatvorene konture ima vrednost 0. Ako se takvo telo prikaže u Dekartovom koordinatnom sistemu (sa koordinatama  $x_1$  i  $x_2$ ), tada se  $J$ -integral po proizvoljnoj konturi  $\Gamma$  unutar tela  $A$  (slika 2.14) može izraziti sledećom formulom [21,34]:

$$J_{\Gamma} = \oint_{\Gamma} \left( u_0 n_1 - T \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) ds \quad (2.36)$$

Pri čemu su:

$u_0$  - gustina potencijalne energije deformisanja,

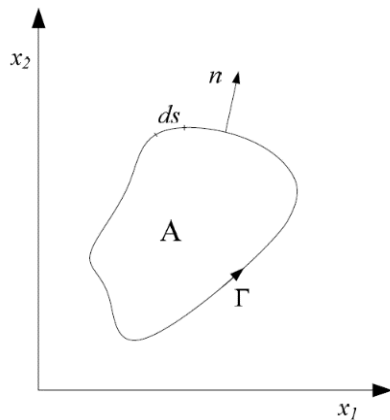
$n$  - vektor normale na konturi  $\Gamma$ ,

$u$  - vektor pomeranja definisan kao:

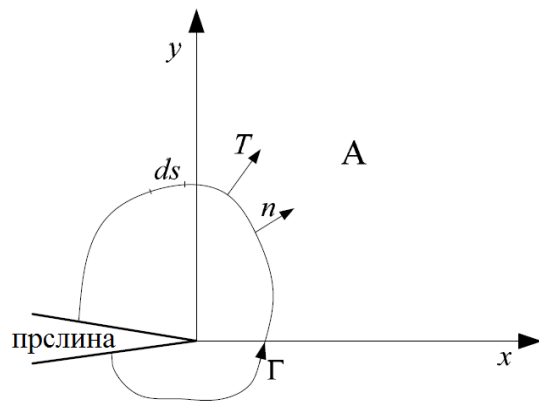
$$u = u_1 i + u_2 j \quad (2.37)$$

$T$  - vektor napona definisan u odnosu na normalu  $n$  i vektor pomeranja

$ds$  – priraštaj puta po konturi  $\Gamma$ .



Slika 2.14 Zatvorena kontura



Slika 2.15 Kontura  $\Gamma$  za određivanje  $J$ -integrala – vrh prsline

Do konačnog izraza za  $J$ -integral se može doći definisanjem njegovih parametara, primenom Green-ove teoreme [35], uz pretpostavke da su deformacije male i unutrašnje sile zanemarljive. Uz definisanje konture oko vrha prsline  $\Gamma$  oko vrha prsline (slika 2.15), dobijamo:

$$J_{\Gamma} = \left[ \int_{\Gamma} u_0 dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right] \quad (2.38)$$

Treba napomenuti da u ovom slučaju kontura počinje na donjoj površini prsline, obilazi njen vrh i završava se na gornjoj površini, kao što se vidi na slici 2.15.

### 3.5.3 Veza $J$ -integrala i faktora intenziteta napona $K$

U slučaju linearno-elastičnog ponašanja materijala, vrednost  $J$ -integrala je jednaka promeni energije deformisanja  $G$ , te se stoga može povezati sa faktorom intenziteta napona preko te veličine. Na osnovu toga, mogu se napisati sledeći izrazi za ravno stanje napona, odnosno ravno stanje deformacija:

$$J = G = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) \quad (2.39)$$

$$J = G = \frac{(1-\nu^2)K_I^2 + (1-\nu^2)K_{II}^2 + (1+\nu)K_{III}^2}{E} \quad (2.40)$$

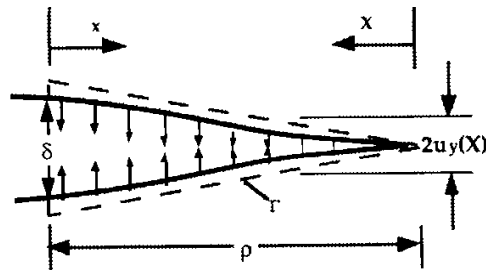
### 3.5.4 Veza $J$ -integrala i $CTOD$

Ako se za konturu izabere sam vrh prsline, pri čemu se početak koordinatnog sistema postavi u vrh zone trake popuštanja (slika 2.16), uz odgovarajuću pretpostavku da je napon  $\sigma = \sigma_T$ , dolazimo do sledeće jednačine [20], koja važi za uslove ravnog stanja napona i idealne plastičnosti:

$$J = \sigma_T \delta_t \quad (2.41)$$

U slučaju uslova ravnog stanja deformacija i ojačanja, neophodno je korigovati izraz (2.43), uvođenjem koeficijenta  $m$ , koji zavisi od naponskog stanja i ojačanja materijala u plastičnoj zoni:

$$J = m\sigma_T\delta_t \quad (2.42)$$



Slika 2.16 Kontura integracije oko vrha prsline

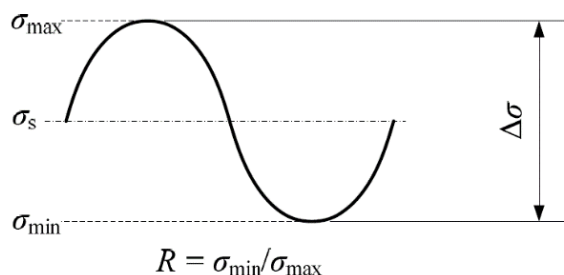
## 3.6 Zamor

Prethodno izložene osnove mehanike loma su vezane za kvazi-statičko opterećenje, odnosno opterećenje koje je konstantno. S obzirom da se u praksi često javlja i dinamičko opterećenje (naročito kod mašinskih konstrukcija), potrebno je ovaj pristup proširiti i na takve slučajeve. Za razliku od statičkog, dinamičko opterećenje menja intenzitet tokom vremena, što dovodi do značajno drugačijeg ponašanja konstrukcije u takvim uslovima. Ukoliko je u konstrukciji prisutna i prslina, problematika se dodatno komplikuje. Za rast zamorne prsline od velikog značaja su i pojmovi energije nastanka i energije rasta prsline, na osnovu kojih se može zaključiti da li je u pitanju krt ili duktilan materijal.

Fenomen zamora materijala je detaljno izučavan tokom istorije, što je dovelo do pojave brojnih teorija vezanih za ocenu integriteta konstrukcija zasnovanu na zamoru, poput  $\sigma - N$  i  $\varepsilon - N$  metoda, kao i  $\frac{da}{dN} = \Delta K$ , takozvane metode rasta prsline zamorom, koja će biti detaljnije objašnjena u daljem tekstu. Ova metoda zasnovana je na dobro poznatom Paris-ovom zakonu.

### 3.6.1 Ciklično promenljivo opterećenje

Konstrukcije su u praksi često izložene dinamičkim opterećenjima koja mogu biti jednostavna (ponavljaju se u određenim vremenskim intervalima) ili nasumična. Bez obzira na njihovu prirodu, dinamička opterećenja se uvek mogu razložiti na određene cikluse koji se ponavljaju. Osnovne veličine vezane za ciklično opterećenje su prikazane na slici 3.1, za najjednostavniji slučaj dinamičkog opterećenja (konstantna amplituda).



**Slika 2.17** Karakteristične veličine dinamičkog ciklusa opterećenja

Pri čemu  $\sigma_{\min}$  i  $\sigma_{\max}$  predstavljaju minimalni i maksimalni napon, dok je  $\sigma_s$  njihova srednja vrednot, a  $\Delta\sigma$  raspon napona. Veličina  $R$ , koja predstavlja odnos minimalnog i maksimalnog napona, se naziva faktor asimetrije ciklusa [36].

### 3.6.2 Rast prsline usled zamora

Kada se razmatra sigurnost konstrukcija, od ključne važnosti je da se proračuna i sigurnost konstrukcija u kojima su prisutne greške ili oštećenja. Stoga, u slučaju zamora se uvek pretpostavlja da je u konstrukciji prisutna inicijalna prsline, i da do loma, odnosno otkaza konstrukcije dolazi usled njegovog rasta. Za potrebe ovakvih proračuna, neophodno je odrediti brzinu rasta prsline,  $\frac{da}{dN}$ . U tu svrhu, potrebno je odrediti vezu brzine rasta prsline sa rasponom faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , koji predstavlja razliku između maksimalne i minimalne vrednosti faktora intenziteta napona.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2.43)$$

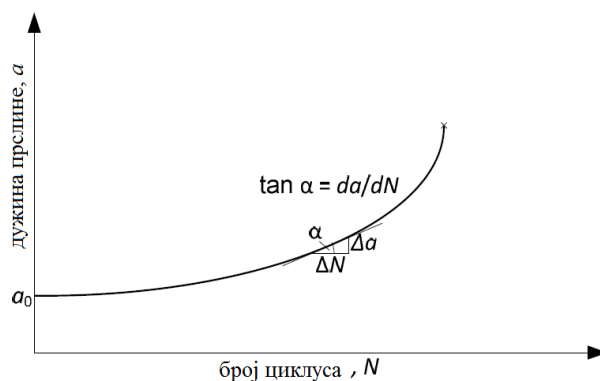
što u kombinaciji sa jednačinom (2.17) daje sledeći izraz:

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot Y \left( \frac{a}{W} \right) \sqrt{a} \quad (2.44)$$

Kao što se može videti, brzina rasta prsline predstavlja promenu njene dužine u zavisnosti od broja ciklusa, što je prikazano na slici 3.2, gde ova veličine odgovara nagibu krive. Iz toga se može zaključiti da se brzina rasta prsline može jednostavno odrediti na osnovu eksperimentalnih podataka o porastu dužine prsline i odgovarajućeg broja ciklusa.

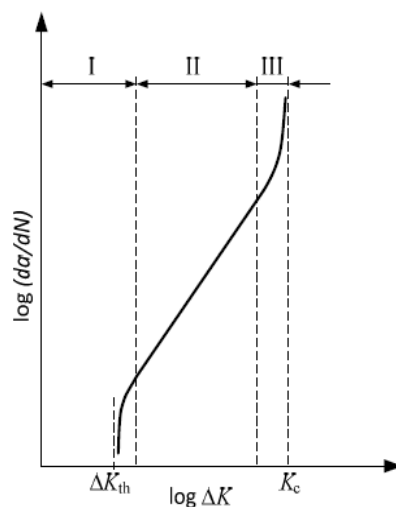
Postoje brojni model za povezivanje brzine rasta prsline sa rasponom faktora intenziteta napona, koji su dati u sledećem obliku, uzimajući u obzir zavisnost  $\Delta K$  od raspona napona, dužine prsline i geometrije ( $Y\left(\frac{a}{W}\right)$ ):

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) = f\left(\Delta\sigma, Y\left(\frac{a}{w}\right), \sqrt{a}\right) \quad (2.45)$$



**Slika 2.18** Zavisnost dužine prsline od broja ciklusa promene opterećenja [18]

Zavisnost brzine rasta prsline of raspona faktora intenziteta napona se može prikazati iu logaritamskoj razmeri, kao što se može videti na slici 3.3, pri čemu na ovakvom dijagramu možemo razlikovati tri glavno područja, u zavisnosti ponašanja krive:



**Slika 2.18** Dijagram brzina rasta prsline – raspon faktora intenziteta napona (oblik krive dinamičkog rasta prsline) u logaritamskoj razmeri [8]



Područje I – Prslina raste sporo, pri čemu se na njegovoj donjoj granici rast potpuno zaustavlja. U ovom području kriva asimptotski teži minimalnom rasponu intenziteta napona  $\Delta K_{th}$ .

Područje II – karakteriše ga stabilni rast prsline, a naziva se još i Parisovo područje, budući da je Paris definisao model kojim se opisuje ponašanje prsline izložene dinamičkom opterećenju.

Područje III – nestabilni rast prsline pri čemu kriva dinamičkog rasta teži kritičnoj vrednosti faktora intenziteta napona.

U praksi je usvojeno da rast prsline prestaje prvi vrednosti  $\frac{da}{dN} = 4 \cdot 10^{-10}$  m/ciklusu.

Pri određenoj vrednosti raspona faktora intenziteta napona, brzina rasta prsline počinje naglo da opada, što dovodi do prestanka rasta prsline, i ova vrednost raspona faktora intenziteta napona se naziva minimalni propagacijski raspon faktora intenziteta (threshold stress intensity factor range) i obeležava se sa  $\Delta K_{th}$ .

Vrednosti minimalnog propagacijskog raspona faktora intenziteta zavise od koeficijenta asimetrije ciklusa,  $R$ , i opada se njegovim povećanjem. U slučaju da je  $R < 0$ , vrednosti  $\Delta K_{th}$  su gotovo identične kao u slučaju kad je  $R = 0$ . Eksperimentalno određivanje svih vrednosti minimalnog propagacijskog raspona faktora intenziteta napona je nemoguće u praksi za sve kombinacije materijala i  $R$ , stoga su izvedeni brojni empirijski izrazi, od kojih se najčešće primenjuje sledeći [31]:

$$\Delta K_{th,R} = (1 - C_0 R)^d \cdot \Delta K_{th,0} \quad (2.46)$$

Ovim izrazom je data veza minimalnog propagacijskog faktora intenziteta napona za koeficijent asimetrije  $R$ ,  $\Delta K_{th,R}$ , i minimalnog propagacijskog faktora intenziteta napona za vrednost  $R = 0$ ,  $\Delta K_{th,0}$ , preko eksperimentalno određenih empirijskih konstanti  $C_0$  i  $d$ .

### 2.6.3 Osnovni model rasta prsline pri konstantnoj amplitudi opterećenja

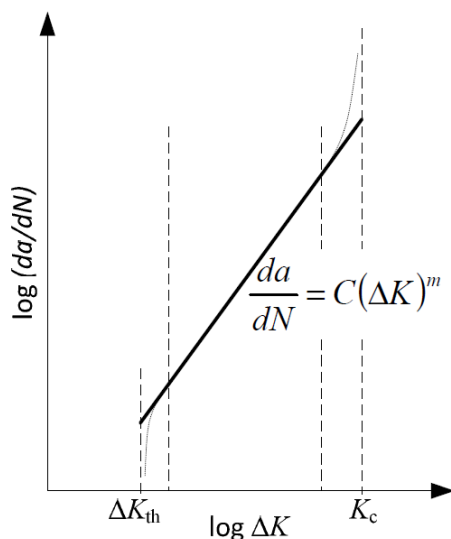
Osnovni model rasta prsline definisao je Paris, za slučaj dinamičkog opterećenja sa konstantnom amplitudom, i time modelom je data linearna veza u logaritamskom dijagramu. Ovaj model je opisan sledećim izrazom [1,37]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.47)$$

gde  $C$  i  $m$  empirijski koeficijenti dobijeni prilagođavanjem Paris-ove jednačine eksperimentalno dobijenim podacima. U slučaju logaritamskog dijagrama, ove veza se može prikazati u linearnoj formi na sledeći način:

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log C + m \cdot \log(\Delta K) \quad (2.48)$$

Ovakav model daje precizan opis područja II sa slike 3.3, odnosno područja stabilnog rasta prsline, koji je u ovom slučaju zavisian od vrste materijala, uslova okoline i raspona faktora intenziteta napona. Što se tiče područja I i III, rast prsline je nemoguće precizno predstaviti ovim modelom, usled njegove linearnosti. Ovaj model predstavlja osnovu proširene metode konačnih elemenata, koja je u ovom radu primenjena za potrebe numeričke simulacije, a o kojoj će biti više reči u okviru poglavlja 3.



**Slika 2.19** Paris-ov model [18]

### 3.6.4 Plastična zona oko vrha prsline pri dinamičkom opterećenju

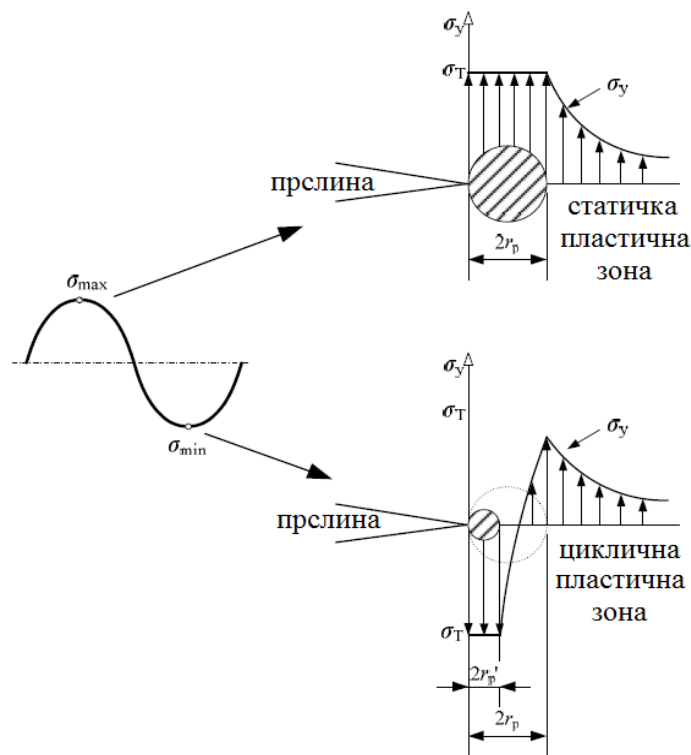
Uz pretpostavku idealno elastično-plastičnog (Prandtl-ovog) materijala, pri opterećenju zatezanjem sa jednim ciklusom, dolazi do formiranja plastične zone čija veličina se može odrediti na osnovu napona i deformacija koje se javljaju u njemu (u slučaju da je opterećenje statičko). Kod dinamičkog cikličnog opterećenja dolazi do promene predznaka sile, tako da se naponsko stanje u vrhu prsline sastoji od sume zaostalih napona i elastičnih napona usled prethodnog opterećenja (odnosno sile sa suprotnim predznakom). Zbog toga je zona plastičnosti koja se formira u uslovima dinamičkog opterećenja nekoliko puta manja od odgovarajuće plastične zone pri statičkom opterećenju (slika 3.5).

Veličina plastične zone nastale usled cikličnog dinamičkog opterećenja se može proceniti preko sledećih jednačina, u kojima se pojavljuje dvostruka vrednost granice tečenja:

$$\text{Ravno stanje napona: } 2r'_p = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.49)$$

$$\text{Ravno stanje deformacija: } 2r'_p = \frac{1}{12\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \quad (2.50)$$

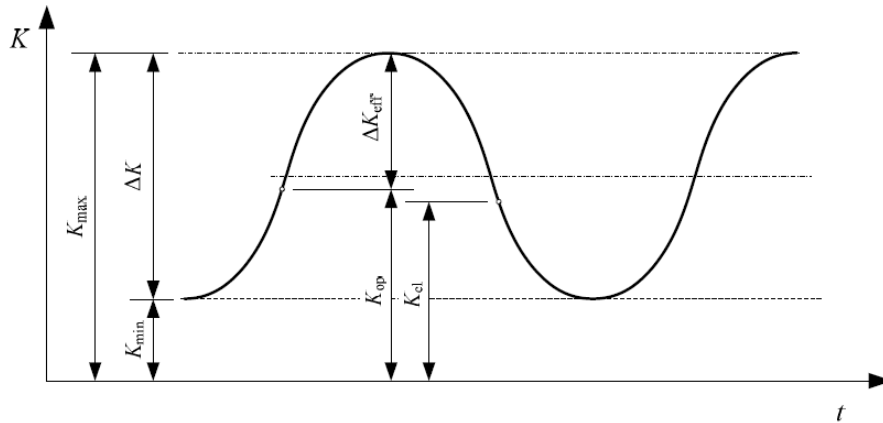
Treba napomenuti da se linearno elastična mehanika loma može primeniti i na probleme vezane za zamorni lom u slučajevima kada materijal pokazuje sklonost ka plastičnoj deformaciji.



**Слика 2.20** Пластична зона у случају динамичког циклског оптерећења

### 3.6.5 Затварање прслине при динамичком оптерећењу

Pojava zatvaranja prsline do koje dolazi pri dinamičkom opterećenju (usled promene smera delovanja opterećenja) je od velikog značaja. Ovu pojavu je prvi izučavao Elber [38]. Usled pojave zaostalih napona prouzrokovanih plastičnim deformacijama oko vrha prsline dolazi do smanjenja efektivnog raspona faktora intenziteta napona  $\Delta K_{eff}$ , kao što je prikazano na slici 3.6, i ovaj fenomen se naziva zatvaranje prsline usled plastične deformacije [39].



**Slika 2.21** Efektivni raspon faktora intenziteta napona

Otkriće ove pojave je imalo veliki značaj za dalji razvoj modela rasta prsline u uslovima dinamičkog opterećenja. U tu svrhu su uvedeni različiti izrazi za određivanje efektivnog raspona faktora intenziteta napona, u zavisnosti od parametara preko kojih se računa. Najčešće se primenjuje definicija po kojoj efektivni raspon faktora intenziteta napona predstavlja razliku maksimalnog faktora intenziteta napona,  $K_{max}$  i faktora intenziteta otvaranja prsline,  $K_{op}$  [39], tj:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2.51)$$

Za potrebe ovakvih analiza, uveden je i pojam koeficijenta zatvaranja prsline, koji je dat u izrazu prikazanom ispod:

$$\Omega = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{1 - \frac{K_{op}}{K_{max}}}{1 - R} \quad (2.52)$$

U slučaju opterećenja sa konstantnom amplitudom, efekat zatvaranja prsline je izraženiji pri manjim vrednostima koeficijenta asimetrije ciklusa, što znači da postaje izraženiji sa porastom vrednosti  $K_{max}$ . Efekat zatvaranja prsline takođe zavisi i o debljine ploče, prisustva oksida na njenoj površini, itd. Zavisnost ovog koeficijenta od odnosa napona  $R$  je detaljnije opisana u literaturi [39], koja sadrži neke od modela koji se često koriste za opisivanje ove zavisnosti.

## **4. Osnovni principi Metode Konačnih Elemenata**

### **4.1. Uvodna razmatranja**

Metoda konačnih elemenata predstavlja jedan od najrasprotranjenijih alata koji se primenjuju u numeričkoj analizi. Njena suština se sastoji u diskretizaciji fizičkih modela (uz određene pretpostavke i aproksimacije) na konačan broj manjih elemenata jednostavnije geometrije, sa odgovarajućim graničnim uslovima. Na ovakvim modelima se potom određuju polje pomeranja i deformacija kako za svaki element zasebno, tako i za model kao celinu, i na osnovu tako dobijenih rezultata se proračunava i naponsko stanje. U daljem tekstu sledi kratak istorijat i teoretske osnove metode konačnih elemenata (MKE), pri čemu će naglasak biti na takozvanoj Proširenoj metodi konačnih elemenata (extended finite element method - XFEM), koja je pronašla široku primenu pri numeričkom simuliranju ponašanja i rasta prslina, pre svega prslina izazvanih zamornim opterećenjem, koje se često javlja pri eksploataciji posuda pod pritiskom i ima značajan uticaj na njihov radni vek i integritet.

Metodu konačnih elemenata u obliku u kakvom je danas znamo su, sredinom pedesetih godina prošlog veka, razvili Turner, Clough, Martin i Topp [40], pri čemu je Clough prvi upotrebio termin konačni element. Ova metoda je svoju primenu pronašla pri rešavanju problema vezanih za analizu opterećenja, mehaniku fluida i prenos toplote. S obzirom da je za ovakav pristup rešavanja gorenavedenih problema neophodan veliki broj jednačina, s vremenom se prešlo na primenu MKE kroz softverske pakete, čime je omogućeno daleko preciznije i efikasnije rešavanje istih. U ovu svrhu se najčešće koriste softverski paketi poput ABAQUS-a, ANSYS-a i NASTRAN-a, pri čemu je za potrebe ove disertacije korišćen ABAQUS.

Tokom svog razvoja, metoda konačnih elemenata se proširila na brojna naučne oblasti, i danas se sa uspehom primenjuje i u mehanici loma [4,41-43], biomedicini [44,45], vazduhoplovstvu [7,46], itd. Potrebno je i naglasiti da se ova metoda najčešće koristi u kombinaciji sa eksperimentalnim merenjima, radi verifikacije rezultata dobijenih njenom primenom. U ovom poglavlju, doktorska teza će se baviti teorijskim osnovama metode konačnih elemenata i osnovnim principima na kojima se ona zasniva, sa detaljnijim osvrtom

na proširenu metodu konačnih elemenata, budući da je istraživanje obrađeno ovde u najvećoj meri zasnovano upravo na ovoj metodi.

## 4.2. Osnovni pojmovi

Kao što je prethodno napomenuto, metoda konačnih elemenata se zasniva na diskretizaciji fizičkog modela vezanog za problem koji se analizira, pri čemu diskretizacija podrazumeva podelu na određen, konačan, broj elemenata odgovarajućih dimenzija, za koje se definišu granični uslovi (stepeni slobode), kao i opterećenje. Ovi elementi, koji u zavisnosti od prirode problema mogu biti jednodimenzionalni, dvodimenzionalni ili trodimenzionalni su međusobno povezani u mrežu konačnih elemenata u tačkama koje se nazivaju čvorovi [25]. Pri diskretizaciji je neophodno voditi računa o kontinualnosti (neprekidnosti) modela. U pojedinim slučajevima, međutim, pojava diskontinuiteta je neizbežna, i tu svrhu su razvijene i metode poput PMKE, o kojoj će više reči biti kasnije.

Problemi koji se rešavaju primenom metode konačnih elemenata se mogu definisati na različite načine, uključujući metode definisanja problema teorije elastičnosti, koji se mogu definisati preko direktnih metoda (pomeranje, sile, kombinacija pomeranje-sile), kao i preko varijacionih definicija (Princip minimuma potencijalne energije, princip minimuma komplementarne energije i princip stacionarnosti energije). Usled faktora poput komplikovanijih uslova opterećenja, kao i graničnih uslova, geometrije samog modela, heterogene strukture (što je naročito izraženo kod zavarenih spojeva, gde su prisutna bar 3 različita materijala u pogledu svojih osobina), modeliranje metodom konačnih elemenata uvek obuhvata i usvajanje određenih aproksimacija, u cilju pojednostavljenja proračuna, pri čemu treba voditi računa o tome da usvajanje ovakvih aproksimacije ne ugrozi tačnost rezultata analize.

Ceo postupak metode konačnih elemenata se može podeliti u sledećih sedam faza, koje će biti detaljnije objašnjene u daljem tekstu:

- Modeliranje (diskretizacija)
- Izbor interpolacionog modela za polje pomeranja
- Formiranje matrica krutosti i vektora opterećenja na lokalnom nivou

- Sastavljanje globalne matrice krutosti i vektora opterećenja
- Određivanje nepoznatih pomeranja čvorova
- Proračun deformacijskog i naponskog stanja na lokalnom nivou
- Proračun naponskog stanja u modelu kao celini

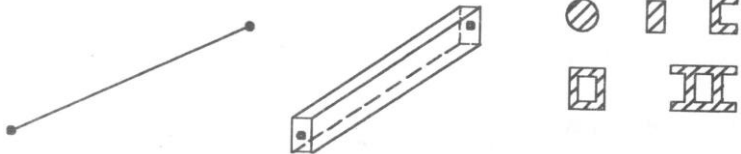
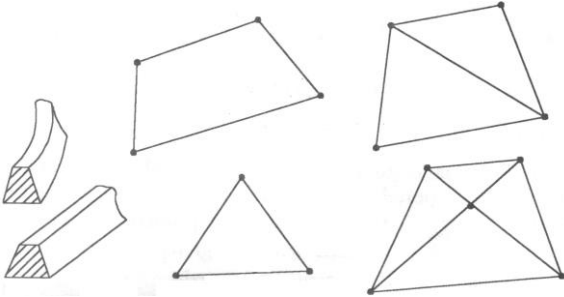
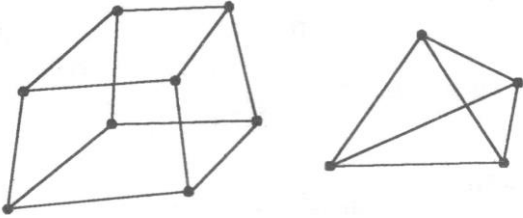
#### **4.2.1 Diskretizacija**

U okviru ovog koraka se vrši izbor broja, dimenzija, vrste i veličine konačnih elemenata u zavisnosti od prirode i složenosti problema u pitanju. Zatim je neophodno za svaki element definisati granične uslove (stepene slobode, odnosno pravce u kojima je pomeranje dozvoljeno/onemogućeno) u njihovim čvorovima. Veličinu elemenata treba izabrati tako da se manji elementi (finija mreža) nalaze na mestima gde su očekuju najveće koncentracije naprezanja, kako bi se što preciznije pokazalo ponašanje pri maksimalnim deformacijama. Primenom elemenata većih dimenzija na mestima koja su od manjeg značaja pri analizi (npr. udaljenim od mesta koncentracije napona) se smanjuje ukupan broj elemenata, čime se pojednostavljuje sam proračun. Treba voditi računa o tome da među susednim elementima ne sme biti prevelike razlike u veličini (što se može izbeći primenom takozvanih prelaznih zona). Pri izboru veličine elemenata najvažnije je ispuniti uslov konvergencije rešenja, s obzirom da bi izbor prevelikih elemenata dao netačno rešenje, dok bi izbor elemenata veoma malih dimenzija značajno povećao vreme potrebno za proračun, pri čemu ne bi uticao na tačnost rešenja.

Broj dimenzija zavisi od toga da li se radi od 1D, 2D ili 3D problemu. U tabeli 3.1. su prikazani neki od osnovnih, najčešće primenjivanih elemenata u zavisnosti od broja dimenzija problema, dok oblik izabranih elemenata zavisi od geometrije modela koji se diskretizuje, pri čemu su pri određenim uslovima moguće i kombinacije različitih oblika.



**Tabela 3.1** Osnovne vrste konačnih elemenata [11]

Osnovni konačni element	
1D problem	
2D problem	
3D problem	

Što se vrste konačnog elementa tiče, ona se odnosi na broj čvorova u elementu određene geometrije, pri čemu se kod složenijih problema i zahtevnijih proračuna primenjuju konačni elementi sa većim brojem čvorova. Ovaj izbor takođe zavisi od stepena funkcija interpolacije koje će biti primenjene u okviru proračuna [25].

Granični uslovi se mogu definisati po pomeranjima i po naponu, odnosno opterećenju. Pomeranja obuhvataju rotacije i translacije čvora, dok opterećenje može biti koncentrisano, površinsko i zapreminsko. Granični uslovi definišu stepene slobode svakog čvora, odnosno ograničavaju njegova pomeranja (ili definišu njihovu veličinu) po odgovarajućim osama. U modelu napravljenom od konačnih elemenata, granični uslovi se najčešće koriste za definisanje oslonaca posmatranog tela.

## 4.2.2 Interplacioni modeli

Ovim korakom se definišu aproksimativne, odnosno interpolacijske funkcije kojima će biti opisano ponašanje numeričkog modela. U tu svrhu se najčešće primenjuju polinomske funkcije, definisane na sledeći način:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n = \left\{ 1 \quad x \quad x^2 \quad \dots \quad x^n \right\} \{a\} \quad (3.1)$$

Gornji opšti izraz se odnosi na 1D problem, u slučaju 2D i 3D proračuna, u izrazima će se pojaviti i y i z coordinate. Detaljniji opis svih ovih funkcija se može naći u [25]. Polinomske funkcije većeg stepena daju približnija rešenja, kao što se može videti u tabeli 3.2. Međutim, primena funkcija sa stepenom većim od 2 je nepraktična usled veoma komplikovanog i dugotrajnog proračuna, što se uostalom i vidi iz dužine izraza za kubnu interpolaciju u tabeli.

Interpolacijski polinomi moraju biti definisani na takav način da je njihov broj nepoznatih koeficijenata jednak ili veći od broja stepeni slobode konačnog elementa, pri čemu je ovaj broj stepeni slobode jednak proizvodu broja čvorova elementa i broja stepeni slobode u jednom čvoru. Takođe, polje na kome se primenjuje interpolacijski model mora biti kontinualno, odnosno neprekidno.

**Tabela 3.2** Aproksimacije polinomskim funkcijama različitog stepena

	1D	2D	3D
Linearni	$a_1 + a_2x$	$a_1 + a_2x + a_3y$	$a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$
Kvadratni	$a_1 + a_2x + a_3x^2$	$a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2$	$a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5x^2 + a_6xy + a_7y^2 + a_8xz + a_9yz + a_{10}z^2$
Kubni	$\dots + a_4x^3$	$\dots + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3$	$\dots + a_{11}x^3 + a_{12}x^2y + a_{13}xy^2 + a_{14}y^3 + a_{15}x^2z + a_{16}xyz + a_{17}y^2z + a_{18}xz^2 + a_{19}zy^2 + a_{20}z^3$

## 4.2.3 Matrica krutosti i vektor opterećenja

Nakon diskretizacije i izbora tipa konačnih elemenata i interpolacionih funkcija sledi korak definisanje matrice krutosti i vektora opterećenja. Matrica krutosti i odgovarajući vektor opterećenja se prvo definišu na lokalnom nivou (zasebno za svaki element), a potom i globalno (za ceo model). Matrica krutosti je simetrična, pozitivno definisana i singularna, i njeni elementi predstavljaju opterećenja (sile) u svakom čvoru prouzrokovano odgovarajućim

jediničnim pomeranjem. Vektor opterećenja se definiše u čvorovima elementa kao koncentrisano, površinsko ili zapreminsko opterećenje. Kao i matrica krutosti, može se odrediti primenom direktnih metoda (preko definisanja sila u čvoru na osnovu jediničnog pomeranja), varijacionih metoda (zasnovanih na određivanju energije deformacije, odnosno deformacijskog rada) i preko diferencijalnih jednačina.

Jednačina ravnoteže za svaki element se može napisati u sledećem obliku:

$$[k]_e \cdot [\delta] = \{F\}_e \quad (3.2)$$

gde su  $[k]_e$  i  $\{\delta\}_e$  matrica krutosti i vektor opterećenja, respektivno. Ove matrice se mogu prebaciti iz lokalnih u globalni sistem primenom tzv. matrica transformacije, koja zavisi od odabranog tipa konačnog elementa. Stoga, matricu krutosti i vektor opterećenja u globalnom sistemu možemo predstaviti sledećim izrazima:

$$[\bar{k}]_e = [T]^T [k]_e [T], \quad \{\bar{F}\}_e = [T]^T \{F\}_e \quad (3.3)$$

Potrebno je napomenuti da je numeracija čvorova u lokalnom koordinatnom sistemu direktno utiče na taj sistem (jednoznačno da određuje), matricu krutosti (raspored članova), matricu transformacija, kao i na vektor opterećenja elemenata.

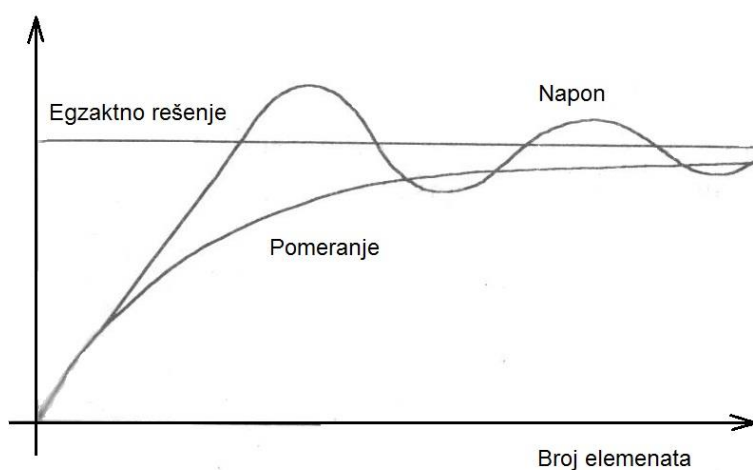
#### 4.2.4 Određivanje nepoznatih pomeranja

U ovoj fazi numeričke simulacije metodom konačnih elemenata se određuju pomeranja u čvorovima, na osnovu kojih se formira polje pomeranja za ceo model (globalno). Određivanju pomeranja prethodi definisanje opterećenja i graničnih uslova, nakon čega se pomeranja proračunavaju rešavanjem sistema jednačina, čija složenost zavisi od izabranih elemenata i interpolacijskih funkcija. Na osnovu dobijenog polja pomeranja se dalje određuju deformacije i naponi, takođe prvo na lokalnom, pa na globalnom nivou.

#### 4.2.5 Određivanje polja deformacija i napona

Poslednji korak metode konačnih elemenata obuhvata određivanje napona i deformacija za sve elemente, odnosno čvorove i formiranje odgovarajućih polja na

globalnom nivou, čime se dobijaju konačni rezultati. U zavisnosti od tačnosti proračuna, ovi rezultati se usvajaju kao merodavni, ili se postupak ponavlja, sa izmenama pri određenim koracima (koje mogu biti vezane za način definisanja graničnih uslova i/ili opterećenja, veličinu i tip elemenata, tj. gustinu mreže...), pri čemu je od velike važnosti za rezultate da se postigne konvergencija, odnosno da pri određenoj veličini i broju elemenata, dobijene vrednosti napona i deformacija počnu da teže asimptotski ka nekoj fiksnoj vrednosti (slika 3.1). U ovom trenutku je dalje usitnjavanje mreže nepotrebno i samo dovodi do povećanja vremena potrebnog za proračun, bez ikakvog vidljivog uticaja na tačnost.



**Slika 3.1.** Konvergencija modela u zavisnosti od broja konačnih elemenata.

## **4.3 Proširena metoda konačnih elemenata (PMKE)**

### **4.3.1 Osnovni principi**

Kao što je prethodno pomenuto, jedan od uslova primene metode konačnih elemenata je kontinuitet modela koji se diskretizuje. Uvođenje prslina u model dovodi do pojave diskontinuiteta, čime se javila potreba za pronalaženje načina kako da se ovaj problem prevaziđe. U tu svrhu su osmišljene mnoge metode, pri čemu je jedna od najrasprostranjenijih Proširena metoda konačnih elemenata (Extended Finite Element Method - XFEM), koje se u poslednje vreme sve više primenjuje pri proračunu integriteta različitih vrsta konstrukcija, pri čemu je naročito pogodna za simulaciju rasta zamornih prslina [46,47].

Proširena metoda konačnih elemenata se zasniva na svojstvu poznatom kao Partition of Unity, koje su prvi definisali Melenk i Babuška [48], odnosno na činjenici da je zbir interpolacionih funkcija konačnog elementa jednak jedinici. Ovo omogućava dodavanje novih interpolacijskih funkcija, koje se nazivaju funkcije poboljšanja (enrichment functions [47]), pri čemu početni uslov vezan za zbir mora da ostane ispunjen, tj. zbir mora i da posle uvođenja funkcija poboljšanja ostane jednak jedinici. Svrha ovih poboljšanja je da se pomoću njih prikaže ponašanje polja promenljivih u kojima su prisutni diskontinuiteti (u konkretnom istraživanju prsline). Sama prsline predstavljena je nezavisno od mreže konačnih elemenata, prethodno definisane za ceo model, koja će u određenoj meri biti poboljšana primenom gore pomenutih funkcija [47].

Treba naglasiti da se ove funkcije uvode u aproksimaciju pomeranja kod malog broja konačnih elemenata, u okolini prsline i u domenu u kome se očekuje da će ona napredovati, kako bi se proračun što više pojednostavio u smislu složenosti i vremenskog trajanja. To znači da se dodatni stepeni slobode uvode u sve elemente u kojima je prisutan diskontinuitet. Ovaj postupak ima veliku prednost u odnosu na klasične metode konačnih elemenata zbog toga što omogućava da se zaobiđe tim metodama svojstven korak u kome se mreža u okolini vrha prsline ponovo generiše u svakoj iteraciji. Kada se funkcije poboljšanja dodaju postojećim interpolacijskim funkcijama, dobija se sledeća jednačina (3.4):

$$u^h(x) = \sum_i N_i(x) u_i + \sum_j v^j(x) a_i^j \quad (3.4)$$

gde  $u$  predstavlja klasične stepene slobode konačnih elemenata,  $N_i$  predstavlja interpolacijske funkcije, dok se poslednji član u izrazu, u kome figurišu  $v^j$  i  $a_i^j$  odnosi na funkciju poboljšanja, pri čemu prvi član predstavlja samu funkciju poboljšanja u  $j$ -tom čvoru, dok drugi predstavlja dodatne stepene slobode koji odgovaraju toj funkciji. Jednačina (3.4) ne zadovoljava svojstvo interpolacije usled dodatnih stepeni slobode, tako da su potrebne određene korekcije kako bi ovaj izraz postao primenljiv u praksi, pre svega pri definisanju oslonaca i kontaktnih uslova. Ova korekcija funkcije poboljšanja data je sledećim izrazom:

$$v_i^j(x) = v^j(x) - v_j^i(x) \quad (3.5)$$

pri čemu  $v_i^j(x)$  predstavlja vrednost j-te funkcije poboljšanja u i-tom čvoru. Funkcija poboljšanja korigovana na ovakav način sada ima vrednost 0 u svim čvorovima, odnosno rešenje sistema jednačina sada zadovoljava uslov interpolacije. Prvobitnu jednačinu sada možemo napisati u korigovanom obliku:

$$\mathbf{u}^h(x) = \sum_i N_i(x) \left[ \mathbf{u}_i + \sum_j V_i^j(x) a_i^j \right] \quad (3.6)$$

pri čemu je  $v_i^j(x)$  j-ta korigovana funkcija poboljšanja u i-tom čvoru. Sada se dobijena poboljšana aproksimacija pomeranja može prevesti u sistem linearnih jednačina sledećeg oblika:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (3.7)$$

Gore navedena jednačina je u suštini ista kao i jednačina (3.2), odnosno  $\mathbf{K}$  predstavlja matricu krutosti,  $\mathbf{q}$  vektor stepeni slobode, a  $\mathbf{f}$  vektor sila u čvorovima, s tim što se j-na (3.7) odnosi na globalni sistem.

### 4.3.2 Osobine proširene metode konačnih elemenata

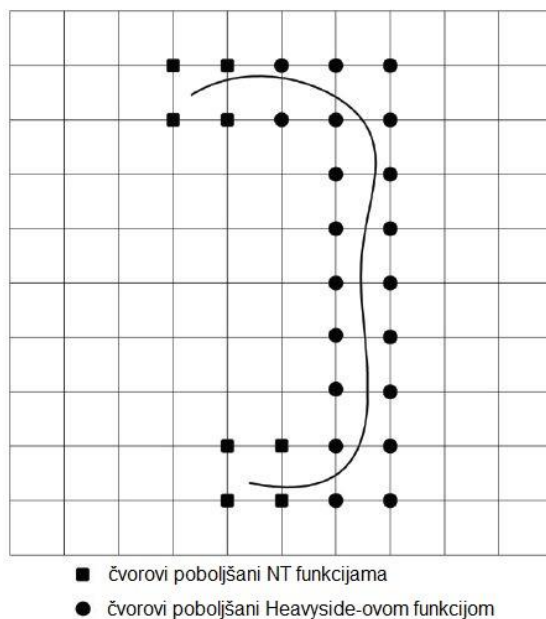
PMKE je pronašla primenu u velikom broju oblasti, kod problema vezanih za diskontinuitete, pri čemu treba razlikovati dve grupe: "jake" i "slabe" [49] diskontinuitete, pri čemu se pod jakim diskontinuitetom podrazumevaju slučajevi u kojima i pomeranja i relativne deformacije nisu kontinualne, dok kod slabih diskontinuiteta važi da se samo relativno deformacije diskontinualne. Prethodno pominjana prednost koja se ogleda u nezavisnosti modeliranja od generisane mreže konačnih elemenata, omogućava primenu proizvoljnog oblika prsline u mreži elemenata, bez potrebe da se mreža ponovo generiše sa svakim korakom.

Ovo je posledica primene funkcija poboljšanja, kojima se opisuje diskontinualno polje pomeranja u oblasti oko prsline, kao i u njenom vrhu. Funkcije poboljšanja su globalnog karaktera, dok se za opisivanje lokalnih karakteristika, one množe sa odgovarajućim interpolacijskim funkcijama svakog pojedinačnog elementa, čime se u analizu uključuju i diskontinualna polja pomeranja i deformacija unutar samog elementa.

Ovakav pristup numeričkoj simulaciji zahteva primena određenih vrsta čvorova, pri čemu su neki od njih definisani upravo za potrebe PMKE. Najčešće se primenjuju tri vrste elemenata, koje razlikujemo po načinu na koji se generišu njihovi čvorovi:

- klasični čvorovi sa 2 stepena slobode (u domenu prsline)
- tzv. H čvorovi, sa 4 stepena slobode, kod kojih ulogu funkcije poboljšanja ima Heaviside-ova funkcija [28], tj. funkcija skoka. Ovi elementi se primenjuju u slučajevima kada prslina "seče" pripadajuće elemente, pri čemu se njen vrh ne nalazi u tim elementima.
- Near Tip (NT) čvorovi, sa 10 stepeni slobode, koji se koriste kod elemenata vrha prsline

Na slici 3.2 se može videti raspored ovih vrsta elemenata u odnosu na proizvoljnu prslinu sa pripadajućom mrežom konačnih elemenata.



**Slika 3.2.** Čvorovi poboljšani primenom Heaviside-ove (kvadrati) i NT funkcije (krugovi)

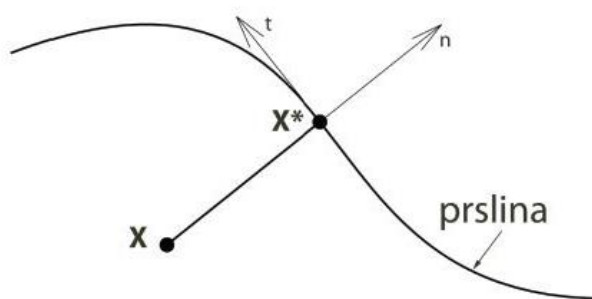
Heaviside-ova funkcija je u ovom slučaju definisana na sledeći način:

- $H(x) = 1$ , ukoliko je tačka iznad prsline
- $H(x) = -1$ , ukoliko je tačka ispod prsline

Ukoliko koordinate izabrane tačke označimo sa  $\mathbf{x} = (x,y)$ , onda se položaj te tačke u odnosu na prslinu (primenom funkcije skoka) može prikazati na sledeći način:

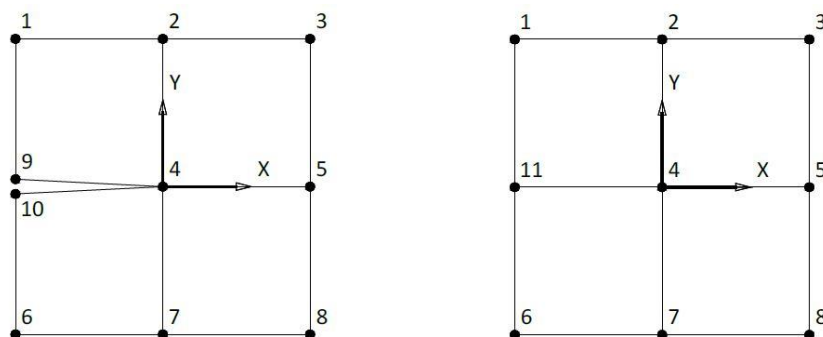
$$H(x) = \begin{cases} 1, & (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1, & (x - x^*) \cdot n < 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

pri čemu je  $\mathbf{n}$  jedinični vektor pravca, dok  $\mathbf{x}^*$  predstavlja koordinate tačke preseka prsline i odgovarajućeg konačnog elementa (slika 3.3). Jednačina definisana u obliku prikazanom gore uvodi diskontinuitet u polje pomeranja duž prsline, i predstavlja posmatrani čvor tokom procesa numeričke integracije.



**Slika 3.3** Definisanje položaja tačke u odnosu na presek konačnog elementa i prsline

Pri definisanju elemenata koji sadrže vrh prsline, primenjuju se elementi sa 10 čvorova, kao što je prikazano na slici 3.4 ispod. Na slici levo se jasno vidi diskontinuitet (prslina), kao i njen vrh koji odgovara elementu broj 4. Na desnoj slici je prikazan isti element nakon što su mu dodate funkcije poboljšanja, pri čemu je diskontinuitet iz prethodnog elementa zamenjen čvorom obeleženim brojem 11.





**Slika 3.4** Konačni element oko vrha prsline i njegova poboljšana verzija

Funkcije poboljšanja koje se koriste u slučaju ovakvih elemenata imaju sledeći oblik:

$$\phi_{\alpha}(x)_{,\alpha=1-4} = \sqrt{r} \left[ \sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3.9)$$

gde su  $r$  i  $\theta$  polarne koordinate u lokalnom koordinatnom sistemu vezanom za vrh prsline, pri čemu vrednost  $\theta = 0$  odgovara pravcu paralelnom prslini. Polje pomeranja oko vrha prsline predstavlja kombinaciju dejstva opterećenja modova I, II i III otvaranja prsline, i može se u slučaju izotropnih materijala predstaviti preko faktora intenziteta napona [46, 50] kao:

$$\begin{cases} 2\mu u_1(r, \theta) \\ 2\mu u_2(r, \theta) \end{cases} = K_I \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{cases} u_1^I(\theta) \\ u_2^I(\theta) \end{cases} + K_{II} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{cases} u_1^{II}(\theta) \\ u_2^{II}(\theta) \end{cases}; \mu u_3(r, \theta) = K_{III} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} u_3^{III}(\theta) \quad (3.10)$$

pri čemu  $u_1^I$ ,  $u_1^{II}$  i  $u_3^{III}$  predstavljaju trigonometrijske funkcije za svaki od odgovarajućih modova otvaranja prsline, dok je  $\lambda$  Laméova konstanta [28].

Ovakav način izražavanja komponenti preko faktora intenziteta napona se može primeniti i na prethodno pominjani vektor opterećenja, čime se dobija sledeći izraz:

$$\begin{cases} u_1(r, \theta) \\ u_2(r, \theta) \end{cases} = K_I \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{cases} u_1^I(r, \theta) \\ u_2^I(r, \theta) \end{cases} + K_{II} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{cases} u_1^{II}(r, \theta) \\ u_2^{II}(r, \theta) \end{cases} \quad (3.11)$$

Treba napomenuti da su izrazi prikazani u prethodnom delu ovog poglavlja vezani za linearno elastičnu mehaniku loma (stoga i primena faktora intenziteta napona). U slučaju eleasto-plastične analize, izrazi za deformaciono polje se opisuju preko Hutchinson-Rice-Rozengren singulariteta [51]. Ovakve funkcije poboljšanja se koriste pri modeliranju elasto-plastičnog rasta zamorne prsline, naročito u slučaju ograničenog broja ciklusa. Međutim, vrednosti dobijene na ovakav način se ne razlikuju značajno od vrednosti dobijenih klasičnom metodom konačnih elemenata, pri čemu proračun čine značajno dužim. Funkcije poboljšanja su u ovom slučaju defnisane na sledeći način:

$$\phi_{\alpha}(x)_{,\alpha=1-6} = r^{\frac{1}{n+1}} \left[ \sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sin 3\theta \cos \frac{\theta}{2} \sin 3\theta \right] \quad (3.12)$$

gde je  $n$  koeficijent deformacionog ojačanja materijala, tzv. Ramberg-Ozgdov eksponent.

### 4.3.3 Izbor tipa čvorova mreže

Kao što je već pominjano, nema potrebe za primenu PMKE na ceo model, već samo na domen prsline. Stoga je neophodno definisati koji su elementi presečeni prslinom, kao i u kom elementu se nalazi vrh prsline. Ovo se može postići primenom takozvane Level Set (LS) metode, koja jednoznačno definiše elemente pomoću dve funkcije, od kojih jedna, označena sa  $\phi$ , predstavlja funkciju rastojanja od vrha prsline, dok druga,  $\psi$ , predstavlja funkciju normalnog rastojanja, kao što se može videti na slici 3.5. Ove dve funkcije date su sledećim izrazima:

$$\phi_p(x, 0) = (x - x_p) \cdot \mathbf{t} \quad (3.13a)$$

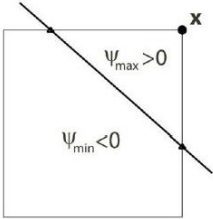
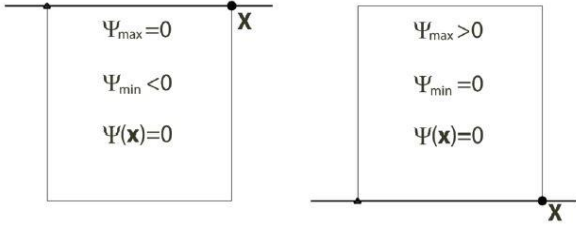
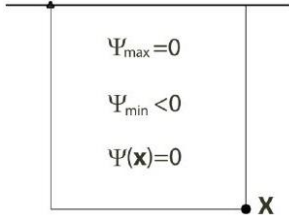
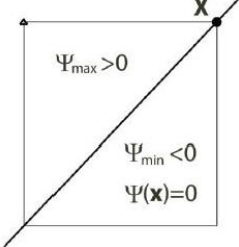
$$\psi_p(x, 0) = (x - x_i) \cdot \mathbf{n} \quad (3.13b)$$

gde  $x_p$  predstavlja koordinate tačke vrha prsline. Tangenta i normala svakog segmenta prsline su određeni koordinatama početka i kraja dotičnog segmenta. U kombinaciji sa prethodno definisanom Heaviside-ovom funkcijom poboljšanja, dobijaju se sledeći izrazi:

$$H(x) = H(\Psi(x)) = \begin{cases} 1, & \Psi(x) > 0 \\ -1, & \Psi(x) < 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

U tabeli 3.2 je dat pregled ovih funkcija poboljšanja u zavisnosti od međusobnog položaja prsline i elementa, odnosno tačaka u kojima prsline seče konačni element. PMKE i LS metode se međusobno dopunjuju kada je u pitanju praćenje položaja prsline. Takođe treba napomenuti da se brzina konvergencije PMKE u značajnoj meri povećala poslednjih godina [52-54], upravo zbog poboljšanja načina na koji se prikazuje vrh prsline. Brzina konvergencije je povećana uvođenjem model relativnih deformacija, koji zavisi od funkcije poboljšanja, kojima se rešava problem prisustva "parazitskih" članova u aproksimiranom polju pomeranja, koji su se javljali kao posledica postojanja delimično poboljšanih elemenata oko vrha prsline. Razvoj ove i sličnih metoda doveo je do toga da se brzina konvergencije PMKE u značajnoj meri približi brzini klasične metode konačnih elemenata.

**Tabela 3.3** Funkcije poboljšanja u zavisnosti od tačaka u kojima prslina seče KE [50]

Međusobni položaj	Vrednosti funkcija
Prslina seče susedne (ili naspramne) strane	
Prslina se poklapa sa ivicom u kojoj je čvor	
Prslina se poklapa sa ivicom u kojoj nije čvor	
Prslina seče element dijagonalno	

#### 4.3.4 Primena PMKE na procenu parametara mehanike loma

Proširena metoda konačnih elemenata se može primeniti i na određivanje faktora intenziteta napona, tzv. integrala interakcije [55,56]. Integral interakcije suštinski predstavlja proširen J-integral, koji je preveden u površinski integral, što ga čini pogodnijim za simulaciju konačnim elementima. Integrali interakcije daju mogućnost procene faktora intenziteta napona za sva tri moda otvaranja prslina. Primena ovog metoda se pokazala veoma dobro za modele sa homogenom prslinom, ali i za složenije vrste diskontinuiteta

(kontakti različitih materijala, račvaste prsline...), pri čemu je ovde od velike važnosti način na koji je definisana mreža modela.

U slučaju opšte dvodimenzionalne homogene prsline, J-integral se može posmatrati kao brzina oslobađanja energije koja zavisi od faktora intenziteta napona i efektivnog modula elastičnosti  $E^*$  (čija vrednost predstavlja vrednost stvarnog modula elastičnosti pri ravnom stanju deformacija odnosno, odnosno vrednost  $\frac{E}{1-\nu^2}$  u slučaju ravnog stanja napona), i dat je izrazom (2.38). J-integral se može predstaviti i u sledećem obliku, preko gustine energije relativne deformacije,  $W$ :

$$J(s) = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left( W n_1 - \sigma_{jk} n_j \frac{\partial u_k}{\partial x_1} \right) d\Gamma \quad (3.15)$$

Kako bi se J-integral prebacio u oblik pogodniji za implementaciju u metodu konačnih elemenata, koristi se Dirakova delta funkcija [57]. Primenom iste se dolazi do sledećeg izraza

$$J(s) = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left( W \delta_{1j} - \sigma_{jk} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) n_j d\Gamma \quad (3.15)$$

Kako bi se odredili faktori intenziteta napona, potrebno je napraviti superpoziciju dva stanja pomeranja i napona, što se može postići primenom takozvanih pomoćnih napona i pomeranja koje su definisali Westergaard [58], Williams [59] i Sukumar [60]. Kao rezultat gore navedenog, dobija se sledeći izraz:

$$J^{(1+2)}(s) = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left[ \frac{1}{2} \left( \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)} \right) \left( \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)} \right) \delta_{ij} - \left( \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)} \right) \frac{\partial \left( u_i^{(1)} + u_i^{(2)} \right)}{\partial x_1} \right] n_j d\Gamma \quad (3.16)$$

pri čemu su  $u_{ij}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{(1)}$  i  $\sigma_{ij}^{(1)}$  polja pomeranja, deformacija i napona dobijena proširenim metodom konačnih elemenata, dok su  $u_{ij}^{(2)}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{(2)}$  i  $\sigma_{ij}^{(2)}$  pomoćna stanja, odnosno polja.

Iz prethodne jednačine se J-integral može raščlaniti na sledeće delove: pomoćno stanje - (2), PMKE stanje - (1) i stanje interakcije - (1,2), odnosno:

$$I^{(1,2)} = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left[ W^{(1,2)} \delta_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} \right] n_j d\Gamma \quad (3.17)$$

gde je  $W^{(1,2)}$  takozvana interaktivna gustina deformacije, koja predstavlja proizvod PMKE naponskog stanja i pomoćne deformacije, odnosno obrnuto ( $W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)}$ )

Dva superimponirana naponska stanja se dalje mogu predstaviti u obliku:

$$J^{(1+2)} = J^{(1)} + J^{(2)} + \frac{2 \left( K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} \right)}{E} \quad (3.18)$$

Pri čemu poslednji član izraza (3.18) predstavlja takozvano stanje interakcije,  $I^{(1,2)}$ .

Vrednosti faktora intenziteta napona  $K_I^{(1)}$  i  $K_{II}^{(1)}$  za odgovarajuće naponsko stanje dobijeno primenom PMKE se određuju usvajanjem  $K_I^{(2)} = 1$  i  $K_{II}^{(2)} = 0$ , odnosno  $K_I^{(2)} = 0$  i  $K_{II}^{(2)} = 1$ . Tada se tražene vrednosti faktora intenziteta napona  $K_I^{(1)}$  i  $K_{II}^{(1)}$  mogu izraziti kao:

$$K_I^{(1)} = \frac{I^{(1, \text{mod } I)} E^*}{2}, \quad K_{II}^{(1)} = \frac{I^{(1, \text{mod } II)} E^*}{2} \quad (3.19)$$

gde su  $I^{(1, \text{mod } I)}$  integral interakcije za slučaj  $K_I^{(2)} = 1$  i  $K_{II}^{(2)} = 0$ , odnosno  $I^{(1, \text{mod } II)}$  integral interakcije za slučaj  $K_I^{(2)} = 0$  i  $K_{II}^{(2)} = 1$ .

Pored opisane metode, postoje i drugi načini definisanja vrednosti faktora intenziteta napona zaslučaj istovremenog dejstva različitih modova opterećenja, poput metode koju je predložio Duarte [61], koja se sastoji u primeni metode najmanjih kvadrata za definisanje linije trenda lokalnih stanja napona oko vrha prsline na osnovu kojih se određuju faktori intenziteta napona, zatim metode koja u obzir uzima i članove višeg reda u asimptotsko širenje vrha 2D prsline, čime je omogućeno direktno dobijanje faktora intenziteta napona, bez

potrebe za definsianjem integrala interakcije [62]. Problem kod ovih metoda je nedostatak odgovarajuće procedure koja bi mogla da se primeni i na trodimenzionalu prslinu. Ovaj rad se neće dalje detaljnije baviti gore navedenim metodama, s obzirom da je u slučaju posuda pod pritiskom jedini merodavan faktor lom prouzrokovan opterećenjem moda I.

### 4.3.5 Određivanje pravca rasta prsline

U slučaju dvodimenzionalnih prslina, definisanje pravca rasta primenom PMKE je često zasnovano na određivanju kritične ravni, maksimalnog radijalnog napona, maksimalne brzine oslobađanja energije i maksimalne gustine energije relativne deformacije [35]. Od svih navedenih kriterijuma, u metodi konačnih elemenata je najzastupljeniji kriterijum maksimalnog radijalnog napona, koji se definiše na osnovu veličine ugla  $\theta_c$ , koja se određuje na osnovu uopštenog izraza prikazanog ispod:

$$\theta_c = -\arccos \left[ \frac{2K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right] \quad (3.20)$$

Takođe postoje i izrazi za  $\theta_c$  koje su izveli autori poput Moës-a i Sukumara, a koji se mogu naći u literaturi [52] i [63].

Kriterijum određivanja položaja kritične ravni se takođe često primenjuje, naročito u slučajevima kad se putanje prslina za ekvivalentne intenzitete aksijalnih i torzionih opterećenja razlikuju. Kod ovog kriterijuma, ugao rasta prsline  $\alpha$  se određuje kao zbir uglova  $\beta$  i  $\gamma$ , definisanih sledećim izrazima:

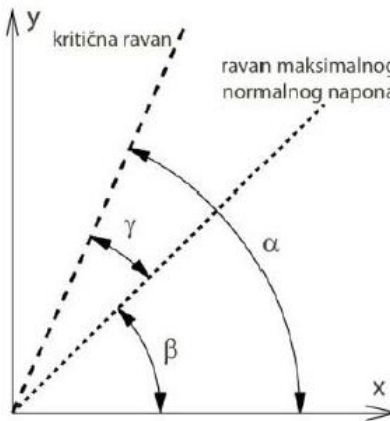
$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2K_{II}}{K_I} \right) \quad (3.21)$$

$$\gamma = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \arccos \frac{-2 + \sqrt{4 - 4(1/s^2 - 3)(5 - 1/s^2 - 4s^2)}}{2(5 - 1/s^2 - 4s^2)}, & s \leq 1 \\ 0, & s > 1 \end{array} \right\} \quad (3.22)$$

pri čemu parametar  $s$  predstavlja odnos faktora intenziteta napona za modove I i II pri odgovarajućoj zadatoj brzini rasta prsline,  $da/dN$ :

$$S = \frac{K_{II, da/dN}}{K_{I, da/dN}} \quad (3.23)$$

Veza između uglova iz gornjih izraza je prikazana na slici 3.5. Najveći nedostatak ovog kriterijuma je određivanje karakteristika iz jednačine (3.23), odnosno faktora intenziteta napona vezanih za brzinu rasta prsline, te se stoga kriterijum maksimalnog radijalnog napona mnogo više koristi u praktičnoj primeni proširene metode konačnih elemenata.



Slika 3.5 Veza između uglova  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  (kriterijum kritične ravni)

#### 4.3.6 Rast zamorne prsline i ekvivalentni faktor intenziteta napona

Prethodno je pomenuto da je najčešće primenjivan model rasta prsline usled zamora oblika  $da/dN = f(\Delta K, R)$ , definisan u skladu sa Paris-ovom jednačinom. Ovakvi modeli su implementirani i u proširenu metodu konačnih elemenata (primera radi, u ABAQUS-u) sa ciljem da se omogući proračun veka konstrukcije sa zamornom prslinom, odnosno da se odredi broj ciklusa na osnovu prethodno zadatih parametara Paris-ove jednačine ( $C$  i  $n$ ), kao i odnosa napona ( $R$ ) kojim se definiše ciklično ponašane opterećenja. Modeli kod kojih se u obzir  $R$  se takođe nazivaju modifikovani Paris-ovi modeli. Među ovim modelima se ističe model koji je predložio Xiaoping [64], koji se zasniva na sledeća tri parametra:

- $\Delta K_{th}$  - opseg faktora intenziteta napona
- $M_R$  - faktor korekcije odnosa  $da/dN$  na osnovu odnosa napona  $R$  i
- $M_P$  - faktor koji uzima obzir odnos između preopterećenja i podopterećenja.

Izrazi za  $M_R$  i  $M_P$  se mogu takođe naći u literaturi [64]. Xiaoping-ov model Paris-ove jednačine je definisan sledećim izrazom:

$$\frac{da}{dN} = C \left[ (M_R M_P \Delta K)^n - \Delta K_{th}^n \right] \quad (3.24)$$

Praktična primena klasičnog Paris-ovog modela u PMKE u slučajevima dejstva različitih modova opterećenja zahteva definisanje tzv. ekvivalentnog faktora intenziteta napona, koji predstavlja rezultujuću vrednost dejstva ovih modova, i koji se koristi pri simulacijama rasta prsline. Postoji nekoliko različitih modela određivanja ekvivalentnog faktora intenziteta napona, koji su dati sledećim izrazima:

Tanaka [65]: 
$$K_{eq} = \sqrt[4]{K_I^4 + 8K_{II}^4} \quad (3.25)$$

Model zasnovan na brzini oslobađanja energije, [66]: 
$$K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (3.26)$$

Model zasnovan na kritičnoj ravni [67]: 
$$K_{eq} = \frac{1}{B} \sqrt{(k_1)^2 + \left(\frac{k_2}{s}\right)^2 + A(k_H)^2} \quad (3.27)$$

Kod treće jednačine,  $k_1$ ,  $k_2$  i  $k_H$  su koeficijenti vezani za  $K_I$  i  $K_{II}$ , dok su A i B vrednosti koje zavise od parametra  $s$  definisanog jednačinom (3.23). Najčešće se koristi prvi od gore navedenih izraza (3.24), pri čemu se u nekim slučajevima uticaj modova II i III može i potpuno zanemariti usled odsustva odgovarajućeg opterećenja, te se kao ekvivalentni faktor intenziteta napona može usvojiti  $K_I$ , budući da ostale dve vrednosti imaju zanemarljivo mali uticaj na ekvivalentnu vrednost u ovim slučajevima.

## 4.4 Proširena metoda konačnih elemenata u ANSYS-u

Za potrebe ovog istraživanja izvršene su numeričke simulacija ponašanja zavarenih spojeva sa zamornom prslinom, primenom softverskog paketa ABAQUS (Dassault Systèmes, Francuska), uz pomoć softverskog paketa Morfeo (Cenaero, Belgija), koji je razvijen sa ciljem da se omogući precizan i kvalitetan proračun ponašanja zamorne prsline primenom metode konačnih elemenata. Iako ABAQUS sam po sebi poseduje mogućnost primene PMKE pri numeričkim simulacijama, problem nastaje pri definisanju dinamičkog opterećenja



i parametara neophodnih za proračun integriteta konstrukcija sa zamornom prslinom, te je bilo neophodno proširiti ga dodatnim softverom koji bi mogao da reši ovo pitanje. Morfeo funkcioniše tako što za prethodno napravljen model sa prslinom (uključujući geometriju, svojstva materijala, granične uslove, opterećenje i mrežu), definiše neophodne parametre koji obuhvataju konstante Paris-ove jednačine,  $C$  i  $n$ , kao i odnos napona  $R$ , kojim se prethodno definisano statičko opterećenje "prevodi" u ciklično. Nakon ovoga se pokreće proračun zamorne prsline, tokom kojeg se pri svakom koraku računaju faktori intenziteta napona, da bi se kao krajnji rezultat dobila njihova zavisnost od broja ciklusa, na osnovu čega se može proceniti vek konstrukcije sa zamornom prslinom izložene zadatom opterećenju.

U narednim poglavljima će biti prikazani neki od ranijih primera ovakvih proračuna, kao i poređenje njihovih rezultata sa istim modelima urađenim bez primene Morfea, kako bi se demonstrirale razlike među njima, i pokazale sve prednosti i eventualni nedostaci primene ovog softvera.

## **5. Materijali i njihove primene na posude pod pritiskom**

### **5.1 Čelik P460NL1**

Čelik koji je korišćen za zavarivanje ploča koje su ispitivane u okviru ovog istraživanja pripada grupi niskolegiranih fino-zrnih normalizovanih feritnih čelika dobre zavarljivosti koji se najčešće koriste pri izradi posuda pod pritiskom predviđenih za rad pri nižim temperaturama, u skladu sa standardom EN:10028 [68]. Karakteriše ih visoka granica tečenja, kao i žilavost. U ove svrhe se najviše koristi čelik P460NL1, koji je takođe bio tema nekih od radova koji će biti pomenuti ovde.

Čelici iz ove grupe su primenu u proizvodnji posuda pod pritiskom, uključujući i posude koje se koriste za transport amonijaka, pronašli usled svojih veoma povoljnih mehaničkih osobina. Iako postoje slični čelici sa još višim granicama tečenja, u slučaju posuda pod pritiskom vrednosti preko 460 MPa nisu preporučljive iz dva razloga. Sa jedne strane, čelici čije su čvrstoće bliske ovoj vrednosti imaju povećanu otpornost na prsline prouzrokovane kombinacijom prisustva vodonika, martenzitnih struktura i zaostalih napona, takozvane hladne prsline [69], dok sa druge strane, čelici povišenih čvrstoća i granica tečenja imaju značajno manju rezervu plastičnosti, odnosno manju žilavost i duktilnost, što znači da će u njihovom slučaju pre doći do otkaza (lom će se javiti pri značajno manjim plastičnim deformacijama. Ovakav, krt lom, u slučaju posuda pod pritiskom gotovo uvek ima katastrofalne posledice, i uobičajena praksa je da se teži upotrebi duktilnijih materijala kako bi se takvi lomovi u što većoj meri izbegli. Upravo zbog ovog gornjeg ograničenja granice tečenja u slučaju određenih vrsta posuda pod pritiskom su čelici poput P460NL1 odgovarajući za primenu koja će biti tema ovog istraživanja. Može se reći da njihove mehaničke osobine predstavljaju najoptimalniji kompromis između visokih vrednosti granice tečenja i sposobnosti plastičnog deformisanja (duktilnosti) materijala za posude pod pritiskom. Čelici koji pripadaju ovoj grupi (1.3 po standardu EN 15608:200?, [70]) su dobro zavarljivi, usled relativnog niskog sadržaja kako ugljenika, tako i ostalih legirajućih elemenata, i u većini slučajeva ne zahtevaju termičku obradu pre i posle zavarivanja, osim u slučaju većih debljina radnog komada, kada je neophodno odrediti temperaturu predgrevanja.

Treba napomenuti je dostupna literatura na temu zamornog ponašanja ovakvih čelika veoma malobrojna, odnosno da se ovom problematikom dosada skoro niko nije bavio. Sa te strane, eksperimentalno istraživanje i numeričke analize primenjen u cilju određivanja parametara rasta zamorne prsline predstavljaju novi doprinos na ovu temu. Zamor sam po sebi je tek relativno nedavno uzet u ozbiljnije razmatranje kod ponašanja zavarenih konstrukcija pri lomu, kako u eksperimentalnom tako i u numeričkom smislu. U prilog tome govori i činjenica da je zamor uključen u postojeće standarde vezane za dozvoljene veličine grešaka u zavarenom spoju tek nedavno, [5].

Takođe, kod uopštenog određivanja parametara vezanih za zamor (pre svega koeficijenta Paris-ove jednačine), praksa je da se vrednosti određuju eksperimentalno, na osnovu ispitivanja više epruveta od istog materijala (ili iz istog zavarenog spoja), na osnovu čega se dobija odgovarajući par vrednost tih koeficijenta. Ovakav pristup je usvojen i u slučaju ovog istraživanja, samo sa detaljnijim osvrtom na samu heterogenost, odnosno razlike između mikrostruktura svih oblasti zavarenog spoja. Kombinovanjem uticaja položaja zareza u zoni uticaja toplote (koren i lice) sa uticajem temperature na suprotnim krajevima spoja, dobijeni su značajno različiti rezultati za svaku epruvetu, iako su sve isečene iz iste ploče. Time je pokazano da gorepomenuti faktori imaju značajan uticaj na zamorno ponašanje, kao i da ovi koeficijenti mogu značajno da variraju u zavisnosti od položaja zareza, kao i unete količine toplote.

### **5.1.1 Osobine čelika P460NL1**

U ovom delu su ukratko prikazane mehaničke osobine čelika P460NL1, kao i njegov hemijski sastav, u Tabelama 5.1 i 5.2. Iz tabele 5.1 se jasno može videti da je u pitanju mikrolegirani niskouglenični čelik, sa dodatkom niobijuma i titana kako bi se usitnilo zrno [71] i postigle poboljšane mehaničke karakteristike. Takođe se može videti da su nečistoće (fosfor i sumpor) prisutne u dozvoljenim granicama.

Tabela 5.1 Hemijski sastav čelika P460NL1 u procentima (%)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr
0.16	0.39	1.42	0.007	0.003	0.03	0.0055	0.04
Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	B	
0.093	0.10	0.038	0.67	0.03	0.098	0.0003	

\*Ukupan sadržaj Nb, Ti i V mora biti maksimalno 0.22%

Tabela 5.2 Mehaničke osobine čelika P460NL1

Debljina (mm)	Granica tečenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Elongacija %
≤ 16	≥ 460	570-720	≥ 17
16 - 40	≥ 445	570-720	≥ 17
40 - 60	≥ 430	570-720	≥ 17
60 - 100	≥ 400	540-710	≥ 17

Debljina ploče zavarene za potrebe eksperimenata u okviru ove disertacije je izosila 14 mm, tako da su mehaničke osobine imale vrednosti u rasponim datim u drugom redu tabele. Ove vrednosti su preciznije određene tokom eksperimenata u okviru rada prikazanog u [72].

## 5.2 Dodatni materijal - VAC 65 žica

Kao dodatni materijal odabrana je žica VAC 65, proizvođača Železarna Jesenice [73]. U pitanju je pobakrena ili nepobakrena žica, namenjeno zavarivanju u atmosferi zaštitnog gasa (MAG), sa nešto povećanim sadržajem silicijuma i mangana u odnosu na druge elektrode iz ove grupe, što omogućava dobijanje čistijeg šava, sa glatkim licem. Ovaj materijal je naročito pogodan za zavarivanje niskougljeničnih i niskolegiranih (kao i mikrolegiranih) čelika, čvrstoće do 640 MPa [73]. Ovakve karakteristike čine ovaj materijal idealnim u kombinaciji sa P460NL1 koji ispunjava sve gore navedene uslove. Žice se proizvode sa standardnim prečnicima za MAG postupak (0.8-1.6 mm), i mogu se koristiti u kombinaciji sa velikim brojem aktivnih gasnih smeša, između ostalog, i sa 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>, mešavinom koja je korišćena u ovom konkretnom slučaju.

Takođe treba pomenuti da je pri zavarivanju konstrukcija ove vrste (posuda pod pritiskom) praksa da se usvaja dodatni materijal koji će obezbediti mehaničke karakteristike osobine metala šava koje su iste kao ili nešto bolje od osnovnog materijala. Na osnovu tabela

prikazanih ispod, jasno se može videti da je to upravo ovde i slučaj, budući da je napon tečenja žice VAC 65 od 460 MPa pa nadalje, odnosno da ima vrednost jako slično naponu tečenja osnovnog materijala, za datu debljinu od 14 mm, definisanu u tabeli 5.2.

Tabela 5.3 Hemijski sastav žice VAC 65 u procentima (%) [73]

C	Si	Mn	P	S
0.08	1.0	1.70	<0.025	<0.025

Tabela 5.4 Mehaničke osobine čelika P460NL1 [72,73]

Granica tečenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Elongacija (%)	Žilavost na -40°C J
> 460	560-680	> 22	> 47

Iz tabele 5.4 se takođe može videti da ovaj materijal poseduju i dobru žilavost na temperaturi od -40°C, što je uticalo na njegov izbor, budući da se posude pod pritiskom izrađene od P460NL1 kao osnovnog materijala uglavnom i koriste za rad na nižim temperaturama, te se od njih očekuje da imaju dobru žilavost i u takvim uslovima. Više o samoj žilavosti ovih zavarenih spojeva će biti rečeno u narednim poglavljima, pri diskusiji rezultata eksperimentalnih ispitivanja, pre svega ispitivanja na instrumentiranom Charpyjevom klatnu.

### 5.3 Posude pod pritiskom za transport

Pri transportovanju tečnosti i gasova, prisutni su brojni rizici koji moraju biti uzeti u obzir kako bi se izbegli otkazi koji u većini slučajeva imaju katastrofalne posledice [24]. Kod posuda pod pritiskom, otkazi dolaze usled prisustva prslina, najčešće u zavarenim spojevima [74]. Kao što je pomenuto, prisustvo prslina u ovim slučajevima je neizbežno u određenoj meri (usled prirode zavarivanja kao procesa), pri čemu problem nastaje u slučajevima kada dođe do rasta prslina, koji dovodi do loma. Rast prslina u posudama pod pritiskom javlja se kao posledica faktora vezanih za opterećenje, kao i sredinu u kojoj se posuda nalazi. Ovo je naročito izraženo kod transporta opasnih materija, poput amonijaka, budući da je u takvim slučajevima posuda pod pritiskom izložena, sa jedne strane, dinamičkom opterećenju (što dovodi do zamora koji veoma nepovoljno utiče na vek ovakvih konstrukcija) i, sa druge strane, korozivnom uticaju samog amonijaka. Kombinacija ova dva faktora može dovesti do

katastrofalnih posledica i stoga je neophodno obezbediti posude pod pritiskom najvećeg kvaliteta u cilju bezbednog transporta amonijaka. U tu svrhu, potrebno je ispuniti sledeće uslove [74]:

- da na zavarenoj konstrukciji koja treba da se pusti u rad nema grešaka, ili da su prisutne greške u dozvoljenim granicama, u skladu sa odgovarajućim standardom, pri čemu se prsline (dovoljno velikih dimenzije da se mogu otkriti primenom metoda ispitivanja bez razaranja) u svakom slučaju nedozvoljene
- da su mehaničke osobine i mikrostruktura upotrebljenih materijala detaljno definisane i da je poznat uticaj njihove heterogenosti na konstrukciju izloženu odgovarajućim uslovima opterećenja i uticaju okoline.

Mehanika loma se najčešće koristi upravo u cilju utvrđivanja da li zavarene konstrukcije ispunjavaju gore navedene uslove, i na osnovu određivanja odgovarajućih parametara se dolazi do zaključaka o preostalom radnom veku, kao i o eventualnoj potrebi za reparacijom. Ovo se posebno odnosi na zavarene spojeve, koji usled svoje heterogenosti predstavljaju najkritičnija mesta na konstrukciji, uprkos činjenici da se u većini slučajeva teži ka tome da sam zavareni spoj (metal šava) ima mehaničke karakteristike koje su bolje ili iste kao karakteristike osnovnog metala.

## **5.4 Tehnologija zavarivanja**

U ovom delu poglavlja vezanog za korišćene materijale će biti opisan proces izbora odgovarajuće tehnologije zavarivanja, kao i postupak zavarivanja, uz uvodni deo u kojem će biti objašnjeni neki pojmovi vezani za samo zavarivanje.

### **5.4.1 Uopšteno o zavarivanju**

Zavarivanje predstavlja proces spajanja materijala, najčešće metala (poput čelika i aluminijuma) i plastika, uglavnom topljenjem radnih komada i dodavanjem materijala nakon čega se hlađenjem dobija zavaren spoj [75]. Pri ovakvim procesima dolazi do značajnih promena u hemijskim sastavima i mikrostrukturama upotrebljenih materijala, i kao rezultat se dobija heterogena kombinacija materijala, kod koje se mogu izdvojiti sledeće oblasti:

- Osnovni materijal (OM) - materijal koji se spaja zavarivanjem, pojam se konkretno odnosi na onaj deo radnog komada koji nije zahvaćen promenama prouzrokovanim samim procesom zavarivanja i koji zadržava svoje mehaničke osobine.
- Metal šava (MŠ) - oblast zavarenog spoja u kojoj su spojeni radni komadi od osnovnog (ili u nekim slučajevima osnovnih) materijala, u kojoj dolazi do topljenja i kasnije hlađenja.
- Zona uticaja toplote (ZUT) - "prelazna" oblast između osnovnog materijala i metala šava, u kojoj je prisutan delimičan uticaj promena izazvanih topljenjem i hlađenjem zavarenog spoja i koja se sastoji od nekoliko zona različitih mikrostruktura (u zavisnosti od broja prolaza), o čemu će kasnije biti više reči.

Zavarivanje kao način spajanja materijala se prvi put javilo još u bronzanom i gvozdenom dobu, naravno u znatno drugačijem obliku. Tokom srednjeg veka kovači su spajali metalne delove čekićem u zagrejanom stanju, ali je tek sa industrijskom revolucijom u 19-tom veku zavarivanje počelo da se primenjuje u današnjem obliku, najviše zahvaljujući otkriću metalnih elektrodi i električnog luka.

Pored električnog luka, zavarivanje se može izvesti i primenom drugih izvora energije (toplote), poput gasnog plamena, ultrazvukova, lasera, plazme, elektronskog snopa, difuzije, eksplozije, kao i mešanjem trenjem (ova metoda, koja se sve više primenjuje u poslednje vreme, predstavlja jedan od primera zavarivanja pri kojem ne dolazi do topljenja materijala [76,77], što ima neke značajne prednosti, pre svega u smislu odsustva zone uticaja toplote iz zavarenog spoja). Od svih navedenih metoda, elektrolučno zavarivanje je najrasprostranjenije.

Postoji veliki broj različitih postupaka zavarivanja električnim lukom, u zavisnosti od tipa zaštitne atmosfere koji se koristi kako bi se sprečile reakcije istopljenog materijala sa okolinom (u tu svrhu se koriste CO<sub>2</sub> ili inertni gasovi - ili kombinacija oba, prašak, troska...). Kod ovih postupaka se uspostavlja električni luk između osnovnog materijala i elektrode, pri čemu se istopljeni metal prenosi sa elektrode u zavareni spoj. U zavisnosti od toga da li je elektroda na negativnom polu, a radni komad na pozitivnom, ili obrnuto, razlikujemo zavarivanje jednosmernom strujom direktne, odnosno indirektno polarnosti. U nekim

slučajevima je moguće koristiti i naizmjeničnu struju, iako se to u principu izbegava usled pogoršane stabilnosti električnog luka prouzrokovane stalnim menjanjem mesta polova i kraktotrajnim gašenjem luka, odnosno njegovim ponovnim uspostavljanjem. Temperatura u električnom luku ide i preko 7000°C, čime se obezbeđuje topljenje osnovnog i dodatnog materijala. U ove postupke, između ostalih spadaju [78]:

- Ručno elektrolučno zavarivanje (Manual metal arc welding - MMA), u narodu poznatije kao E postupak.
- Automatsko elektrolučno zavarivanje (Submerged arc welding - SAW), odnosno zavarivanje pod praškom (EPP)
- Zavarivanje u atmosferi zaštitnih gasova (Metal Active i Metal Inert Gas - MIG i MAG postupci), koje se najčešće koristi u praksi usled velike produktivnosti i relativno jednostavne obuke.
- Zavarivanje punjenom žicom (Flux Core Arc Welding - FCAW)
- Zavarivanje sa elektrodom od tungstena (Tungsten Inert Gas - TIG), kod kog se ne topi elektroda, i koje daje visok kvalitet zavarenog spoja.

#### **5.4.2 Uticaj heterogenosti na zavareni spoj**

Kao što je gore pomenuto, tokom zavarivanja u većini slučajeva dolazi do topljenja materijala koji se spajaju usled dostizanja visokih temperatura, što za posledicu ima značajne promene u mikrostrukturi materijala u i oko samog zavarenog spoja. Pri tome, promena stanja kao i deformacije do kojih dolazi tokom topljenja i kasnijeg hlađenja rezultiraju u prisustvu zaostalih napona, koji se uvek moraju uzeti u obzir kada se definiše opterećenje kojem će zavareni spoj biti izložen, s obzirom da ovi naponi mogu dostići veoma visoke vrednosti (u nekim slučajevima idu čak i do granice tečenja materijala) [79]. Zaostali naponi u zavarenim spojevima su neizbežni, ali se primenom određenih postupaka, poput predgrevanja, naponskog žarenja, izbora odgovarajuće geometrije i unošenja pritisnih napona pomoću odgovarajuće savremene opreme naročito prilagođene ovoj primeni (čekića) [79]. Treba naglasiti da je zaostale napone nemoguće u potpunosti ukloniti, već se gorenavedenim



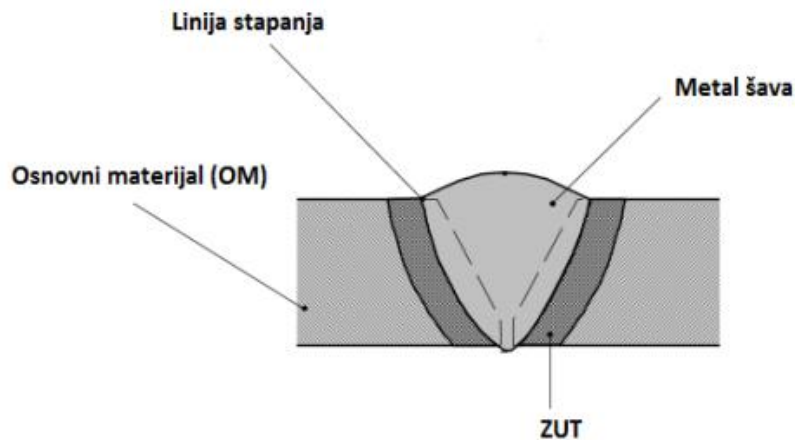
postupcima oni preraspodeljuju u zavarenom spoju na povoljniji način, čime se izbegavaju potencijalne koncentracije napona, u kojima bi mogle da se jave prsline. Zbog same prirode procesa zavarivanja i fizičkih i hemijskih promena koje se odvijaju u zavarenom spoju, razne vrste grešaka su uvek prisutne, u manjoj ili većoj meri. Stoga pri izboru postupka zavarivanja treba voditi računa o tome kakve sve greške bi mogle da se jave i na koji način se one mogu smanjiti ili u nekim slučajevima eliminisati. Stoga je uvek neophodno utvrditi da li su otkrivene greške u standardom propisanim granicama, koje pre svega zavise od zahtevanog kvaliteta spoja, odnosno od uslova u kojima se odvija eksploatacija date konstrukcije. Takođe, nisu sve greške podjednako opasne, štaviše mnoge od njih neće imati značajan uticaj na integritet zavarenog spoja. Najopasnije su svakako prsline, i njihovo prisustvo i ponašanje je stoga u fokusu oblasti mehanike loma. Kod posuda pod pritiskom, ovi uslovi su najčešće veoma zahtevni, s obzirom na potencijalno katastrofalne posledice otkaza takvih posuda. Primera radi, kod zavarenih spojeva koji su izloženi zamoru, uvek se zahteva potpuno uklanjanje bilo kakvog nadvišenja.

Prsline, koje će biti tema ovog istraživanja, su neizbežne pri zavarivanju, tako da o njima treba naročito voditi računa, kako bi se izbegle situacije u kojima bi one mogle da se jave (ili u slučaju već postojećih da krenu da rastu). Čak i mikro-prsline mogu imati poguban uticaj na integritet konstrukcije ukoliko krenu da rastu i spoje se međusobno, čime nastaju mnogo veći diskontinuiteti u strukturi. Prsline mogu biti izazvane različitim faktorima, poput zaostalih napona, raznih vrsta korozije, prisustva vodonika u zavarenom spoju, itd. Stoga je neophodno, nakon procesa zavarivanja, kontrolisati spojeve primenom metoda bez razaranja, poput ultrazvuka, penetranata, magnetnih čestica itd [80]. Procena ponašanja prsline pri uslovima eksploatacije je od velikog značaja pri određivanju preostalog radnog veka konstrukcije, kao i pri razmatranju mogućnosti da se taj vek produži što je više moguće.

Pod zavarenim spojem se podrazumeva konstruktivna celina, prikazana sl. 5.1, koja se sastoji od sledećih oblasti, od koje svaka ima karakterističnu mikrostrukturu, koja zavisi od izabranog materijala i definisane tehnologije zavarivanja:

- Osnovnog metala (OM), koji većim delom ostaje nepromenjen tokom samog postupka zavarivanja.

- Metala šava (MŠ), kod koga se razlikuju lice šava, naličje šava, koren šava i ivica šava. Metal šava se formira topljenjem, mešanjem i očvršćavanjem kako dodatnog, tako i osnovnog materijala.
- Zone uticaja toplote (ZUT), koja predstavlja deo OM u neposrednoj blizini MŠ, koji je pretrpeo značajne promene u svojoj mikrostrukturi usled visokih temperatura, koje nisu dovele do topljenja. Međutim, usled zagrevanja i hlađenja nakon zavarivanja, ova oblast ima značajno drugačiju strukturu u poređenju sa OM, štaviše u okviru samog ZUT-a su prisutne različite podoblasti, usled raspodele temperature tokom zavarivanja, koje neretko mogu imati potpuno drugačije ponašanje pri eksploataciji.



Slika 5.1 Osnovni delovi zavarenog spoja.

Kod postupaka zavarivanja topljenjem šav nastaje očvršćavanjem istopljenog osnovnog i dodatnog metala, ili samo osnovnog metala. Deo osnovnog metala, koji ulazi u sastav metala šava, zove se uvar. Osnovne dimenzije kod šava su širina, debljina i nadvišenje (ukoliko je prisutno).

### 5.4.3 Izbor materijala i postupka

Pre nego što se pristupi samom izvođenju zavarivanja, neophodno je definisati odgovarajuću tehnologiju, kako bi se osigurao traženi kvalitet dobijenih zavarenih spojeva. Izbor tehnologije često obuhvata izradu takozvanih tehnoloških karti (Welding procedure

specification - WPS), u kojima su definisani izbor osnovnog i dodatnih materijala na osnovu traženih mehaničkih svojstava, a u zavisnosti od hemijskog sastava i mikrostrukture, odgovarajućeg postupka, kao i brojnih parametara vezanih za zavarivanje, uključujući napon, jačinu i polaritet struje, brzinu zavarivanja, temperatura predgrevanja ukoliko je neophodno, u zavisnosti od grupe čelika prema zavarljivosti u kojoj pripada osnovni materijal. Pravilno definisanje tehnologije zavarivanja je od ključnog značaja za kvalitet zavarenog spoja, budući da u suprotnom dolazi do pojave različitih vrsta grešaka (najčešće prslina) u zavarenim spojevima, što često za posledicu ima potrebu za ponovnim zavarivanjem, kao što se može videti u literaturi [81-83]. U okviru narednog poglavlja, koje će se baviti eksperimentalnim ispitivanjima izvršenim za potrebe izrade ove doktorke disertacije će biti detaljno opisan sam postupak zavarivanja, kao i pripremu korišćenih materijala.

Zavarivanje ploča od finoznog mikrolegiranog niskougljeničnog normalizovanog čelika za posude pod pritiskom, P460NL1, sa dodatnim materijalom VAC 65 je dakle predstavljalo polaznu tačku za sve naredne eksperimente, koji su obuhvatili:

1. Merenje temperature tokom zavarivanja
2. Ispitivanje zatezanjem
3. Određivanje makro i mikrostrukture
4. Merenje tvrdoće
5. Ispitivanje žilavosti
6. Ispitivanje rasta zamorne prslina, savijanjem u tri tačke epruveta sa zarezom u zoni uticaja toplote.
7. Fraktografija

Sva ova eksperimentalna ispitivanja, kao i njihovi rezultati će biti detaljno prikazani u poglavlju 6.

## 6. Eksperimentalna ispitivanja

### 6.1 Uvodni deo

Za potrebe ovde prikazanog istraživanja su urađena eksperimentalna ispitivanja u laboratorijama u okviru Vojno-Tehničkog Insituta u Beogradu. Ovi eksperimenti obuhvatili su ispitivanje zatezanja, na kidalici SCHENCK-TREBEL nešto nešto, zatim ispitivanje žilavosti (Tinius Olsen i SCHENCK-TREBEL), kao i ispitivanje rasta zamorne prsline na RUMUL-ovom Fraktomatu 7609/213. Za potrebe ovih ispitivanje, zavarena ploča dimenzija 500x250x14 mm je isečena na ukupno 26 epruveta, kao što se može videti na slici 6.1 ispod.



Slika 6.1 Zavarena ploča sa obeleženim mernim mestima za kontaktno merenje temperature

Epruvete dobijene iz prethodno pomenute ploče su podeljene u devet grupa, u zavisnosti od dela ploče iz kojeg su isečene (u smislu temperature), položaja zarezova i vrste ispitivanja. Epruvete obeležene brojevima 1-6, kao i 21-26, su napravljene za potrebe

ispitivanja rasta zamorne prsline, pri čemu se prvih šest epruveta nalazilo na lokaciji 1.1 (bliže početku zavarenog spoja, gde su temperature bile niže), dok su drugih šest uzete sa suprotnog kraja ploče, gde su temperature bile primetno veće. U slučaju epruveta 1-3, odnosno 24-26, zarez urađen za potrebe zamornih ispitivanja se nalazio u ZUT-u, sa strane lica šava, dok je kod epruveta 4-6 i 21-23, zarez urađen sa korene strane, čime su dobijene četiri grupe epruveta.

Epruvete obeležene brojevima 7-12, odnosno 15-20, su upotrebljene za ispitivanje žilavosti primenom instrumentiranog Šarpijevog klatna, i takođe su podeljene u četiri grupe logikom koja je primenjena kod epruveta za zamorna ispitivanja – epruvete 7-12 su isečene iz dela ploče sa nižom temperaturom, pri čemu se kod epruveta 7-9 zarez nalazi sa strane lica, dok je kod epruveta 10-12 zarez sa korene strane; epruvete 15-17 su urađene sa zarezom sa korene strane, i isečene su iz oblasti više temperature, dok su epruvete 18-20 urađene sa zarezom sa strane lica, takođe iz dela ploče bližeg kraju zavarenog spoja.

Epruvete broj 13 i 14, iz sredine ploče, su isečene za potrebe ispitivanja osobina metala šava. S obzirom da je fokus ovog ispitivanja bio na Osnovnom Metalu i Zoni Uticaja Toplote, urađene su samo dve epruvete, koje su takođe ispitane na žilavost. Ovakav pristup je zasnovan na pretpostavci da će zamorna prsline svojim najvećim delom napredovati kroz zonu uticaja toplote i osnovni materijal, usled geometrije i položaja zareza u epruvetama.

Ispod je data tabela sa detaljnim opisom svih epruveta. Dimenzije svih epruveta su 55x10x10 mm, u skladu sa standardom ASTM E 1820:13 [31]. Dubina zareza je iznosila 1.4 mm, umesto uobičajenih 2 mm, kako bi se obezbedilo da se zarez zapravo nalazi unutar zone uticaja toplote.

Pored epruveta uzetih iz zavarene ploče, u skladu sa tabelom ispod, takođe su urađene i tri epruvete iz osnovnog materijala, obeležene sa OM 4, OM 5 i OM 6. Ove epruvete su ispitane na žilavost, na isti način kao i epruvete 7-12, odnosno 15-20.

Za potrebe ispitivanja tvrdoće u zoni uticaja toplote, kao i u celokupnom zavarenom spoju, isečene su dve epruvete, obeležene kao Uzorak 1 i Uzorak 2, sa suprotnih krajeva ploče, kako bi se ispitaio uticaj promene temperature duž spoja na raspodelu tvrdoće. Pored ovoga, cilj je bio i da se utvrdi da li i u kolikoj vrednosti tvrdoće prelaze propisanu granicu za

feritne niskouglenične čelike (350 HV) [84], usled činjenice da vreme hlađenja  $t_{8/5}$  nije u potpunosti ispoštovano pri nekim prolazima tokom zavarivanja.

**Tabela 6.1** Epruvete isečene iz ploča sa zavarenim spojem

Broj epruvete	Lokacija	Položaj zarez	Metoda ispitivanja
1	1.1	Lice	Zamor
2	1.1	Lice	Zamor
3	1.1	Lice	Zamor
4	1.1	Koren	Zamor
5	1.1	Koren	Zamor
6	1.1	Koren	Zamor
7	1.1	Lice	Žilavost
8	1.1	Lice	Žilavost
9	1.1	Lice	Žilavost
10	1.1	Koren	Žilavost
11	1.1	Koren	Žilavost
12	1.1	Koren	Žilavost
13	Metal šava	-	Žilavost
14	Metal šava	-	Žilavost
15	1.2	Koren	Žilavost
16	1.2	Koren	Žilavost
17	1.2	Koren	Žilavost
18	1.2	Lice	Žilavost
19	1.2	Lice	Žilavost
20	1.2	Lice	Žilavost
21	1.2	Koren	Zamor
22	1.2	Koren	Zamor
23	1.2	Koren	Zamor
24	1.2	Lice	Zamor
25	1.2	Lice	Zamor
26	1.2	Lice	Zamor

## 6.2 Postupak zavarivanja

Zavarene su dve ploče od čelika P460NL1, dimenzija 500x200 mm, debljine 14 mm, sa žicom VAC 65 kao dodatnim materijalom. Ploče su zavarene MAG postupkom, odnosno u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa, pri čemu se u tu svrhu koristi ili čisti ugljen-dioksid ili mešavina od 82% argona i 18% ugljen-dioksida. U ovom konkretnom slučaju, korišćena je mešavina, koju karakteriše mekši luk, gladak zavar i manje razbrizgavanje, usled prenosa

materijala u sitnim kapljicama (mlazu) u poređenju sa zavarivanjem čistim ugljen-dioksidom. Uloga ugljen-dioksida u mešavini je i da poboljša geometriju zavarenog spoja, budući da čist argon daje neodgovarajuće uvarivanje, karakterističnog prstastog oblika [85], dok CO<sub>2</sub> obezbeđuje širi uvar. Primenom ovog postupka se dobijaju zavareni spojevi povišene čvrstoće i žilavosti, stoga je MAG pogodan za tanke ploče od niskolegiranih i niskougljeničnih čelika. S obzirom da je čelik P460NL1 upravo mikrolegirani čelik povišene čvrstoće i žilavosti, MAG postupak se nametnuo kao logičan izbor. Pri tome treba napomenuti i da je ovo jedini postupak pri kome je bilo moguće meriti i pratiti sve parametre zavarivanja, uključujući promenu temperature u zavarenom spoju tokom zavarivanja, što je takođe doprinelo njegovom izboru, budući da i MIG postupak inače daje veoma slične zavarene spojeve [78], kao i da je izabrani MAG postupak jeftiniji. Mogućnost primene jeftinijeg zaštitnog gasa je upravo posledica mikrolegiranosti čelika, odnosno činjenice da su legirajući elementi koji bih zahtevali primenu potpuno inertnog gasa prisutni u zanemarljivo malim količinama (reaktivni metali poput Ti, Nb i Zr) [71]. Dakle, može se zaključiti da je MAG postupak odabran na osnovu svojih prednosti vezanih za zavarivanje čelika iz grupe 1.3, kojoj pripada predmetni P460NL1, kao i zbog cene i jednostavnosti u poređenju sa srodnim postupcima, odnosno mogućnosti detaljnog praćenja promene parametara zavarivanja tokom samog procesa. Pri MAG postupku, osnovni parametri koje se definišu su napon i brzina dovođenja žice, kao i jačina struje, koja zavisi od prečnika upotrebljene žice [86]. Pri zavarivanju MAG postupkom, uvek se koristi jednosmerna struja indirektno polarnosti, pri čemu je izvor stuje sa blagopadajućom karakteristikom, čime se obezbeđuje efekat samoregulacije električnog luka (pri promenama dužine luka dolazi do povećanja ili smanjenja jačine struje, koja je obrnuto proporcionalna dužini, što za rezultat ima povećanje/smanjenje brzine topljenja žice, čime se luk ponovo vraća na potrebnu dužinu [87]). Urađeno je ukupno 6 prolaza (koreni + 5 prolaza popune), pri čemu je potrebno naglasiti da su prva četiri rađena sa prekidima (na mestima gde je ostavljen neprovaren koren), dok su poslednja 2 prolaza popune urađena neprekidno. Zavareni spoj je urađen u obliku V žleba, usled dovoljno male debljine, kao i činjenice da se ovakvi žlebovi često koriste pri izradi posuda pod pritiskom iz praktičnih razloga (osim ukoliko na posudi postoji revizioni otvor ili ako stvarno mrzimo zavarivača).

## 6.2.1 Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja koji su odabrani u ovom slučaju su prikazani u tabeli 6.2. Ovi parametri su mereni pomoću uređaja Kemppi ARC Q [88].

**Tabela 6.2** Parametri zavarivanja za odabrani postupak (MAG).

Zavar	Temperatura predgrevanja/ međuprolaza °C	Jačina struje I (A)	Napon (V)	Brzina zavarivanja $v_z$ (mm/sec)	Toplota (KJ/mm)
Koren	50	114	17.8	2.36	0.69
Popuna I	48	171	20.2	3.45	0.80
Popuna II	55	233	27.0	6.02	0.84
Popuna III	59	238	26.7	4.90	1.03
Popuna IV	60	237	26.2	4.24	1.17
Popuna V	50	238	25.8	4.53	1.08

Na slici 6.2 se može videti postupak obaranja ivica ploča, kako bi se dobila željena geometrija zavarenog spoja (u pitanju je V spoj). Priprema ploča i sam postupak su izvedeni unutar pogona GOŠA u Smederevskoj Palanci, slika 6.2.





## Slike 6.2 Obaranje ivica ploča

Sam postupak zavarivanja izveden je u 6 prolaza, pri čemu su brzina zavarivanja i jačina struje date u prethodnoj tabeli. U korenorn prolazu su ostavljena dva neprovarena mesta, za potrebe određivanja uticaja temperature na mikro-strukturu i ponašanje pri zamoru. Takođe je potrebno napomenuti da su prva 4 prolaza (računajući i koreni) urađena sa prekidima, dok su poslednja dva urađena izjedna, usled čega su vrednosti parametara zavarivanja za prolaze sa prekidima usvojene kao proseci merenja svakog segmenta. Ploča je predgrejana na temperaturu od oko 50°C, i nakon svakog prolaza je sledela pauza dok se temperatura zavarenog spoja ne spusti ponovo do te granice. Temperatura predgrevanja je određena metodom zasnovanom na dobro poznatoj Seferijanovoj formuli, koja je zasnovana na tzv. ekvivalentu ugljenika (CE) [72]:

$$CE = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} (\%) \quad (6.1)$$

Ekvivalent ugljenika u ovom slučaju iznosi 0.327, što znači da je u pitanju čelik relativno dobre zavarljivosti ( $CE < 0.45$ ). Ispod je prikazan proračun temperatura predgrevanja, odnosno međuprolaznih temperatura (koje su u ovom slučaju bile jednake) uzimajući u obzir debljinu ploče ( $d = 14$  mm), sadržaj vodonika ( $HD = 5$  ml/100 gr), količinu unite toplote i ostale parameter zavarivanja (napon, jačinu struje, brzinu zavarivanja, kao i efikasnost primenjenog postupka zavarivanja,  $\eta = 0.8$  [89]). Temperatura u zavisnosti od ekvivalenta ugljenika data je sledećom formulom:

$$T_{pCE} = 750 \cdot CE - 150 = 95.3^\circ C \quad (6.2)$$

Temperature predgrevanja na osnovu debljine ploče, odnosno sadržaja vodonika su određene na sledeći način:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d / 35) - 110 = -49.2^\circ C \quad (6.3)$$

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0.35} - 100 = 8.9^\circ C \quad (6.4)$$

Količina unete toplote je određena prema opšte poznatoj formuli [90], koja je data ispod:

$$Q = \frac{\eta \cdot I \cdot U}{v_z \cdot 1000} = 1.25 \frac{kJ}{mm} \quad (6.5)$$

Odgovarajuće vrednosti količine unete toplote za koreni prolaz, kao i za prolaze popune su iznosile  $Q_{koren} = 1.25 \text{ kJ/mm}$  i  $Q_{popuna} = 1.32 \text{ kJ/mm}$ .

Temperature predgrevanja u zavisnosti od količine unete toplote za koreni prolaz i prolaze popune su date izrazima (5.6) i (5.7), respektivno:

$$T_{pQ,koren} = (53 \cdot CE - 32) \cdot Q_{koren} - 53 \cdot CE + 32 = -3.6^\circ C \quad (6.6)$$

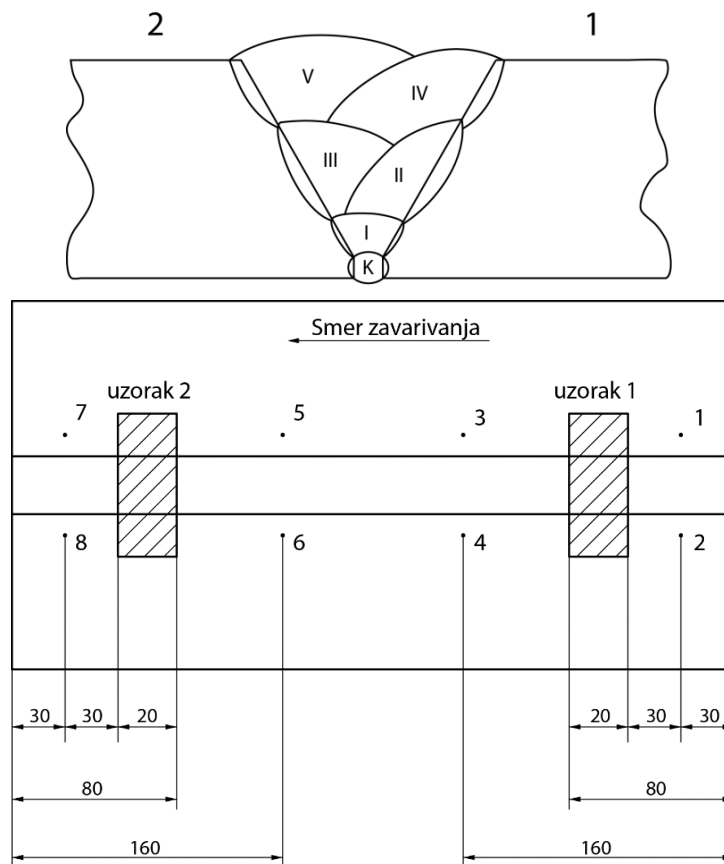
$$T_{pQ,popuna} = (53 \cdot CE - 32) \cdot Q_{popuna} - 53 \cdot CE + 32 = -4.7^\circ C \quad (6.7)$$

Sabiranjem svih prethodno dobijenih vrednosti temperatura predgrevanja (jednačine 6.2-6.4, 6.6, 6.7), dobijene su konačne temperature predgrevanja za koreni prolaz, kao i za prolaze popune:

$$\begin{aligned} T_{p,koren} &= T_{pCE} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ,koren} = 51^\circ C \\ T_{p,popuna} &= T_{pCE} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ,popuna} = 50^\circ C \end{aligned} \quad (6.8)$$

U ovom slučaju, predgrevanje je od velikog značaja za sam proces zavarivanja, s obzirom da se na taj način smanjuje razlika u temperaturi ploča pre i posle svakog prolaza, čime se takođe smanjuje i brzina hlađenja. Sporije hlađenje omogućava formiranje mikrostruktura koje karakteriše povećana žilavost [78], što je i bio jedan od ciljeva ovog istraživanja. Između ostalog, potreba za dobijanjem izrazito žilavog zavarenog spoja je uslovlila i izbor osnovnog materijala, kao što je već rečeno u uvodnom delu ovog poglavlja. Potrebno je napomenuti da su pre svakog prolaza zavareni probni spojevi kako bi se utvrdilo da li su izabrani parametri zavarivanja odgovarajući. Na slici 6.3 je prikazan raspored prolaza pri zavarivanju, kao i smer zavarivanja, uz odgovarajuća rastojanja mernih mesta za temperature, dok se na slikama 6.4 i 6.5 mogu videti ukrućenja zavarena sa donje strane ploča, odnosno aparat za MAG zavarivanje, proizvođača KEMPPI (Finska) [88], sa priključenim aparatom za praćenje parametara zavarivanja tokom postupka, koji daje veoma jasne i pregledne podatke vezane za temperaturu, brzinu zavarivanja, jačinu struje i napon (i njihove promene u zavisnosti od vremena). Na slici 6.6 je prikazana priprema ploče za zavarivanje, odnosno predgrevanje. Usled dimenzija (pre svega debljine) ploče, kao i

upotrebljenog materijala, odnosno na osnovu određenih temperature predgrevanja, za ovaj proces je dovoljan bio brener, kako bi se postigla ravnomerno raspoređena željena vrednost temperature predgrevanja od  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ .



Slika 6.3. Šema zavarivanja ploča sa korenim (K) i prolazima popune (I – V), gore; smer zavarivanja i položaji mernih mesta za temperature, dole.



Slike 6.4 Zavarena ukrućenja





Slike 6.5 Postavka zavarivanja (gore) i aparat za MIG postupak sa loggerom (dole)



Slike 6.6 Predgrevanje ploče

## 6.2.2 Određivanje vremena hlađenja $t_{8/5}$

Tokom zavarivanja ploča je merena temperatura u tačkama obeleženim kao što se može videti na slici 6.7, primenom kontaktnih i bezkontaktnih metoda. Cilj ovih merenja je bio da se utvrdi uticaj unosa toplote tokom postupka zavarivanja na vreme hlađenja  $t_{8/5}$ . Ova vrednost predstavlja vreme potrebno da se temperatura zavarenog spoja spusti sa  $800^{\circ}\text{C}$  na  $500^{\circ}\text{C}$ , i zavisi od sledećih parametara [91]:

- Unosa toplote
- Temperature predgrevanja
- Geometrije zavarenog spoja
- Debljine ploče



Slike 6.7 Položaji mernih mesta za temperaturu na zavarenoj ploči

Dosada se smatralo da je raspodela temperature u zavarenom spoju ravnomerna, i postupci za proračun vremena  $t_{8/5}$  su bili zasnovani na ovoj pretpostavci. Jedan od ciljeva merenja temperature tokom zavarivanja ploča u ovom slučaju je bio da se pokaže da temperatura menja svoju vrednost duž zavarenog spoja i da se vidi kakav eventualni uticaj ovakva neravnomerna raspodela ima na ponašanje zavarenog spoja, kao i na mikrostrukture različitih oblasti zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT). Stoga, pri sprovođenju eksperimenata vezanih za ispitivanje žilavosti i rasta zamorne prsline je i temperatura u različitim delovima ploče uzeta u obzir pri definisanju epruveti, kako bi se ispitalo da li su promene izazvane temperaturnim razlikama, poput različitih širina zone uticaja toplote sa suprotnih strana ploče, imale uticaja na ponašanje epruveta pri zamoru. O ovome će biti više reči u delu sa rezultatima ispitivanja zamora i žilavosti loma.

Takođe je potrebno naglasiti da su tokom korenog prolaza ostavljena dva neprovarena mesta, na rastojanju od 80 mm od krajeva ploče, kako bi razlika u temperaturi bila što jasnija. U daljem tekstu će lokacija neproverenog korena blizu početka zavarenog spoja biti



obeležavana oznakom Lokacija 1.1 (lokacija sa nižom temperaturom), dok će lokacija sa strane kraja zavarenog spoja biti obeležavana kao Lokacija 1.2 (lokacija sa višom temperaturom).

Što se samog vremena hlađenja tiče, ono je određeno na osnovu takozvane prelazne debljine osnovnog metala, odnosno debljine pri kojoj odvođenje toplote prelazi iz dvodimenzionalnog u trodimenzionalno, i koja je u ovom slučaju iznosila 18 mm [92]. Pošto je ova debljine očigledno veća od debljine predmetne ploče od 14 mm, usvojeno je da je odvođenje toplote dvodimenzionalno. U skladu sa tom činjenicom je određeno  $t_{8/5}$  na način prikazan ispod:

$$t_{8/5} = (4300 - 4.3T_p) \cdot 10^5 \cdot Q^2 / d \cdot \left[ \frac{1}{(500 - T_p)^2} - \frac{1}{(800 - T_p)^2} \right] \cdot F_2 \quad [\text{sec}] \quad (6.9)$$

pri čemu  $F_2$  predstavlja faktor oblika spoja, dok su ostale veličine prethodno definisane. Vremena hlađenja određena na ovaj način su iznosila:

- $t_{8/5} = 9.3$  s, za koreni prolaz
- $t_{8/5} = 10.3$  s, za prolaze popune

Ove vrednosti se uklapaju u vrednosti propisane standardima za niskouglenične mikrolegirane čelika [93], pri čemu se u ovom slučaju vrednosti nalaze na donjoj granici optimalnih usvojenih. Rezultati merenja temperatura će biti detaljnije prikazani u narednom delu disertaciju, poglavlju 8, zajedno sa rezultatima ostalih ispitivanja. Treba napomenuti da su ova merenja vezana za Uzorke 1 i 2, uzete iz prethodno definisanih lokacija 1.1 i 1.2, i da ove uzorke ne treba mešati sa epruvetama 1 i 2, koje su iskorišćene za ispitivanje savijanjem u tri tačke, a o kojima će biti reč u narednom poglavlju.



### 6.3 Raspodela temperature

Kao što je napomenuto u prethodnim poglavljima, tokom samog postupka zavarivanja su izmerene temperature u 8 prethodno definisanih tačaka. Ove tačke su raspoređene duž ivice žleba, i temperature u njima su merene primenom infracrvenog termometra, prethodno baždarenog uz pomoć kontaktnog termometra. Temperature ivice žleba na Uzorcima 1 i 2 (koji nisu isto što i prethodno pominjane Epruvete 1 i 2, koje su ispitivane savijanjem u tri tačke), uzetim sa lokacija 1.1 i 1.2 respektivno, su određeni interpolacijom na osnovu parova tačaka između kojih se odgovarajući uzorak nalazio. Rezultati ovako izvedenog merenja su dati u tabeli 6.7 za oba uzorka.

**Tabela 6.3** Temperature, količine unete toplote i vremena hlađenja  $t_{8/5}$  za uzorke 1 (lokacija 1.1) i 2 (lokacija 1.2)

Prolaz	Uzorak 1		
	Temperatura (°C)	Uneta toplota Q (kJ/mm)	Vreme hlađenja $t_{8/5}$ (sec)
Koren	94	0.69	3.4
Popuna I	105	0.80	4.9
Popuna II	113	0.84	5.6
Popuna III	112	1.03	8.4
Popuna IV	110	1.17	10.8
Popuna V	110	1.08	9.2

Prolaz	Uzorak 2		
	Temperatura (°C)	Uneta toplota Q (kJ/mm)	Vreme hlađenja $t_{8/5}$ (sec)
Koren	188	0.69	5.8
Popuna I	178	0.80	7.4
Popuna II	234	0.84	11.8
Popuna III	269	1.03	23.3
Popuna IV	230	1.17	22.2
Popuna V	230	1.08	19.0

Kao što se iz tabele može videti, vrednosti temperature su značajno više u slučaju uzorka 2, koji se nalazi bliže kraju ploče (u odnosu na smer zavarivanja), pri čemu su količine unete toplote identične usled ravnomernog režima zavarivanja tokom cele dužine spoja, odnosno zbog gotovo konstantnih vrednosti parametara zavarivanja koji utiču na količinu unete toplote ( $I$ ,  $A$ ,  $v_z$ ). Usled povišenih temperatura, **prouzrokovanih dodatnim zagrevanjem, unetim preko električnog luka**, vreme hlađenja  $t_{8/5}$  se takođe povećalo u slučaju lokacije 1.2,

odnosno Uzorka 2. Prosečna temperatura ivice žleba kod Uzorka 1 je oko 110°C, dok je u slučaju Uzorka 2 prosečna vrednost duplo veća, oko 220°C, pri čemu su ove razlike izraženije kod nekih prolaza, pre svega kod Popune III, gde je temperature u Uzorku 2 oko 2.5 puta veća u odnosu na Uzorak 1. Razlike u vremenima hlađenja varirale su od 51% (Popuna I) do 177% (Popuna III).

U daljem delu rezultata će fokus biti na uticaju ovih temperatura (pre svega u njihovoj razlici u slučaju ispitanih uzoraka, dok su same vrednosti manje bitne za celu priču) na veličinu pojedinih oblasti zavarenog spoja, pre svega na širinu ZUT-a, kod koje su primećene značajne razlike u pogledu ove dimenzije. Pretpostavljeno je da su ove razlike u dimenzijama oblasti određenih mikrostruktura dovele i do različitog ponašanja pri opterećenju na zamor, direktnim uticajem na rast prslina iniciranih u sitnozrnom ZUT-u.

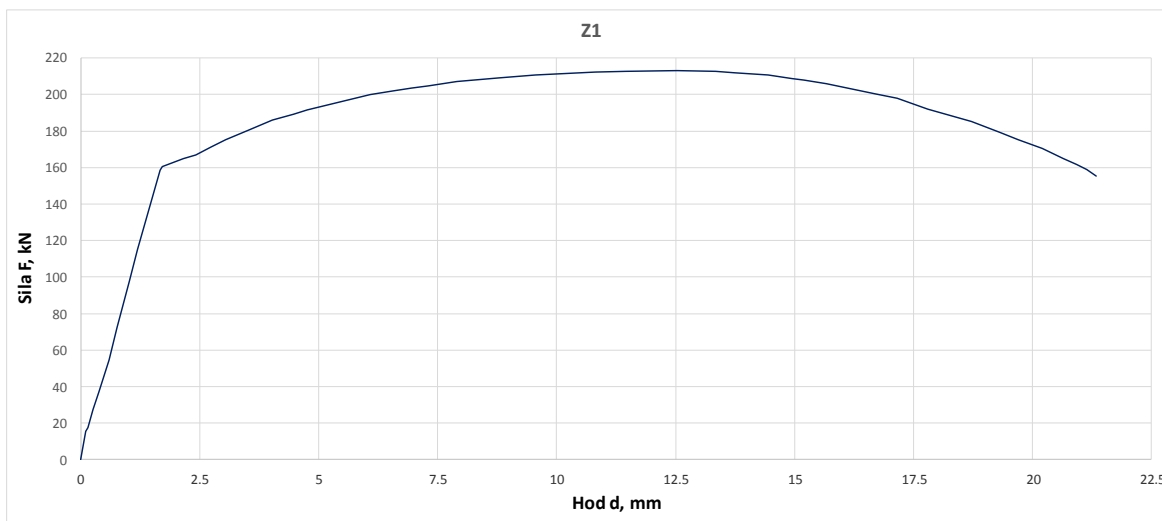
Što se tvrdoće tiče, različite vrednosti temperature ivice žleba u Uzorcima 1 i 2 nisu izazvale promenu u vrednosti maksimalne tvrdoće (koja je iznosila 362 HV 5 u oba slučaja). Sa druge strane, promena temperature je dovela do nešto različite raspodele tvrdoća, pri čemu su tvrdoće u metalu šava Uzorka 2 bile nešto veće u odnosu na odgovarajuće vrednosti u Uzorku 1. S obzirom na veću unetu količinu toplote kod Uzorka 2, i posledično proširenje zone uticaja toplote, došlo je do većeg stepena mešanja OM i DM, pri čemu je sadržaj ugljenika u metalu šava porastao (budući da je sadržaj C bio veći u osnovnom materijalu). Budući da tvrdoća čelika raste sa povećanjem procenta ugljenika, došlo je do očekivanog (iako ne preterano značajnog) porasta tvrdoće metala šava u odnosu na Uzorak 1.

Iz tabele 6.7 se može videti da su vremena hlađenja  $t_{8/5}$  manja od usvojenih vrednosti za sve prolaze osim završnog u slučaju Uzorka 1, dok su u slučaju Uzorka 2, vremena hlađenja manja od minimalne usvojene vrednosti samo za prva dva prolaza (koren i popuna I). Sa druge strane, njihove vrednosti u završnim slojevima (popune III-V) su iznad maksimalnih usvojenih vrednosti. Na osnovu ovoga je zaključeno da je za održavanje  $t_{8/5}$  u prethodno definisanim granicama neophodno korigovati temperature predgrevanja, pre svega za koreni prolaz i za prvi prolaz popune.

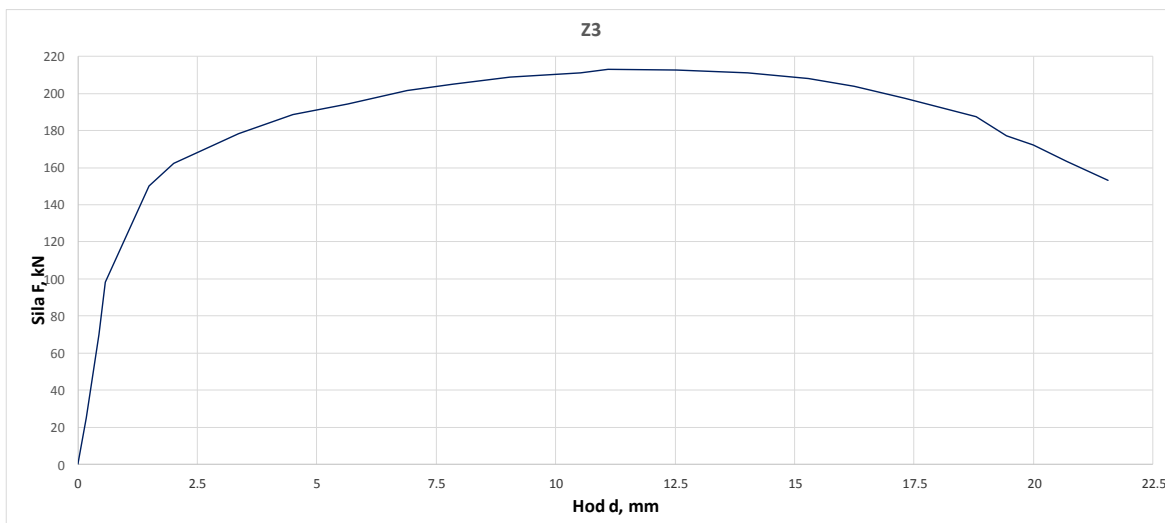
## 6.4 Ispitivanje zatezanjem

Pored 26 epruveta koje su ispitane na žilavost i zamor, urađene su i dve epruvete za zatezanje, sa poprečnim presekom 25x14 mm (površina poprečnog preseka od 350 mm<sup>2</sup>). Ispitivanje je izvršeno na kidalici SCHENCK-TREBEL, sa maksimalnom silom od 25 tona (250 kN). Ovo ispitivanje je izvršeno kako bi se odredile mehaničke osobine zavarenog spoja, na osnovu kojih je nakon toga urađena numerička analiza. U obzir su uzete osobine osnovnog metala, metala šava i zone uticaja toplote, uključujući modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, granicu tečenja i zateznu čvrstoću. Rezultati dobijeni za obe epruvete su prikazani na slikama 6.8 i 6.9 ispod, u obliku dijagrama sila-pomeranje. Urađene su ukupno tri epruvete, pri čemu su ispitane 2, označene sa Z1 i Z3, nakon čega je utvrđeno da su rezultati dovoljno merodavni i zadovoljavajući, tako da nije bilo potrebe da se ispita i preostala epruveta.

Maksimalne vrednosti sile na dijagramima su iznosile 212 kN za epruvetu Z1, odnosno 213 kN za epruvetu Z3, dok su sile koje su odgovarale granici tečenja iznosile 160 kN (Z1) odnosno 151 kN (Z3). U oba slučaja, do loma je došlo u oblasti osnovnog materijala, čime je potvrđeno da je zavareni spoj kvalitetno urađen. Iz prikazanih dijagrama se može videti da su ispitane epruvete pokazale dobru duktilnost, odnosno sposobnost plastične deformacije pri zateznom opterećenju.



Slika 6.8 Dijagrami sila-pomeranje i napon-deformacija za prvu epruvetu za zatezanje

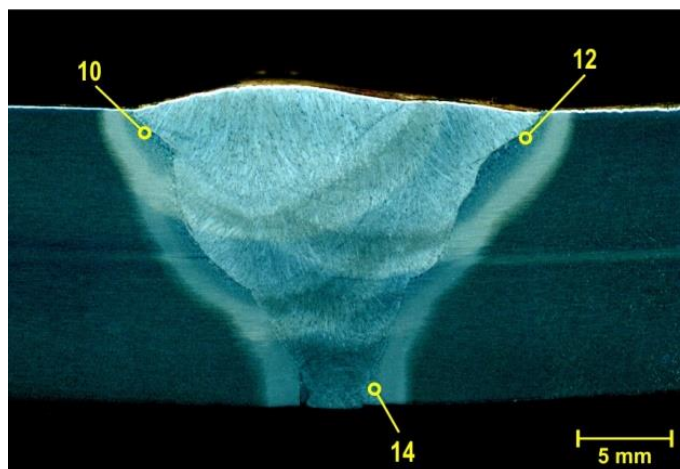


Slika 6.9 Dijagrami sila-pomeranje i napon-deformacija za drugu epruvetu za zatezanje

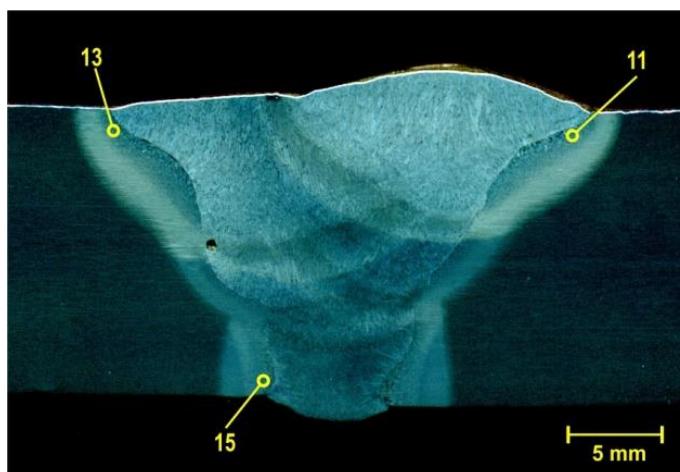
## 6.5 Makro- i mikrostrukture zavarenog spoja

Nakon što su završena ispitivanja zamornog rasta prslina, epruvete su polomljene na Šarpijevom klatnu kako bi se ispitale površine preloma i potom odredile mikrostrukture odgovarajućih oblasti zavarenog spoja. Ovaj deo eksperimenta je urađen sa ciljem da se ponašanje materijala pri rastu zamorne prslina poveže sa mikrostrukturama i da se utvrde eventualne razlike među njima prouzrokovane povećanim zagrevanjem na jednom kraju zavarene ploče, odnosno da se utvrdi uticaj raspodele temperature tokom zavarivanja na otpornost zavarenog spoja prema rastu zamorne prslina.

Ispitivanje makrostrukture je urađeno na Uzorcima 1 i 2, uzetim sa lokacija 1.1. i 1.2. Uzorci su pripremljeni brušenjem i nagrizanjem u Nitalu (3% rastvor). Dobijene makrostrukture su prikazane na slikama 6.10 i 6.11 ispod.



Slika 6.10 Makrostruktura uzorka 1



Slika 6.11 Makrostruktura uzorka 2

Sa ovih slika se može jasno videti uticaj temperature, odnosno ukupne unete količine toplote na dimenzije zavarenog spoja. U slučaju uzorka 2, kod kojeg su izmerene znatno više temperature, i MŠ i ZUT su приметно širi u odnosu na uzorak 1. Ukupna širina metala šava sa korene strane zavarenog spoja je najizraženija i kreće se od 1.2 do 2.2 mm, što predstavlja procentualno povećanje od 30 do 50% u odnosu na koren Uzorka 1. Razlike u širini lica zavarenog spoja su iznosile 1.8 do 3.8 mm, što je u odnosu na širinu Uzorka 1 predstavljalo povećanje od 10 do 20% u odgovarajućim delovima ove oblasti, dok su razlike u sredini šava znatn manje u poređenju sa stranama korena i lica.

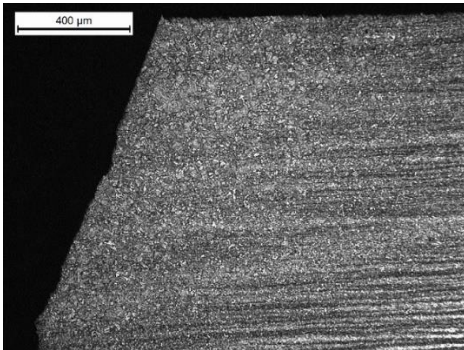
Zona uticaja toplote je pokazala još izraženije razlike u pogledu širine, pri čemu su one bile veće u korenom delu zavarenog spoja (što se jasno vidi na slikama). U ovom slučaju, povećanje je variralo od 60% do 100%, odnosno od 1.6 do 3.0 mm u korist Uzorka 2. Ove razlike su bile nešto manje u licu zavarenog spoja, sa vrednostima u intervalu od 1.8 do 2.4 mm, odnosno 30% do 45%, u odnosu na širinu lica zavarenog spoja Uzorka 1. Kao i kod metala šava, i ovde su razlike u dimenzijama (širini) najmanje izražene u srednjem delu zavarenog spoja, gledano u odnosu na debljinu. Najveća širina ZUT-a je izmerena na dubini 2-4 mm ispod površine osnovnog metala (slika 6.41, oblast ispod tačaka 11 i 13). Takođe je primećeno da su grubozrne oblasti zone uticaja toplote manje prisutne u Uzorku 1, u smislu da zahvataju manju površinu ZUT-a i da se prostiru da manje dubine u poređenju sa Uzorkom 2. Ovo je očekivano, s obzirom na veće temperature u Uzorku 2, koje su za posledicu imale izraženiji rast zrna u poređenju sa Uzorkom 1.

Na slikama 6.10 i 6.11 se takođe jasno mogu videti i pojedinačni prolazi pri zavarivanju, koji odgovaraju skici prikazanoj na slici 5.?. Potrebno je napomenuti da su dobijene slike makrostrukture upotrebljene kasnije kao osnova za numeričko modeliranje ponašanja epruveta opterećenih na zamor. Na osnovu izgleda realnog zavarenog spoja prikazanog na ovim slikama su definisane geometrije simuliranog zavarenog spoja za model u celini, pri čemu su oblik zone uticaja toplote i metala šava, za koje su definisane zasebne mehaničke osobine u okviru analize, definisani pravim linijama koje su aproksimirale stvaran izgled ovih oblasti, za oba uzorka. Ovo je urađeno kako bi se putanja kojom se kreće zamorna prsline prikazala što vernije u odnosu na realno stanje u epruvetama. Na kraju se od ovog pristupa odustalo, usled nemogućnosti softverskih paketa za PMKE da simuliraju model sa više parova vrednosti Paris-ovih koeficijenata.

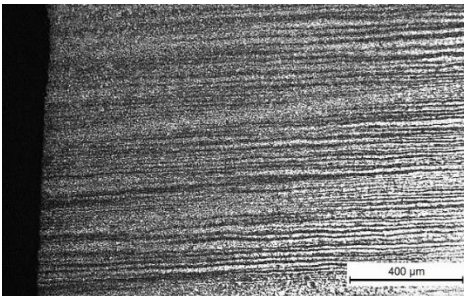
Ispitivanje mikrostruktura obuhvatilo je lomljenje epruveta sa zarezom za savijanje u tri tačke (1-6, 21-26), nakon čega su prelomne površine snimljene elektronskim mikroskopom. U okviru ovog ispitivanja su određene i mikrostrukture Uzorka 1 i 2, na sličan način, pri čemu je takođe urađeno i nagrizanje Nitalom (5% rastvor u ovom slučaju). Mikrostrukture Uzorka 1 i 2 su pregledane metalografskim mikroskopom "Letiz".

Na slikama 6.12-6.19 su prikazane mikrostrukture za uzorke 1, 4, 5, 6, 21, 22, 23 i 26, za različite oblasti zavarenih spojeva, pri uvećanju od 500x, dobijene pomoću optičkog

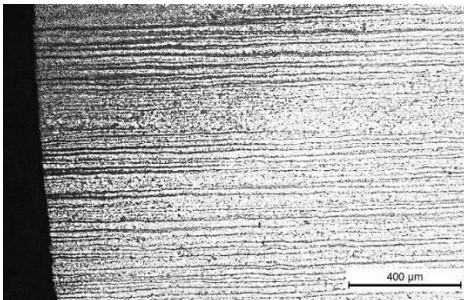
mikroskopa. Takođe se mogu videti i slike sa elektronskog mikroskopa za neke od ovih epruveta (slike 6.20-6.23).



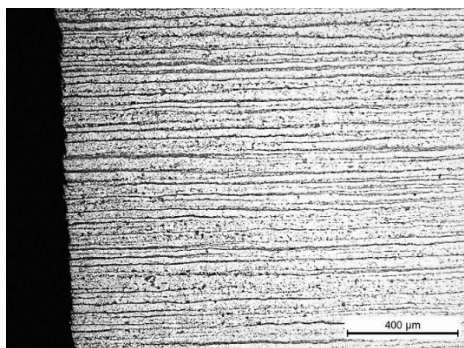
Mikrostruktura ZUT u zarezu  
(Gornji + donji beinit)



Mikrostruktura ZUT ispod zareza  
(Gornji + donji beinit)



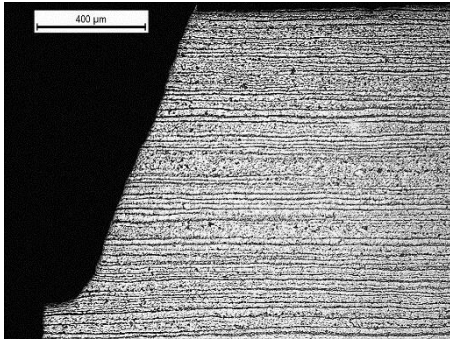
Mikrostruktura prelaza ZUT/OM  
(Perlit + Ferit + Beinit)



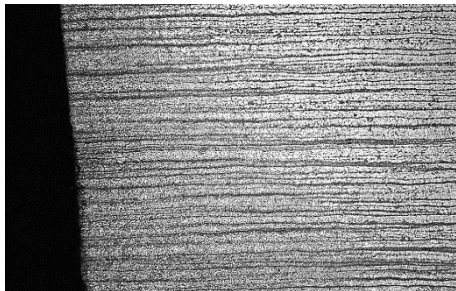
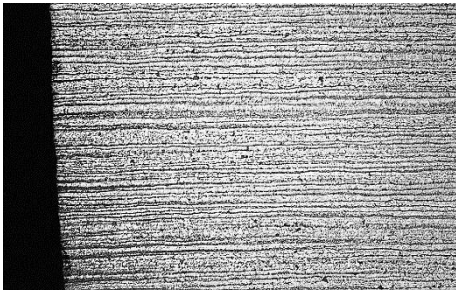
Mikrostruktura osnovnog materijala  
(Perlit + Ferit)

Slika 6.12 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 1 (lokacija 1.1, zarez u licu), uvećanje 500x

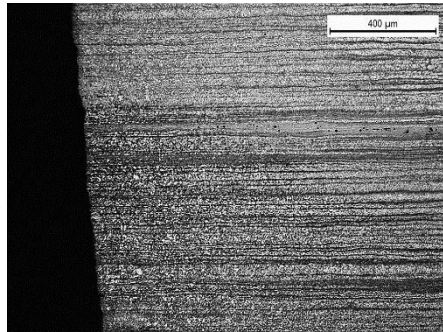




Mikrostruktura OM u zrezu  
(Ferit + Perlit)



Mikrostruktura OM i ZUT  
(Ferit + Perlit + donji Beinit)



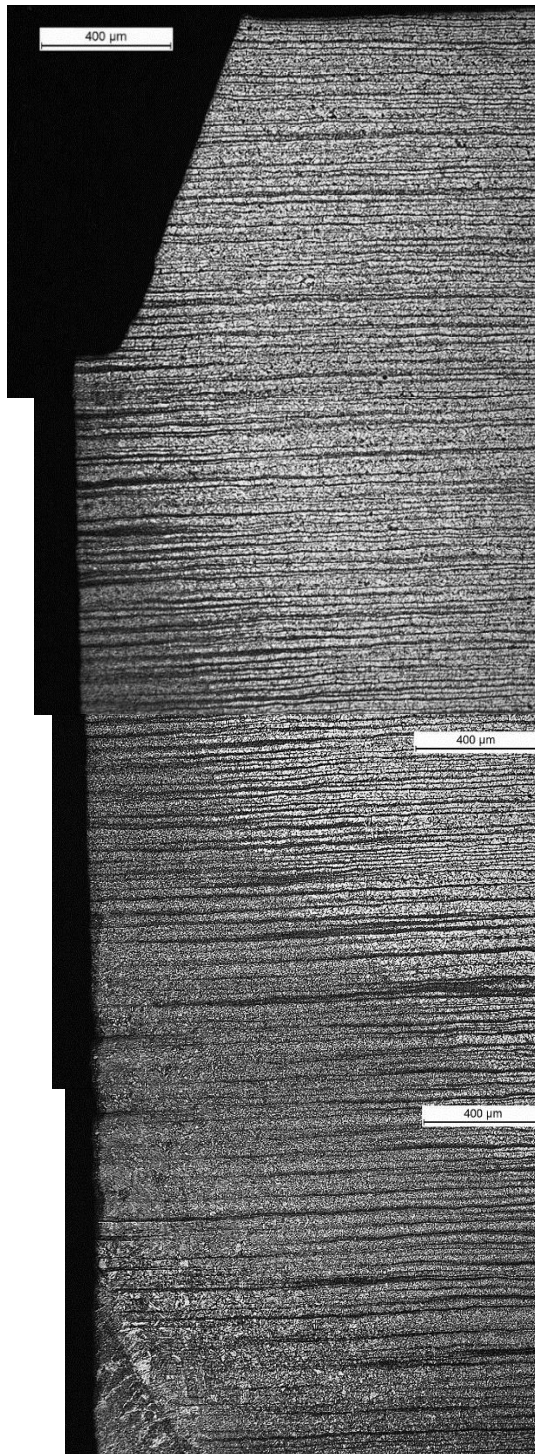
Mikrostruktura ZUT  
(donji i gornji Beinit)



Mikrostruktura ZUT + MŠ  
(donji i gornji Beinit)



Slika 6.13 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 4 (lokacija 1.1, zarez u korenu), uvećanje 500x



Mikrostruktura OM i ZUT  
(Perlit + Ferit + donji Beinit)

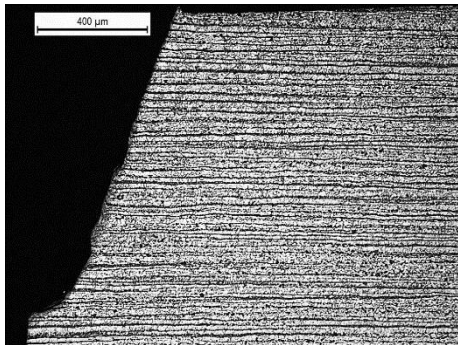
Mikrostruktura OM i ZUT  
(Perlit + Ferit + donji Beinit)

Mikrostruktura ZUT  
(gornji Beinit + donji Beinit)

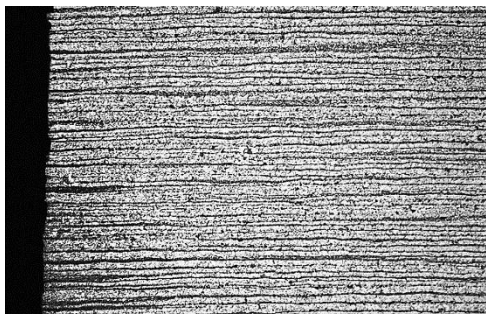
Mikrostruktura ZUT i MŠ  
(gornji beinit + donji beinit)

Slika 6.14 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma

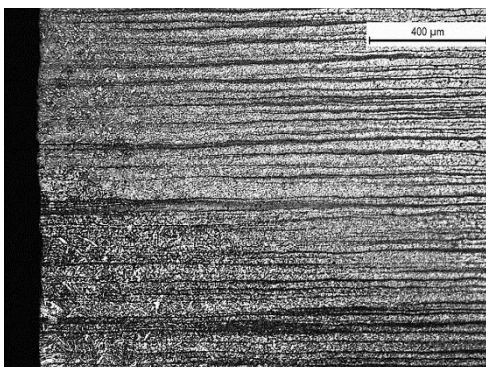
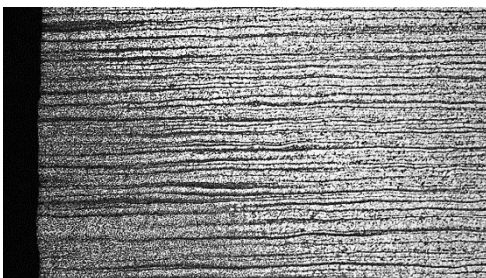
epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 5 (lokacija 1.1, zarez u korenu), uvećanje 500x



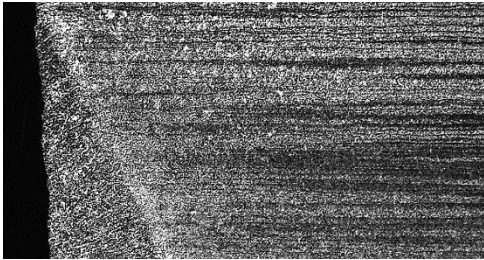
Mikrostruktura osnovnog material  
(Ferit + Perlit)



Mikrostruktura OM + ZUT  
(Ferit + Perlit + donji Beinit)

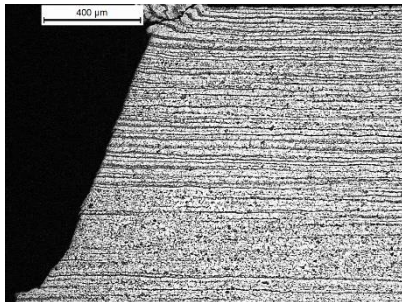


Mikrostruktura ZUT  
(donji + gornji Beinit)

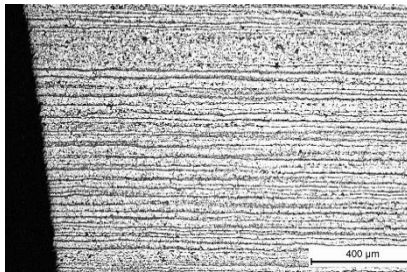


Mikrostruktura ZUT i MŠ  
(Beinit)

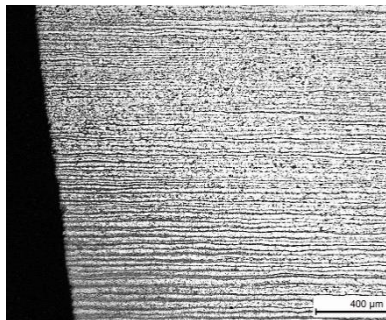
Slika 6.15 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 6 (lokacija 1.1, zarez u korenu), uvećanje 500x



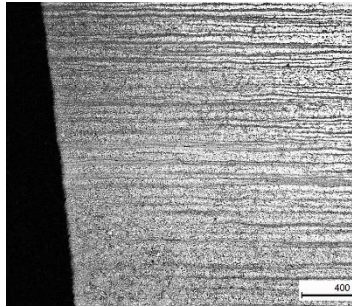
Mikrostruktura osnovnog materijala  
(Perlit + Ferit)



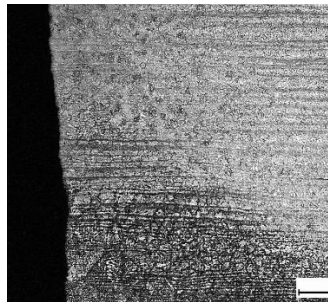
Mikrostruktura OM ispod zareza  
(Gornji + donji Beinit)



Mikrostruktura prelaza ZUT/OM  
(Perlit + Ferit + donji Beinit)

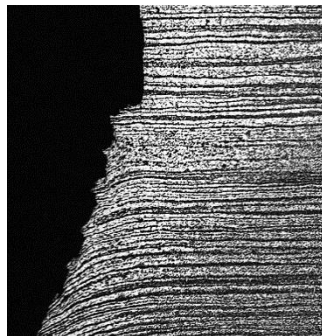
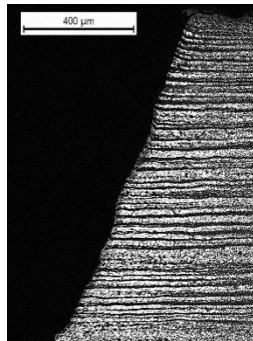


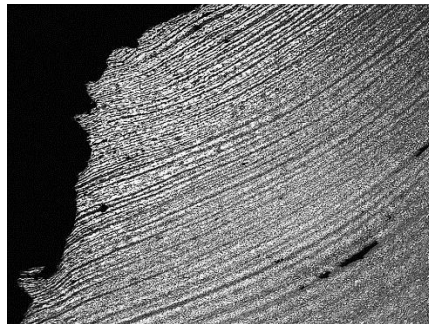
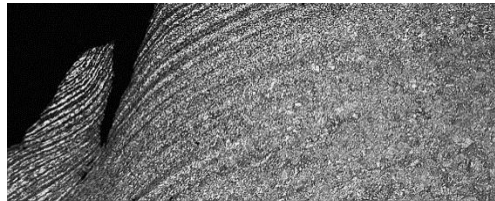
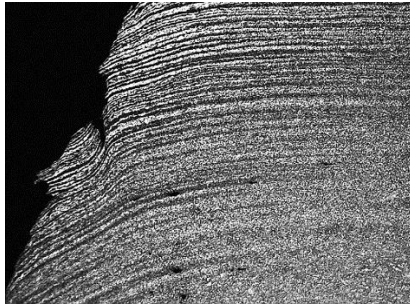
Mikrostruktura prelaza ZUT/OM  
(Perlit + Ferit + donji Beinit)



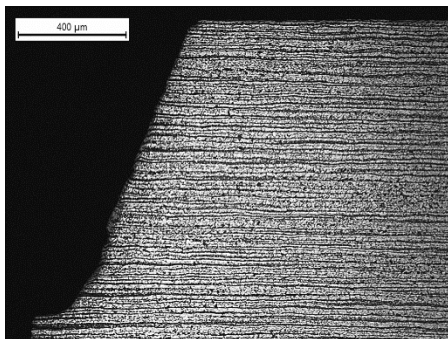
Mikrostruktura MŠ/ZUT  
(Gornji beinit)

Slika 6.16 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 22 (lokacija 1.2, zarez u licu), uvećanje 500x



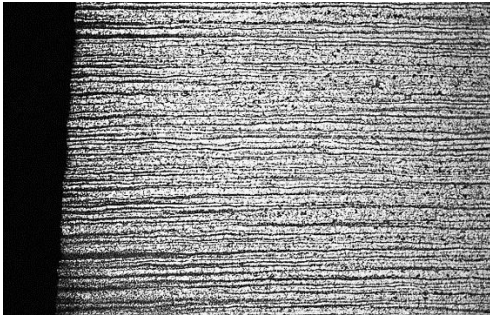


Slika 6.17 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 21 (lokacija 1.2, zarez u korenu), uvećanje 500x



Mikrostrukura OM  
(Ferit + Perlit)

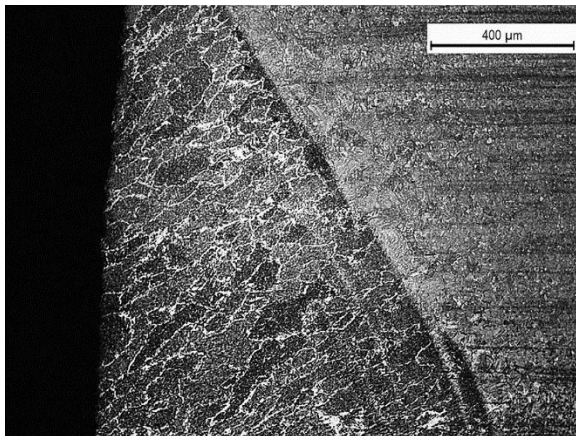




Mikrostruktura OM i ZUT  
(Ferit + Perlit + donji Beinit)

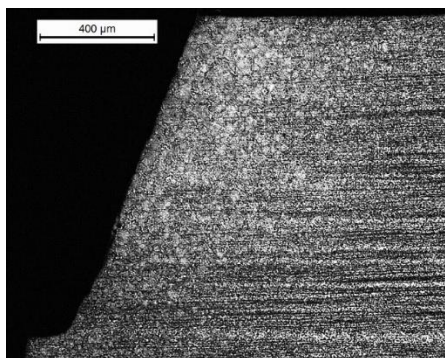


Mikrostruktura ZUT + MŠ  
(Beinit)

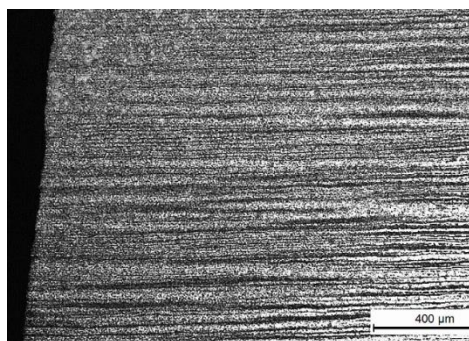


Mikrostruktura MŠ + ZUT  
(gornji Beinit)

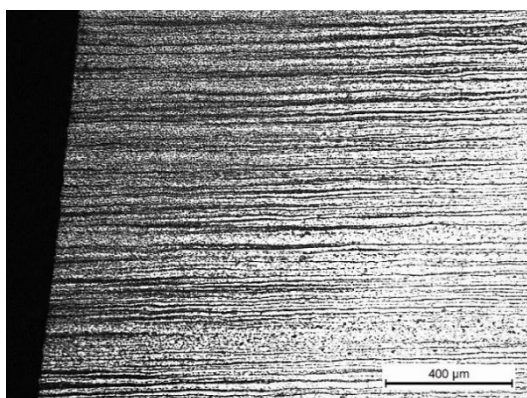
Slika 6.18 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 23 (lokacija 1.2, zarez u korenu), uvećanje 500x



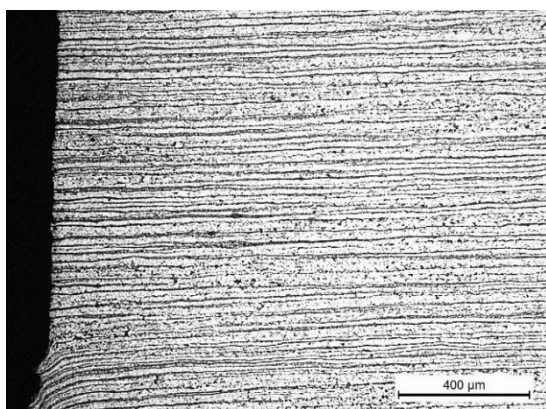
Mikrostruktura ZUT u zrezu  
(Gornji + donji Beinit)



Mikrostruktura ZUT ispod zreza  
(Gornji + donji Beinit)



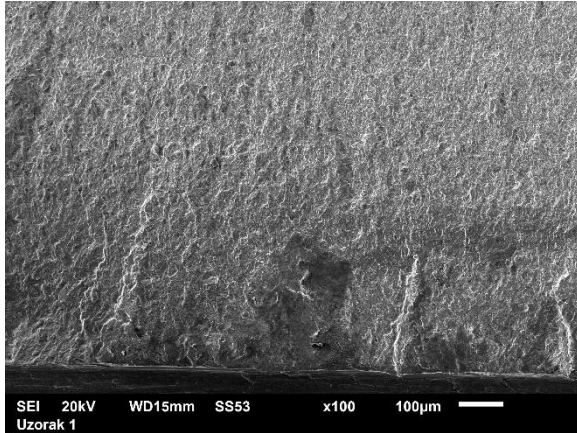
Mikrostruktura prelaza ZUT/OM  
(Perlit + Ferit + donji Beinit)



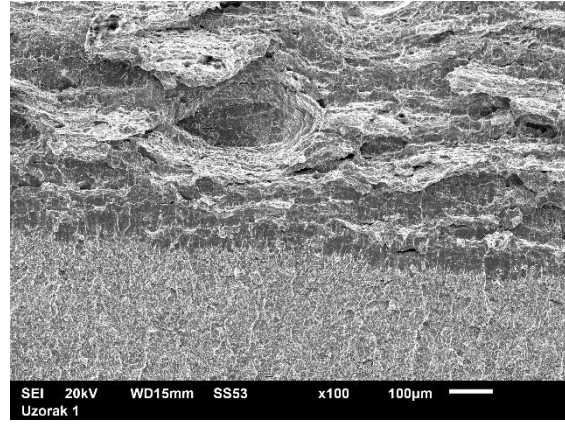
Mikrostruktura osnovnog materijala  
(Perlit + Ferit)

Slika 6.19 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma

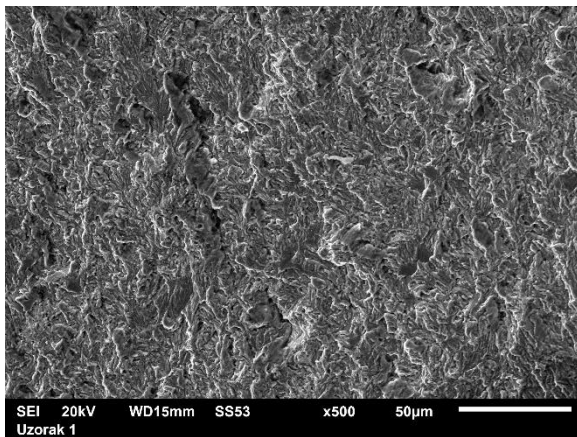
epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 26 (lokacija 1.2, zarez u licu), uvećanje 500x



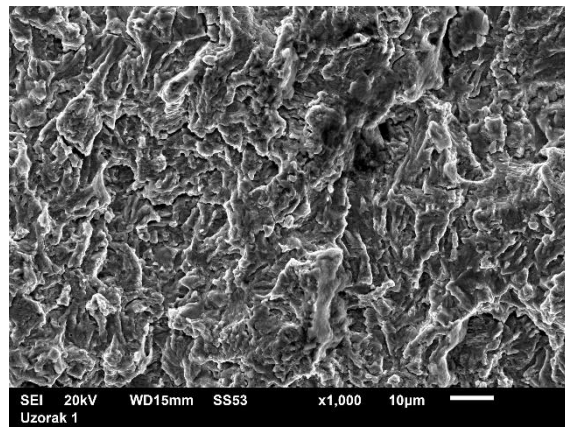
a) ZUT, uvećanje 100x



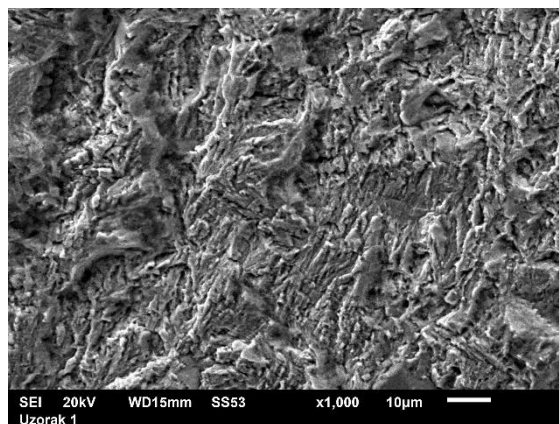
b) OM, uvećanje 100x



c) ZUT ispod zareza, uvećanje 500x



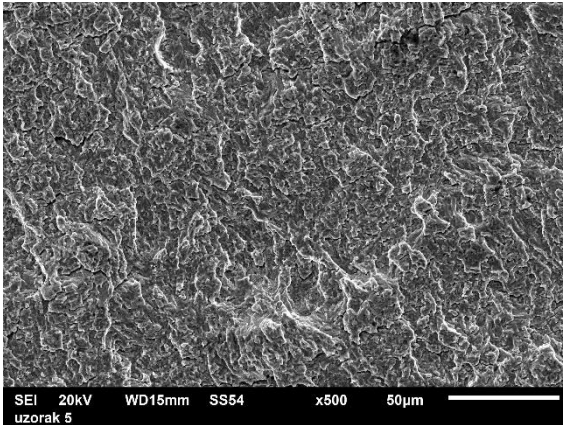
d) OM, uvećanje 1000x



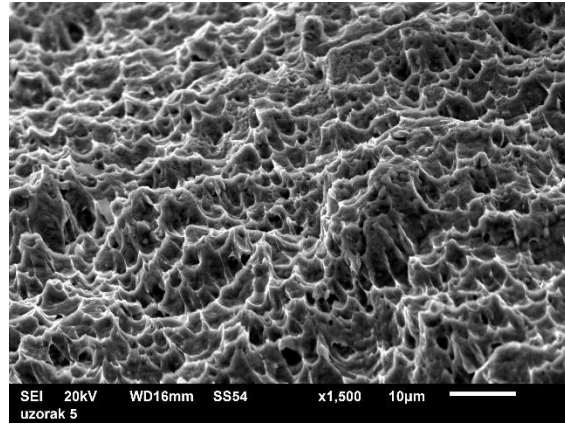


e) ZUT, uvećanje 1000x

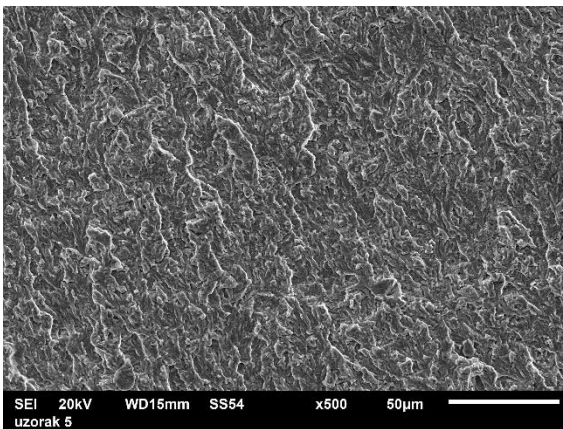
Slika 6.20 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 1 (lokacija 1.1, zarez u licu), uvećanja 100-1000x



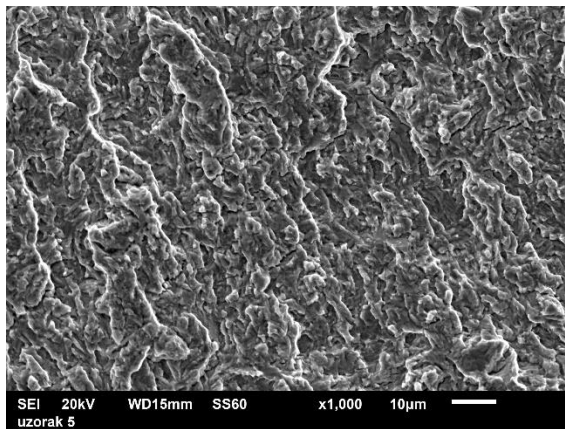
a) MŠ, uvećanje 500x



b) MŠ, uvećanje 1500x

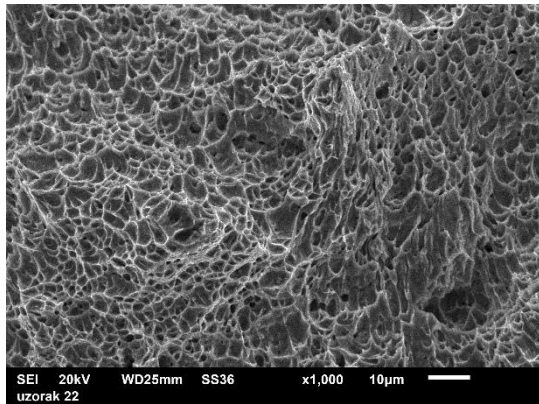


c) ZUT ispod zareza, uvećanje 500x

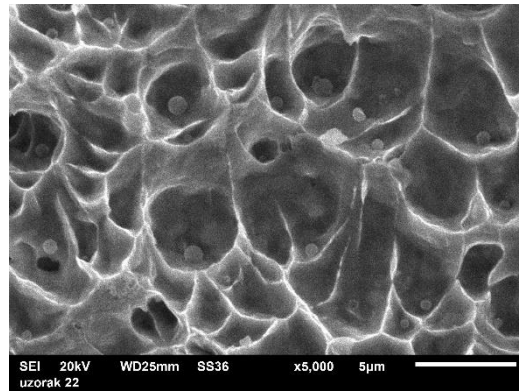


d) ZUT, uvećanje 1000x

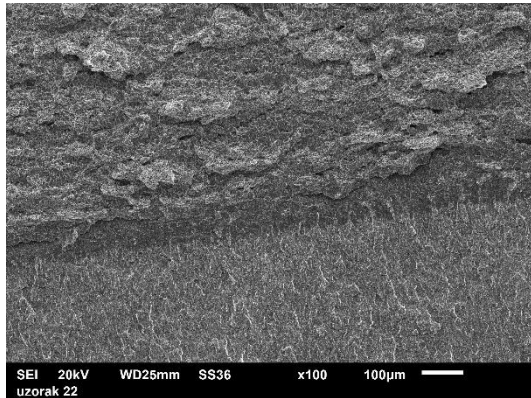
Slika 6.21 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 5 (lokacija 1.1, zarez u korenu), uvećanja 100-1000x



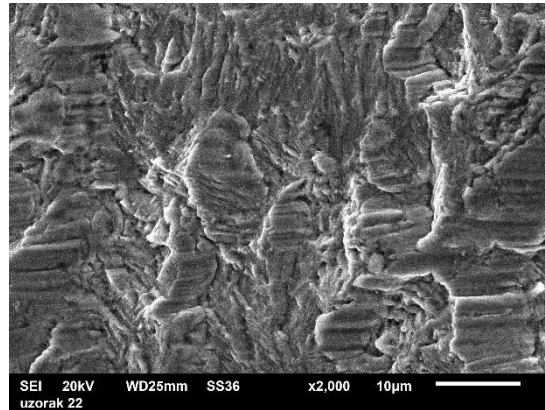
a) MŠ, uvećanje 1000x



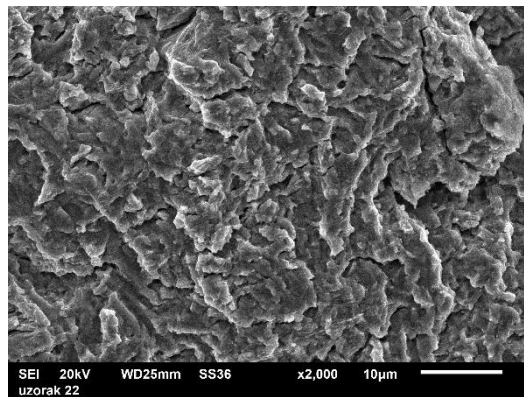
b) MŠ, uvećanje 5000x



c) Prelaz MŠ/ZUT, uvećanje 100x

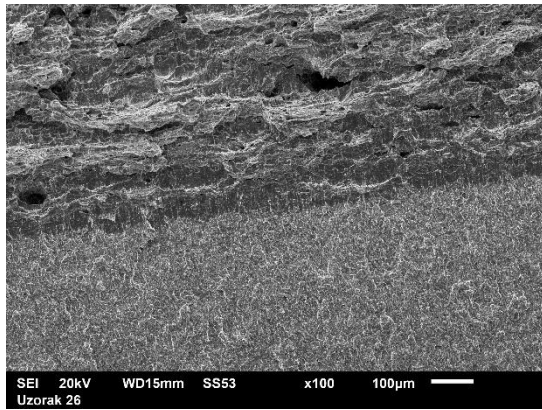


d) OM, uvećanje 2000x

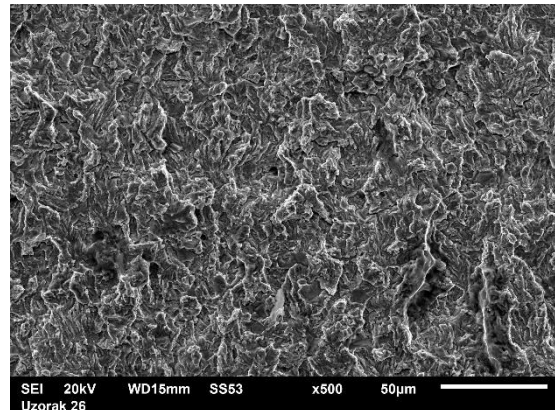


e) ZUT, uvećanje 2000x

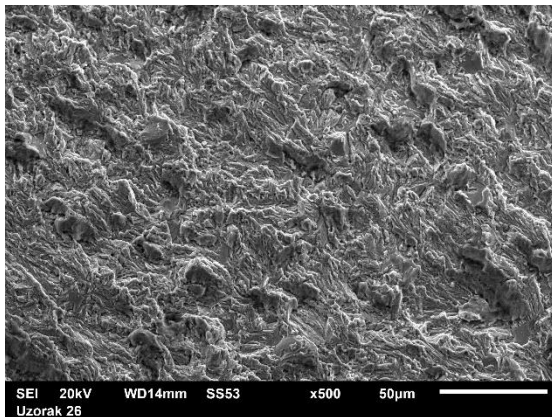
Slika 6.22 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 22 (lokacija 1.2, zarez u korenu), uvećanja 100-5000x



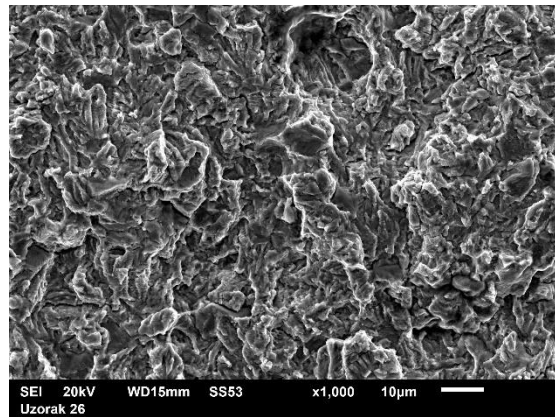
a) MŠ, uvećanje 100x



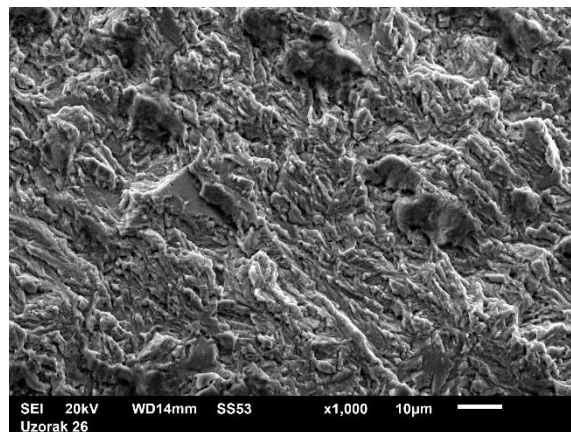
b) OM, uvećanje 500x



c) ZUT, uvećanje 500x



d) OM, uvećanje 1000x



d) ZUT, uvećanje 1000x

Slika 6.23 Mikrostrukture osnovnog materijala i zone uticaja toplote određene nakon loma epruveta sa zamornom prslinom, epruveta 26 (lokacija 1.2, zarez u licu), uvećanja 500-1000x

Na osnovu gore prikazanih slika, može se videti da je struktura osnovnog materijala bila dominantno perlitna, uz određeno prisustvo ferita, što je i očekivano s obzirom na hemijski sastav korišćenog čelika i vreme hlađenja. U metalu šava se može primetiti karakteristična dendritna struktura, dok je zona uticaja toplote uglavnom beinitna. U mikrostrukturi ZUT-a se javljaju i gornji i donji beinit (kao što se može videti na nekim od slika, npr. 6.44 d)). Prisustvo ovih mikrostruktura objašnjava porast tvrdoće u ZUT-u, naročito u delovima gde je prisutan gornji (krupnozrniji) beinit, uz prethodno pominjani Widmannstätten-ov ferit. Do pojave ovih nepovoljnijih mikrostruktura (sa tačke gledišta žilavosti i plastičnosti) je došlo usled nešto bržeg hlađenja u odnosu na predviđene vremenske intervale za  $t_{8/5}$ .

## 6.6 Tvrdoća

U okviru eksperimentalnih ispitivanja za potrebe izrade ove disertacije je takođe ispitana i tvrdoća, sa posebnim osvrtom na zonu uticaja toplote. Merenje tvrdoće je urađeno primenom Vickersove metode, usled njene preciznosti pri merenju epruveta manjih dimenzija i mogućnosti da se dobiju odgovarajuće vrednosti pri malim dubinama utiskivanja. Suština ove metode je u merenju sile potrebne da se ostvari određena dubina utiskivanja, pri čemu se koristi dijamantski vrh oblika četvorostrane piramide, čime je omogućeno preciznije utiskivanje, odnosno merenje tvrdoće na veoma maloj površini. Na ovaj način se izbegava da pri ispitivanju vrh utiskivača zakači i neku od susednih oblasti. U ovom slučaju upotrebljena je sila utiskivanja od 49N (koja odgovara HV 5 postupku ispitivanja tvrdoće).

Merna mesta su obeležena duž dve paralelne linije, čiji se pravci poklapaju sa pravcem epruvete (slika 6.24), i nalazile su se sa strane korena i lica šava. Od ukupno 12 mernih mesta, po 3 su se nalazila u samoj zoni uticaja toplote, sa obe strane zavarenog spoja. Na slici 6.25 se može videti dijagram raspodele tvrdoće duž različitih oblasti zavarenog spoja, sa donje i gornje strane.



III	353	362	321	286	321	286	321	286	321	257	286	257
IV	321	362	362	362	321	286	362	286	286	257	286	321

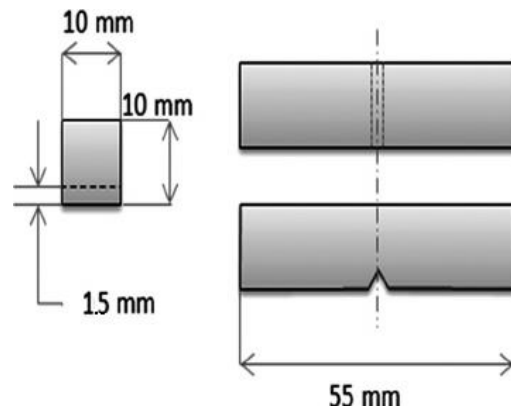
**Tabela 6.5** Rezultati merenja tvrdoće (HV5) u ZUT, Uzorak 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	274	313	293	290	321	358	299	366	345	362	386
II	257	286	286	257	286	286	232				
III	293	358	321	321	286	257	286	286	257	257	286
IV	336	362	362	321	286	286	286	210	286	257	257

Iz gore prikazanih tabela se može videti da su najveće vrednosti tvrdoće izmerene u oblasti zone uticaja toplote završnog zavara u oba uzorka, i da one opadaju od lica ka korenu zavarenog spoja. Maksimalne vrednosti u licu su iznosile 386 HV 5, dok su u korenu ove vrednosti bile između 260 i 280 HV 5. Ovakav raspored je i očekivan, s obzirom na samootpuštanje ZUT-a korenog dela zavarenog spoja usled zavarivanja naknadnih prolaza popune. U završnom ZUT-u su se javile vrednosti iznad 350 HV 5, što ukazuje na prisustvo nepovoljne mikrostrukture, svojstava bliskih martenzitu, usled čega je povećan rizik od nastanka hladnih prslina [94].

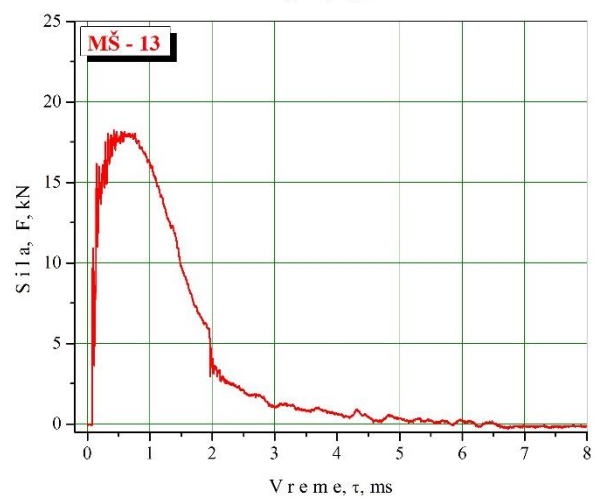
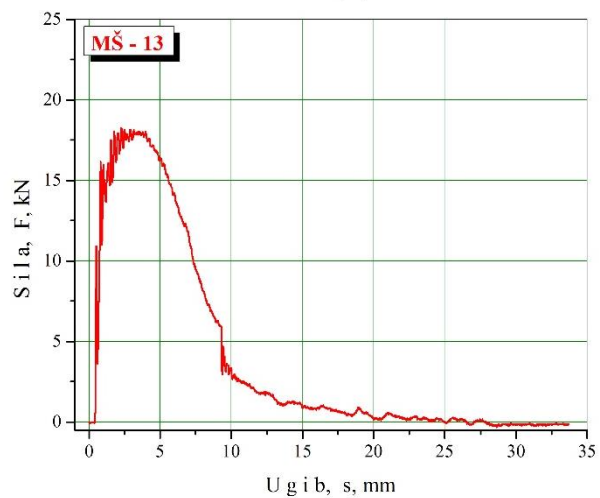
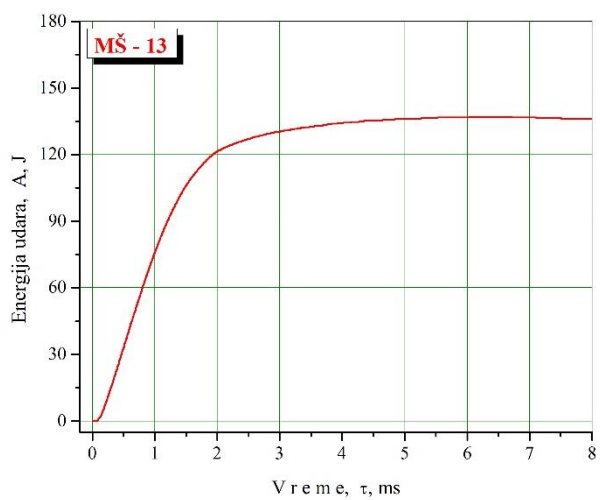
## 6.7 Ispitivanje žilavosti

Kao što je prethodno napomenuto, za potrebe ispitivanja žilavosti na Šarpijevom klatnu, urađeno je 12 epruveta koje su podeljene u četiri grupe, u zavisnosti od položaja zareza (ZUT sa strane korena/lica) i dela ploče odakle su isečene (bliže početku, odnosno kraju zavarenog spoja, zbog ispitivanja uticaja temperature). Geometrija epruveta, sa dimenzijama zareza, je prikazana na slici 6.28 Površina nosećeg poprečnog preseka iznosila je  $10 \times 8 = 80 \text{ mm}^2$ .



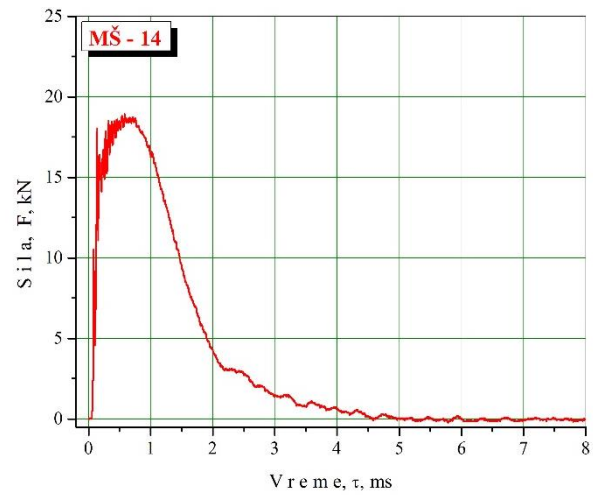
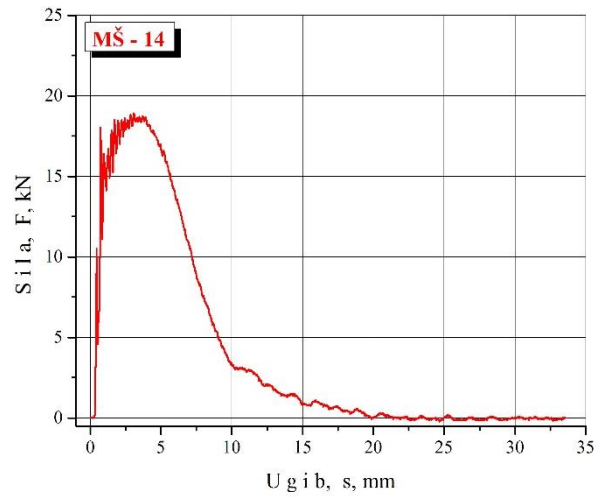
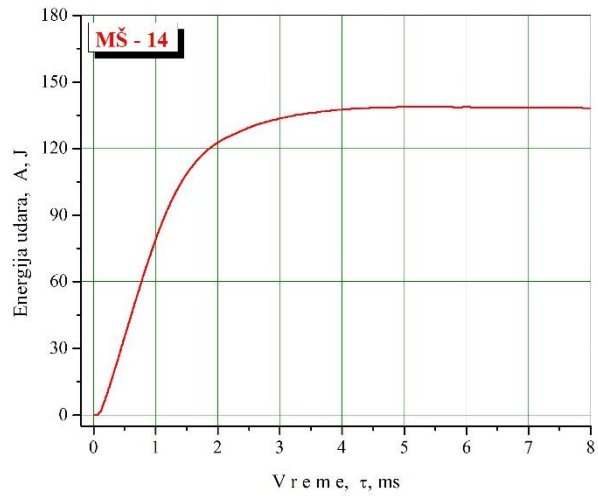
Slika 6.28. Geometrije epruveta za žilavost za različite položaje zareza u ZUT

Deo ispitivanja žilavosti je urađen na Šarpijevom klatnu Tinius-Olsen, dok je deo ispitivanja izvršen na mašini SCHENCK TREBEL, pri čemu su sva ispitivanja urađena na sobnoj temperaturi. Ispitivanja žilavosti obuhvatala su i epruvete 13 i 14, isečene iz metala šava zavarenog spoja, kao i tri epruvete uzete iz osnovnog metala, obeležene kao OM 4, OM 5 i OM 6. Uslovi ispitivanja su definisani u skladu sa standardom ASTM E 1820:13. U narednom delu ovog poglavlja su prikazani rezultati za svih 14 ispitanih epruveta, uz odgovarajuće dijagrame dobijene pomoću Šarpijevih klatna. Na slikama 6.29-6.45 se mogu videti dobijene vrednosti ukupne energije udara, njena zavisnost od vremena, kao i zavisnosti izmerene sile od vremena i ugiba. U tabeli 6.6 su date vrednosti za sve epruvete, uključujući i komponente ukupne energije udara, energiju nastanka i energiju rasta prsline.

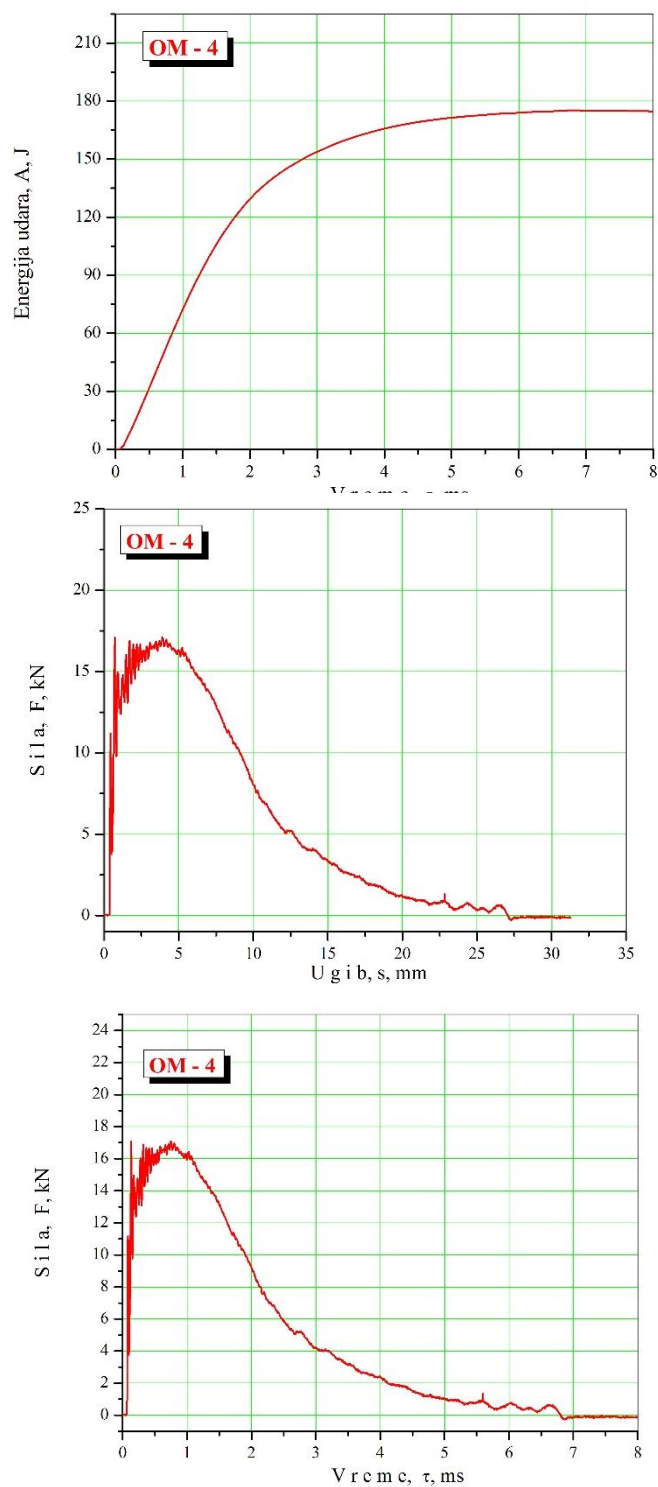


Slika 6.29 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 13 (metal šava).

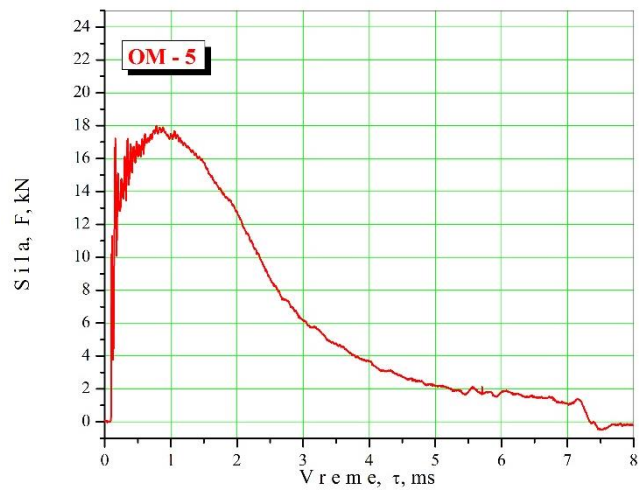
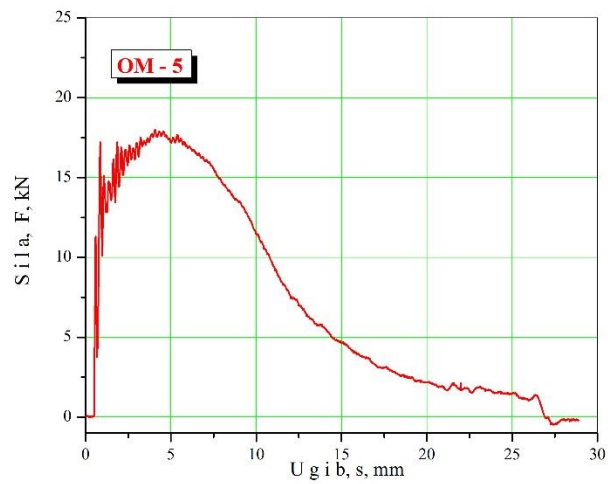
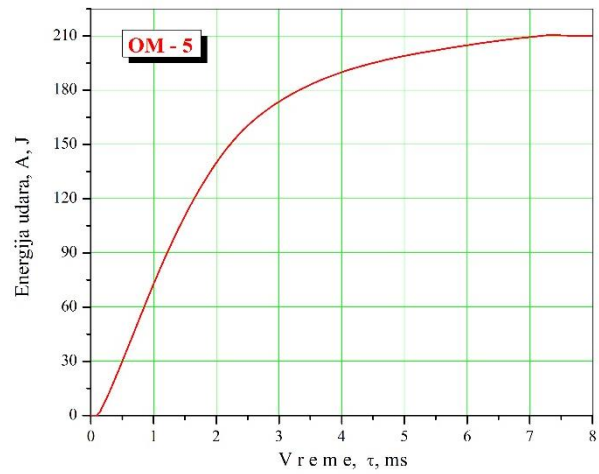




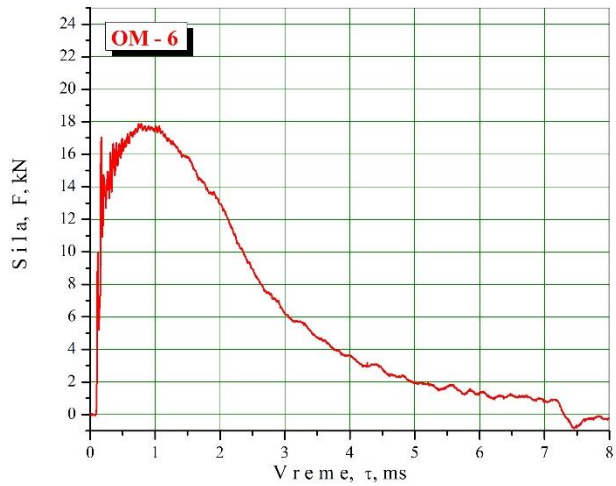
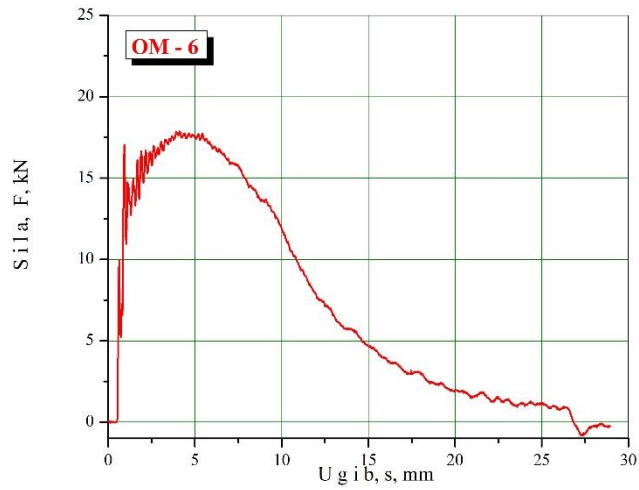
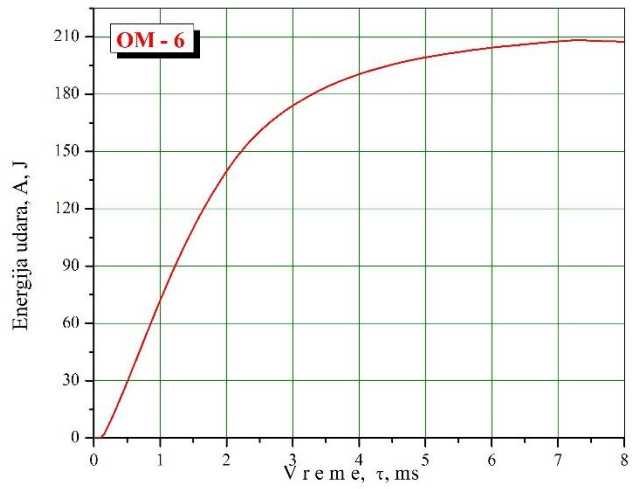
Slika 6.30 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 14 (metal šava).



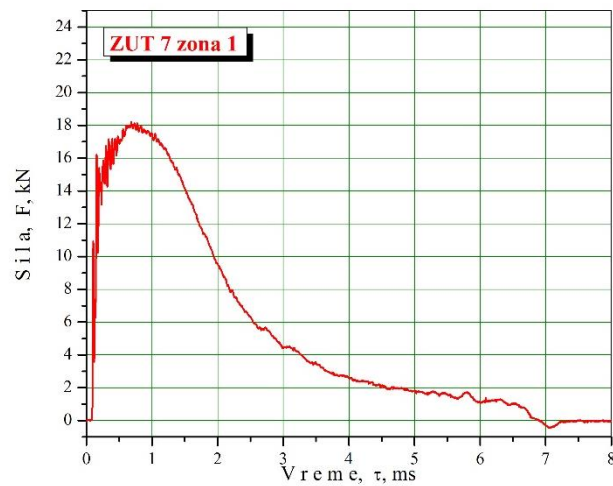
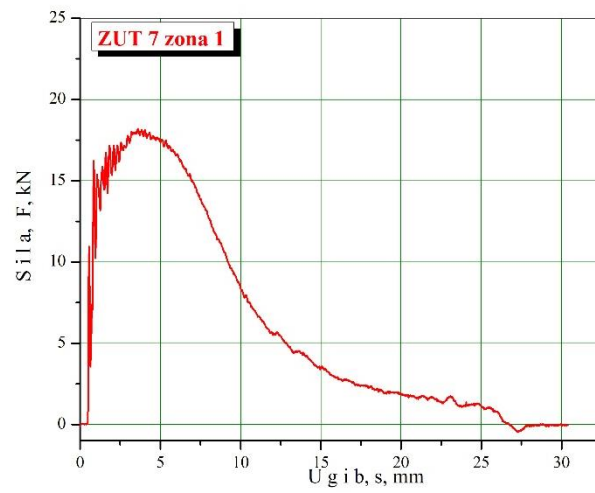
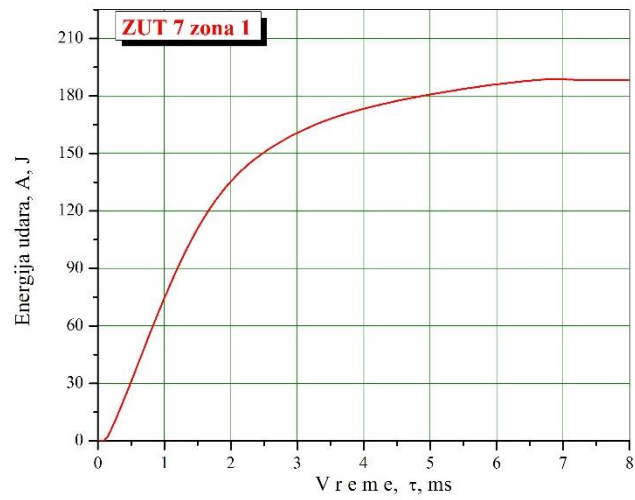
Slika 6.31 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj OM 4 (osnovni metal).



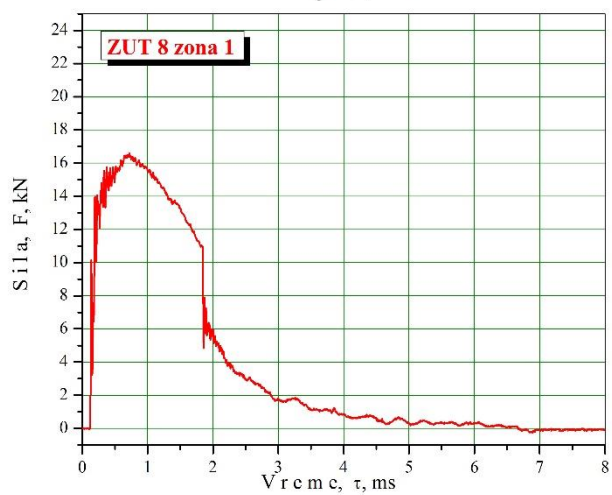
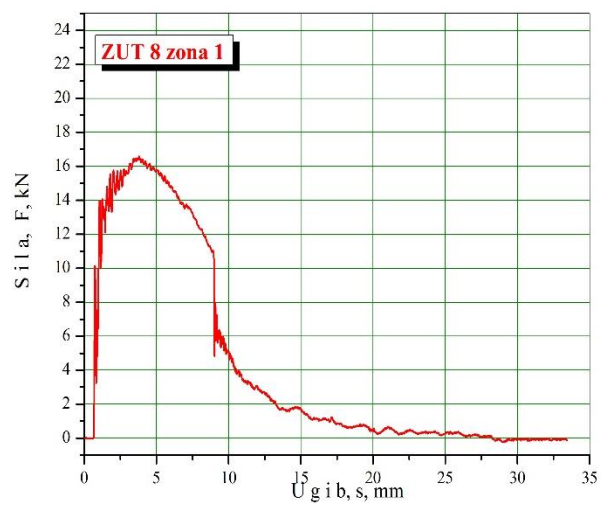
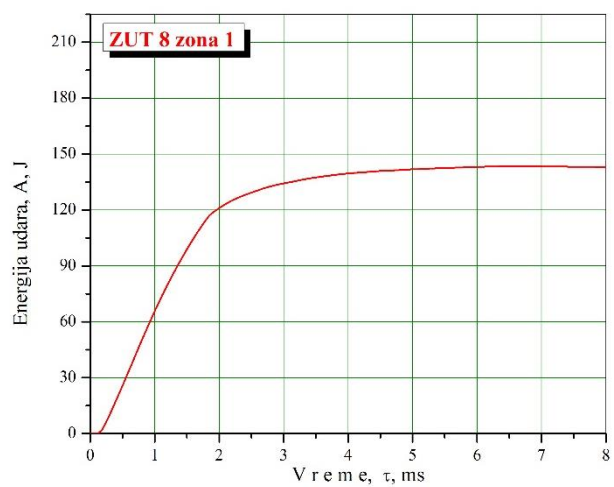
Slika 6.32 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za eprvetu broj OM 5 (osnovni metal).



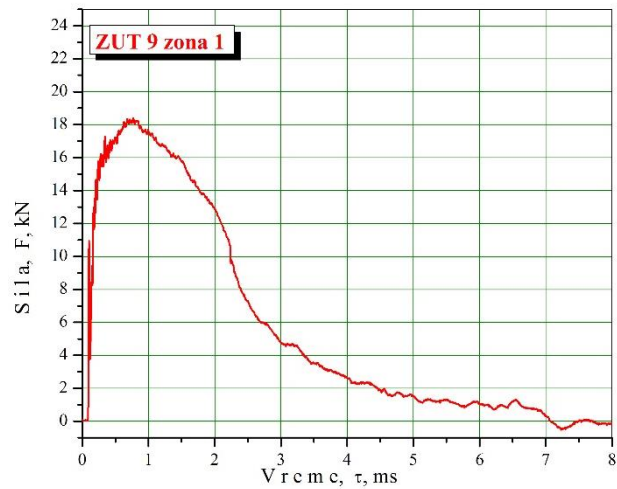
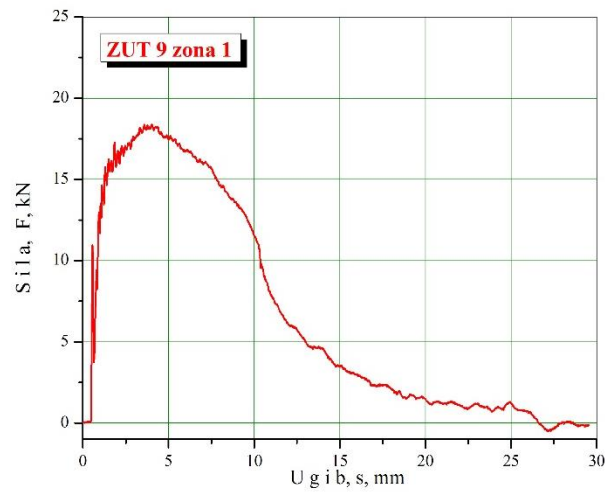
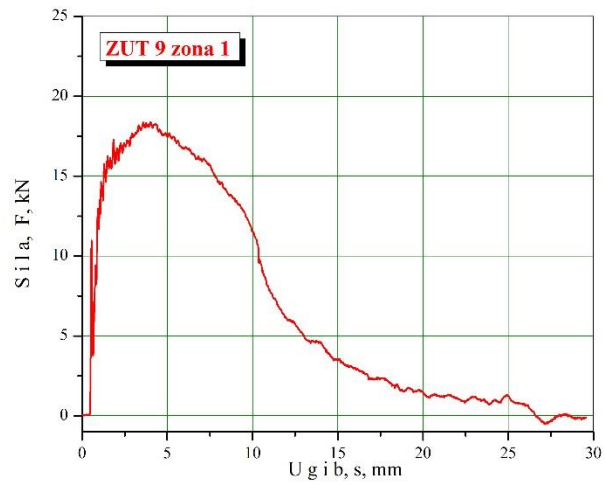
Slika 6.33 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za eprvetu broj OM 6 (osnovni metal).



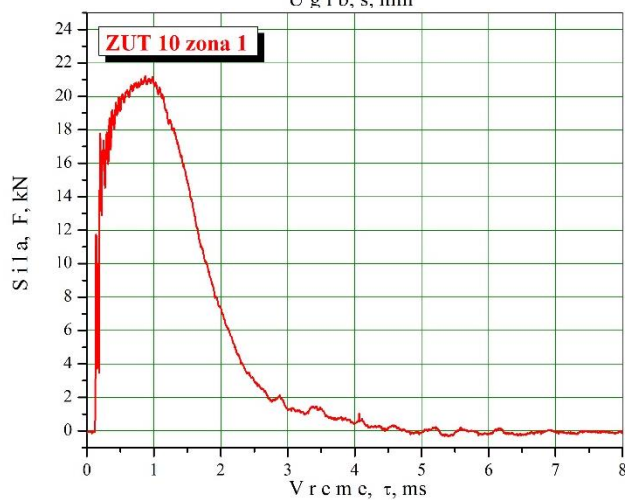
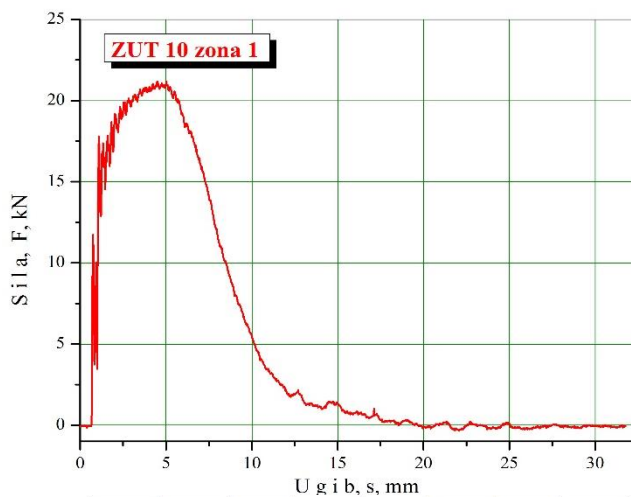
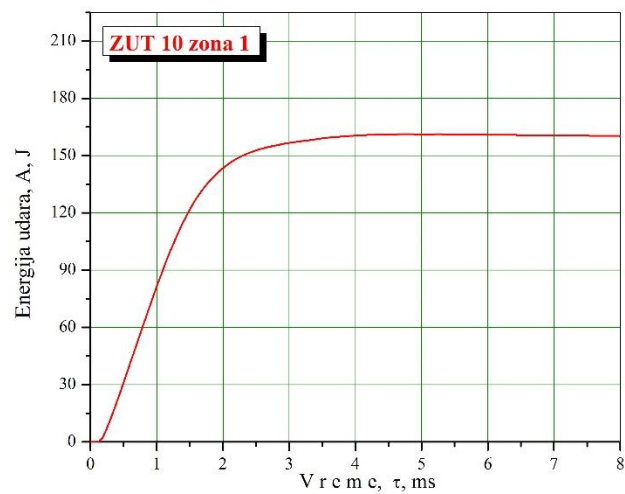
Slika 6.34 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 7 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.1).



Slika 6.35 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 8 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.1).

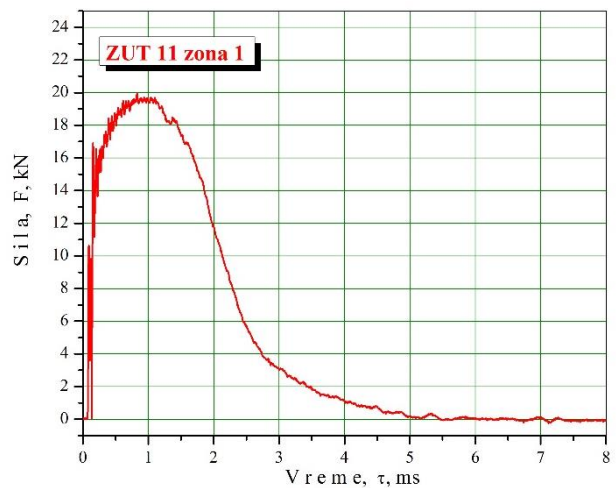
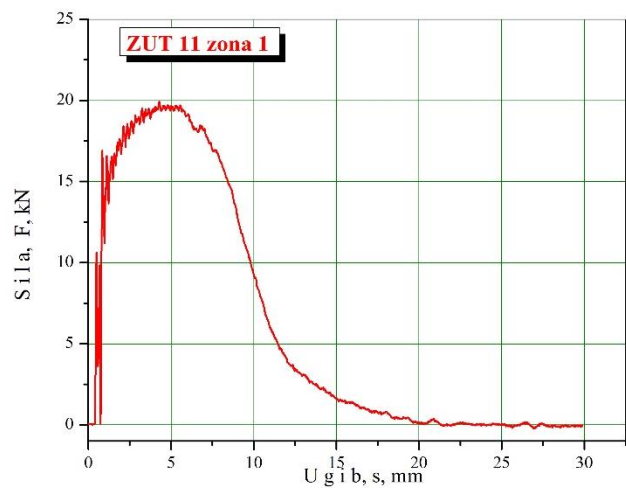
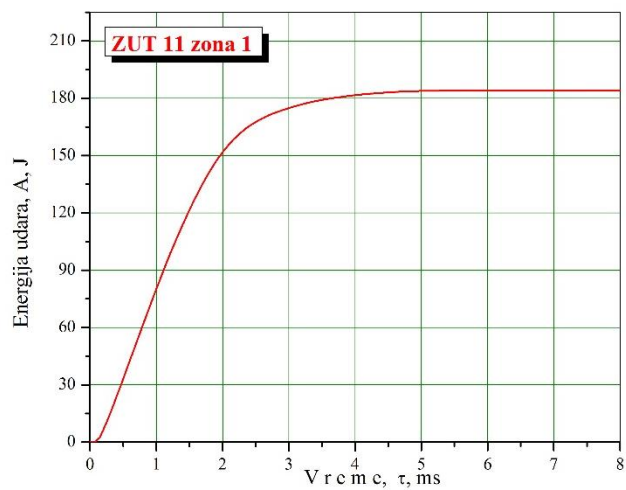


Slika 6.36 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 9 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.1)

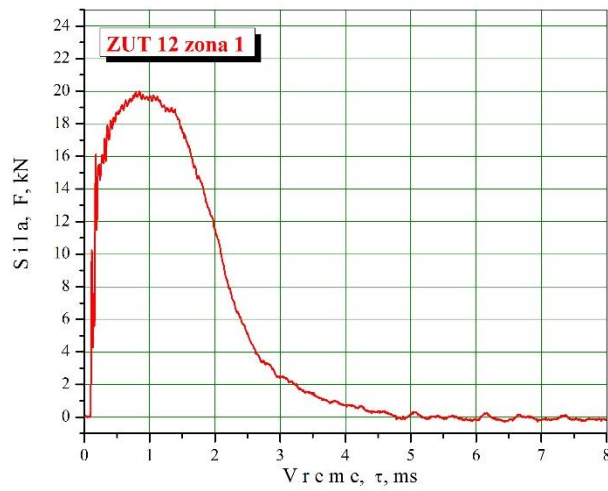
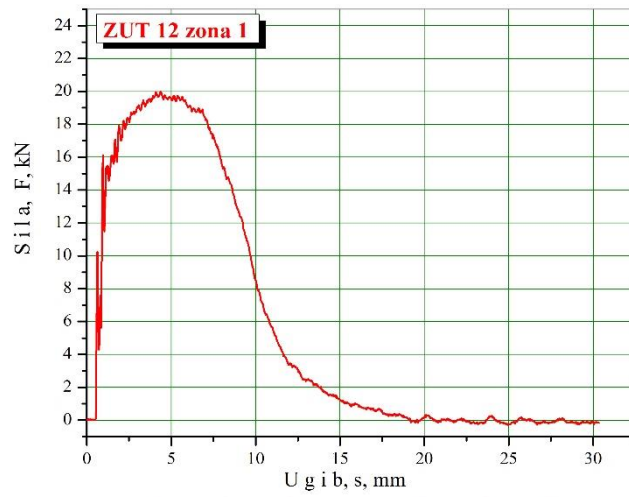
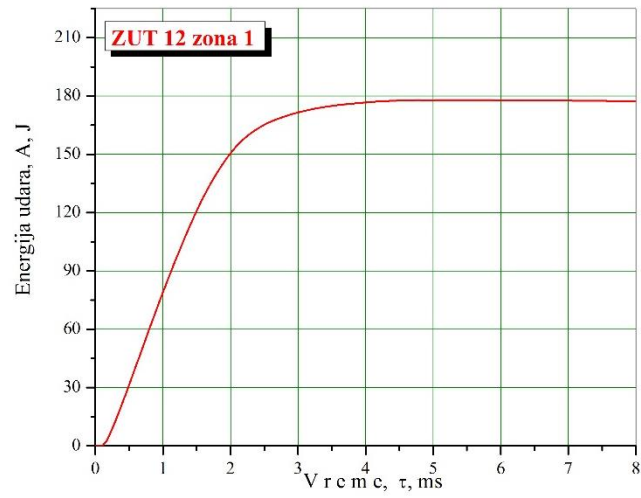


Slika 6.37 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 10 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.1)

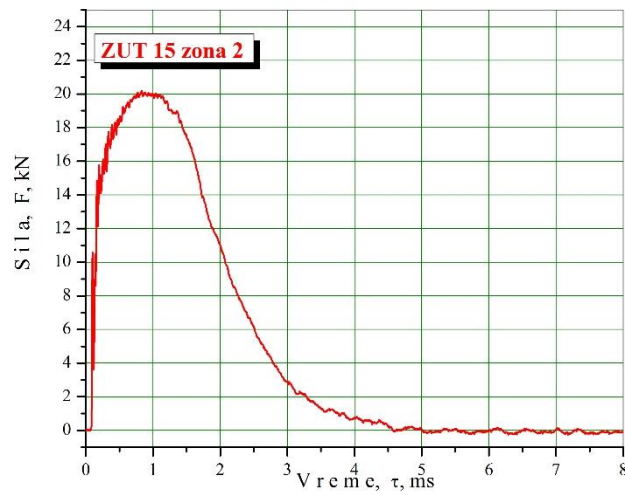
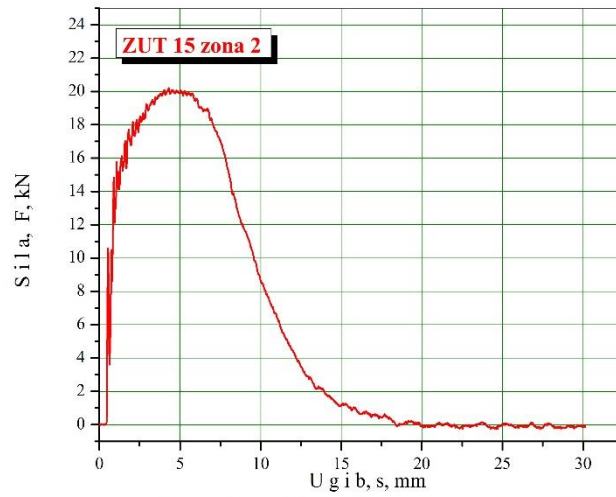
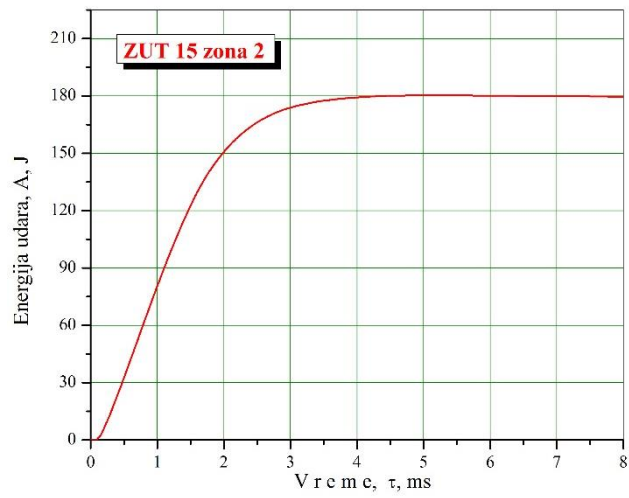




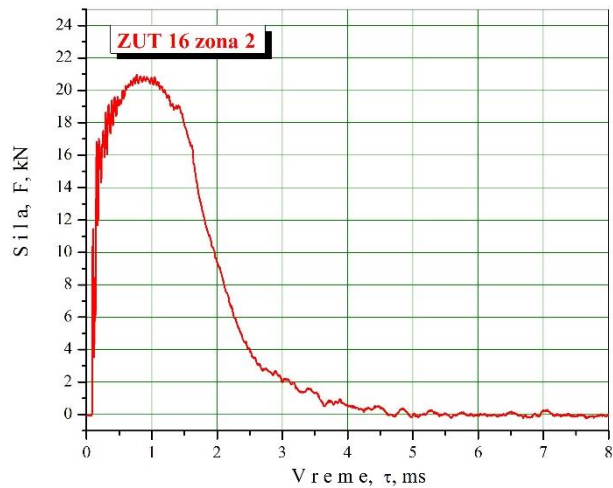
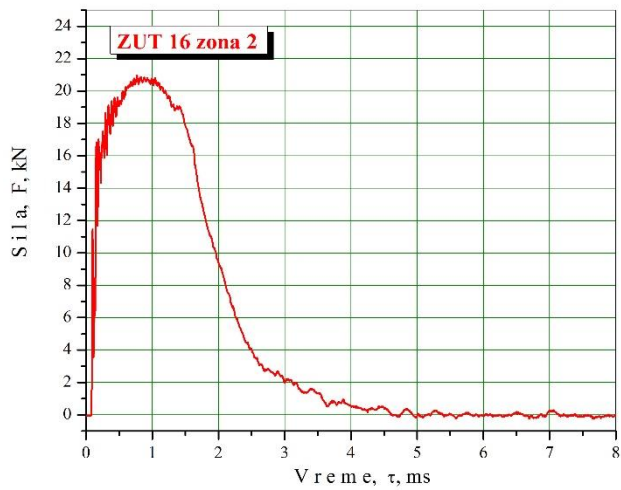
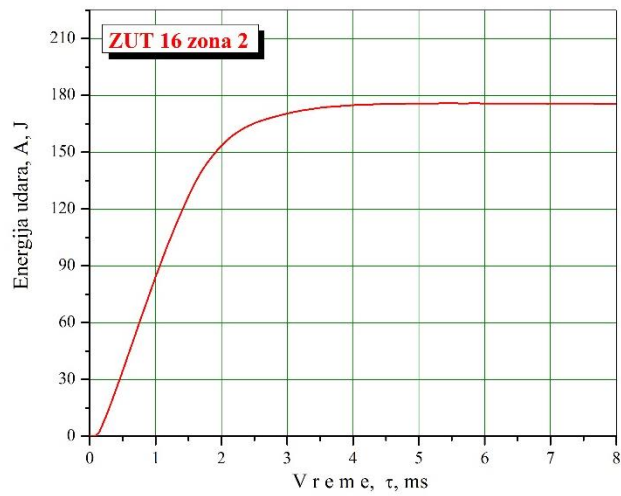
Slika 6.38 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 11 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.1)



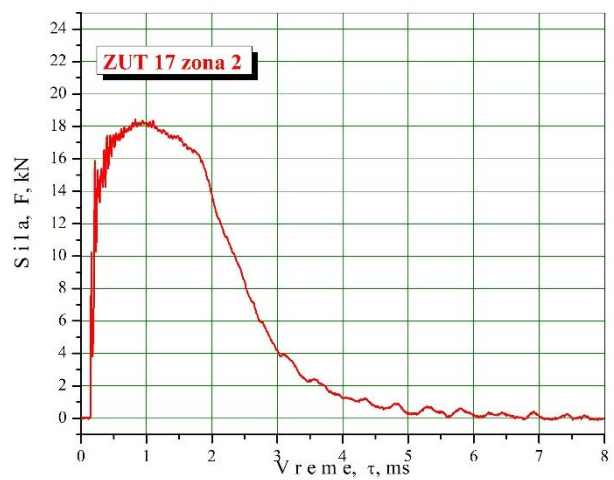
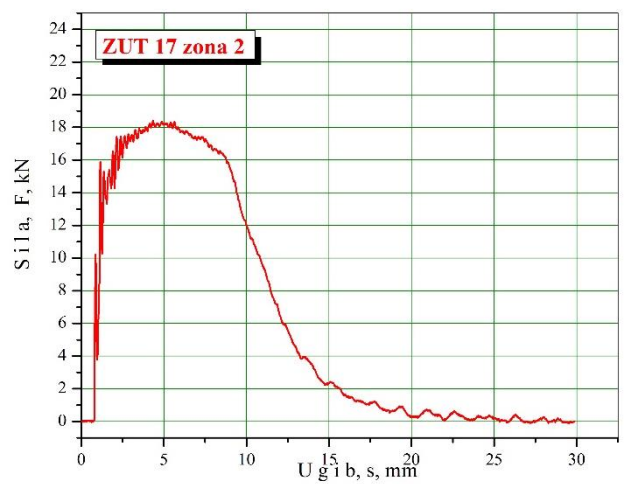
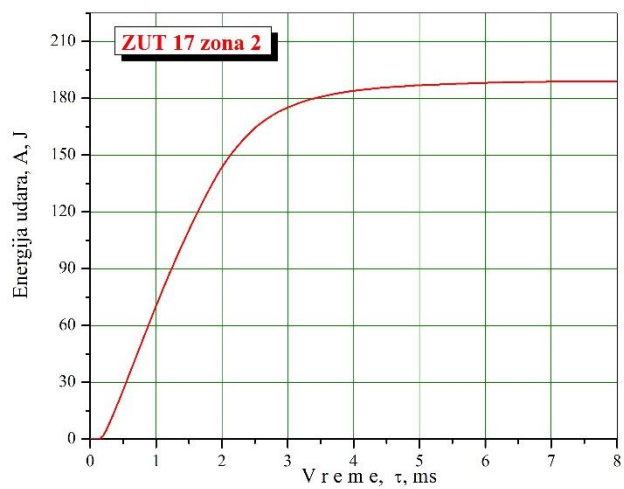
Slika 6.39 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 12 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.1)



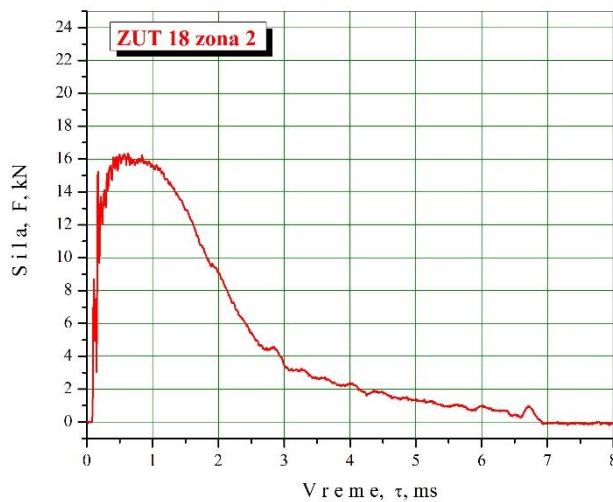
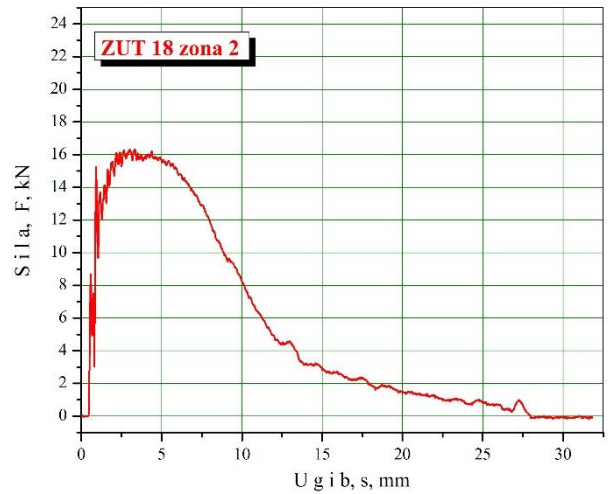
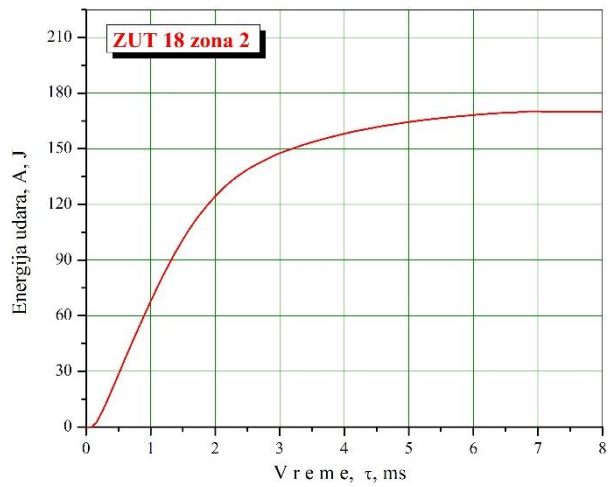
Slika 6.40 Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 15 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.2)



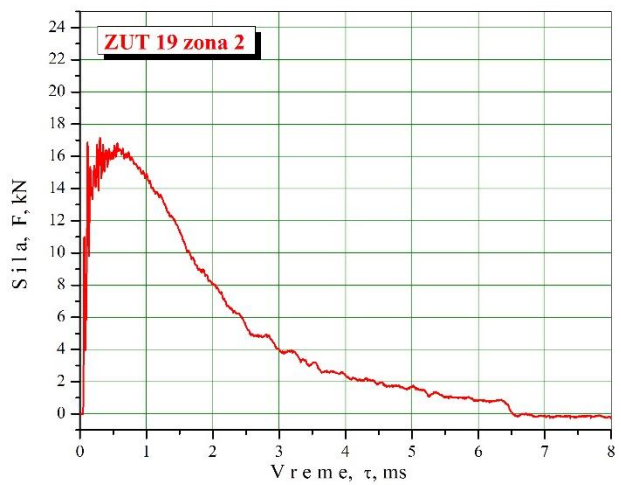
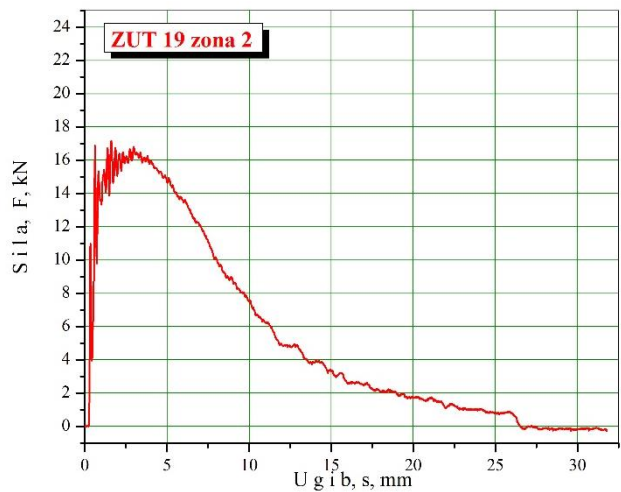
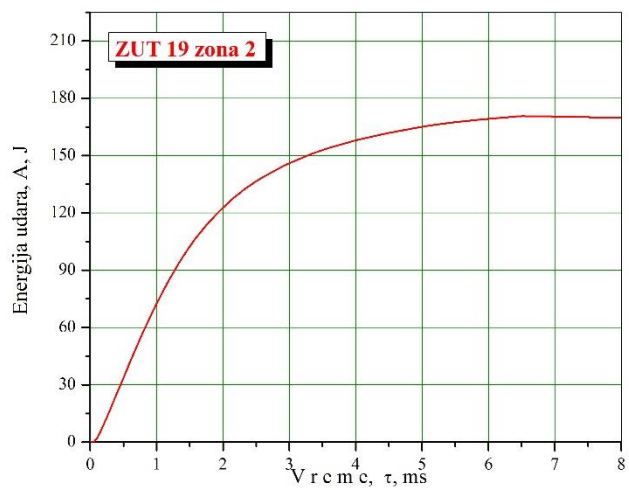
Slika 6.41 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 16 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.2)



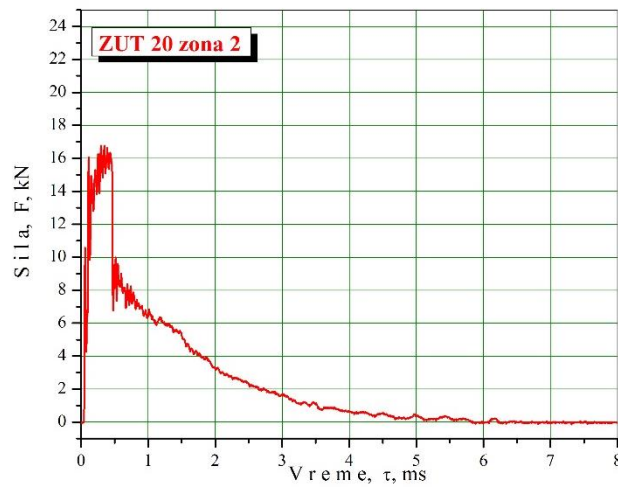
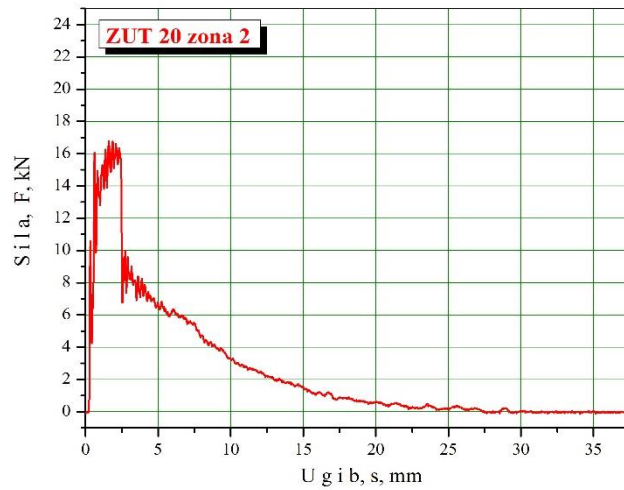
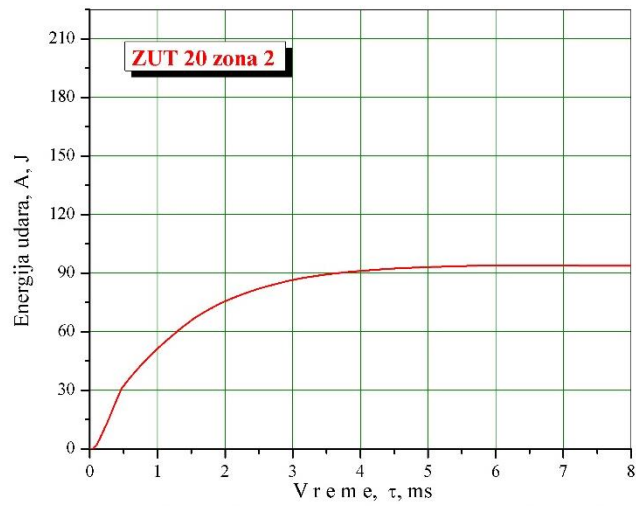
Slika 6.42 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 17 (ZUT, zarez u korenu, lokacija 1.2)



Slika 6.43 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 18 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.2)



Slika 6.44 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 19 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.2)



Slika 6.45 Dijagrami Dijagrami energija udara – vreme (gore), sila - ugib (sredina) i sila - vreme (dole) za epruvetu broj 20 (ZUT, zarez u licu, lokacija 1.2)



**Tabela 6.6** Rezultati ispitivanja žilavosti

Epruveta	Udarne žilavost (J/cm <sup>2</sup> )	Energija udara (J)	Energija nastanka prsline (J)	Energija rasta prsline (J)
MŠ 13	171	137	44	93
MŠ 14	174	139	49	90
OM 4	220	176	49	127
OM 5	264	211	55	156
OM 6	261	209	62	147
ZUT 7	237	189	50	139
ZUT 8	180	144	41	103
ZUT 9	247	198	52	146
ZUT 10	201	161	73	88
ZUT 11	231	185	80	105
ZUT 12	223	178	69	109
ZUT 15	226	181	74	107
ZUT 16	221	177	74	103
ZUT 17	237	190	67	123
ZUT 18	213	171	41	130
ZUT 19	213	171	41	130
ZUT 20	118	94	24	70

Kao što se iz prikazanih rezultata, dobijene vrednosti energije udara i udarne žilavosti su varirale zavisno od grupe epruveta. Maksimalna vrednost energije udara je izmerena u slučaju epruvete 9 i iznosila je 197.84 J, dok je najmanja vrednost zabeležena kod epruvete broj 8, 143.74 J (što se ZUT-a tiče, epruvete sa MŠ su pokazale nešto niže vrednosti od 136.77-139.09 J). Epruvete iz OM su pokazale najveće vrednosti ukupno gledano, što je i bilo očekivano (oko 210 J za OM 5 i OM 6). Treba pomenuti i epruvetu 20, kod koje su izmerene vrednosti u značajnoj meri niže u odnosu na prosečne vrednosti ostalih epruveta (čak i u poređenju sa MŠ), što ukazuje na prisustvo grešaka u materijalu u ovom konkretnom slučaju, te se ovaj rezultat neće uzimati u obzir pri diskusiji.

Iako su obe ekstremne vrednosti dobijene iz iste grupe epruveta (ZUT sa zarezom na strani lica, lokacija 1.1), u proseku je dobijeno da epruvete iz grupa sa zarezom u korenoj strani (lokacije 1.1 i 1.2) imaju nešto veće i ravnomernije vrednosti energije udara u odnosu na grupe sa zarezima sa strane lica (bez defektne epruvete 20). Kod epruveta sa korenim zarezom su takođe zabeležene veće vrednosti sile pri ispitivanju (18.4 – 21.2 kN) u poređenju sa epruvetama sa zarezima u licu (16.6 – 18.4 kN).

Izvesne razlike su uočene i u vrednostima i međusobnim odnosima između komponenata ukupne udarne energije, energiji inicijacije i energiji rasta prsline ( $A_i$  i  $A_p$ , respektivno), za različite grupe epruveta. U slučaju epruveta 7-9 i 18-20, odnosno zarez u licu ZUT-a (sa oba kraja ploče), energija rasta prsline ima značajno veći udeo u odnosu na energiju inicijacije prsline. Njene vrednosti su oko 2.5 do 3.25 puta veće u odnosu na odgovarajuće vrednosti energije inicijacije (ovaj odnos je i slučaju epruvete 20, iako je ukupna energija značajno niža). Epruvete iz grupe zarez u licu, lokacija 1.2 imaju nešto izraženiji odnos u korist  $A_p$  u odnosu na lokaciju 1.1, gde su zabeležene niže temperature.

Kod epruveta iz grupa sa zarezima u korenu, odnosi energije rasta i energije nastanka se kreću od 1:1.2 do 1:1.85, u korist energije rasta. Međutim, same vrednosti energije nastanka su značajno veće u poređenju sa odgovarajućim komponentama kod epruveta sa zarezom na strani lica, i samim tim je njihova suma (ukupna energija udara) nešto veća, kao što je već napomenuto. I u ovom slučaju se udeo energije rasta u ukupnoj vrednosti energije udara povećava sa porastom temperature, tojest odnos  $A_p$  prema  $A_i$  je veći kod epruveta uzetih sa lokacije 1.2.

Kod epruveta 13 i 14, uzetih iz metala šava, energija rasta prsline je 1.8-2.1 puta veća od energije inicijacije prsline, pri čemu energija inicijacije u proseku ima slične vrednosti kao u slučaju epruveta sa zarezom sa strane lica. Kod epruveta uzetih iz osnovnog metala, energija rasta prsline je 2.4 do 2.85 puta veća od energije nastanka, pri čemu su vrednosti energije nastanka između vrednosti dobijenih za ZUT epruvete sa zarezom u licu, odnosno korenu šava.

## **6.8 Ispitivanje rasta zamorne prsline**

Drugi deo eksperimenta je obuhvatao ispitivanje rasta zamorne prsline u epruvetama prethodno pomenutih dimenzija, obeleženih brojevima 1-6, odnosno 21-26. Na ove epruvete su zalepljene merne folije RFM A5, švajcarskog proizvođača RUMUL [95], čija je oprema takođe korišćena i za zamaranje epruveta, pri čemu je postavljanje mernih folija izvršeno u strogo kontrolisanim uslovima, pri odgovarajućoj vlažnosti vazduha od 80 %. Svi zarezi, bez obzira na položaj, su dubine 1.4 mm, i sa uglom od 45 stepeni. Na osnovu ovoga, određeno je da je površina nosećeg preseka  $86 \text{ mm}^2$  (10x8.6).

Za sve epruvete, usvojen je odnos napona  $R = 0.1$ , i rast zamorne prsline je trajao do dostizanja dužine od 5 mm (odnosno 6.4 mm računajući i zarez, koje je u ovom slučaju predstavljao početnu dužinu prsline). Prve četiri epruvete koje su ispitane (1,6,21 i 26) su odabrane po principu po jedna epruveta iz svake grupe, i ispitane su u Režimu 7 (konstantno  $\Delta K$ , konstantan R), dok su sledeće četiri (4,5, 22 i 23) ispitane u Režimu 5 (rastuće  $\Delta K$ , konstantan R), nakon što je utvrđeno da je ovakav pristup praktičniji za određivanje koeficijenta Parisove jednačine, odnosno nakon što je autor ovog rada platio danak neiskustvu. U oba slučaja (režimi 5 i 7), početna vrednost  $\Delta K$  je iznosila  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Eksperimentalna postavka, kao i neke od epruveta koje su ispitane su prikazani na slikama 6.46–6.49 ispod, gde se mogu videti softver korišćen za eksperiment, sa svim parametrima bitnim za rast zamorne prsline, kao i RUMUL-ov fraktomat.



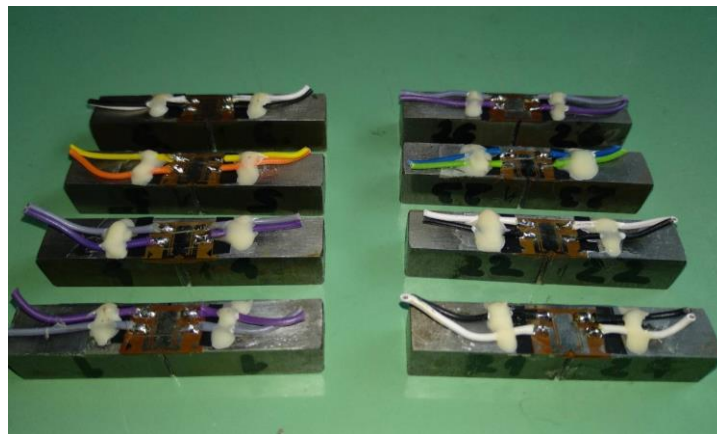
Slika 6.46 RUMUL-ov softver korišćen za eksperiment, sa svim bitnim parametrima (moment savijanja, trenutna dužina prsline, brzina rasta prsline, trenutni broj ciklusa)



Slika 6.47 Fraktomat 7609/213, na kome su ispitane epruvete sa zamornom prslinom



Slika 6.48 Epruveta 22 [dubrovnik, fail anal] (nekima poznata sa Letnje Škole Mehanike Loma u okviru konferencije ECF 22).



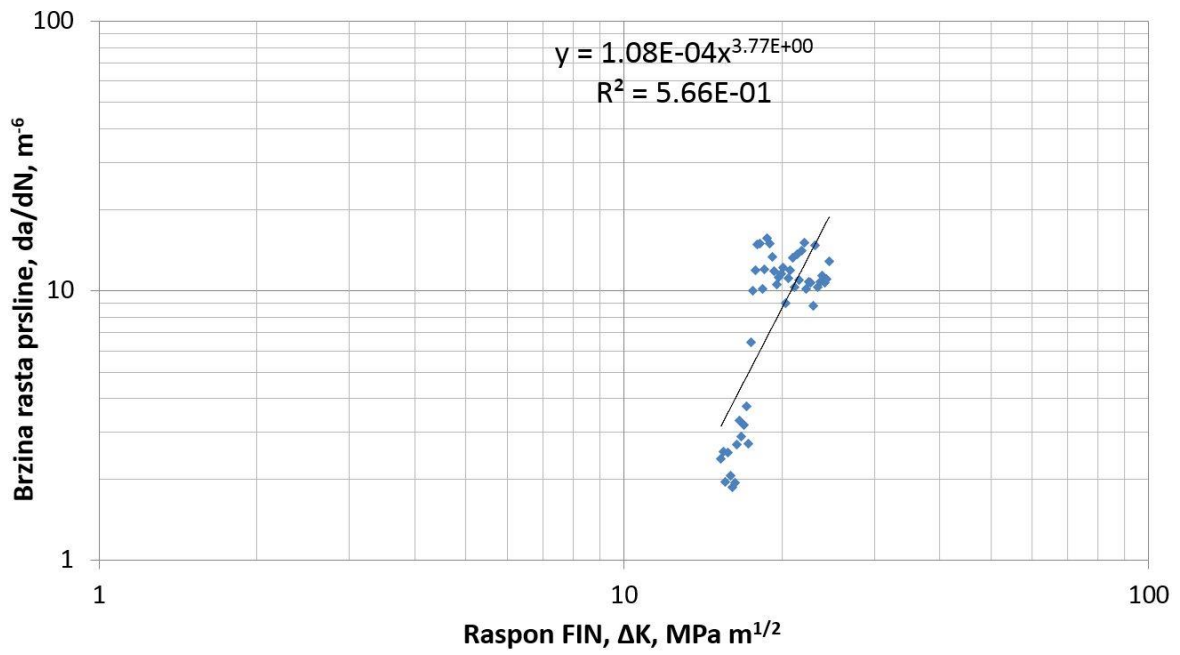
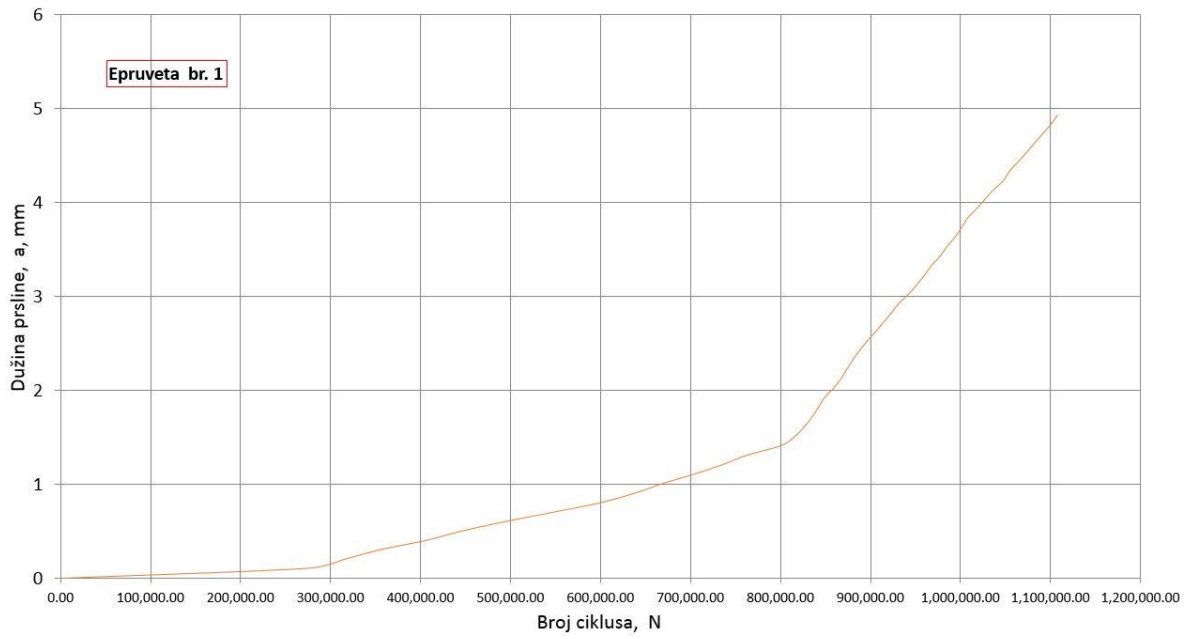
Slika 6.49 Epruvete sa zalepljenim mernim folijama RMF A5.

Usled svojih dimenzija, epruvete korišćene u okviru ovog eksperimenta su oslonjene na način koji onemogućava bilo kakvo pomeranje na krajevima. Moment savijanja, čija se vrednost menjala u skladu sa usvojenim odnosom napona od 0.1, deluje u sredini gornje površine epruvete, na mestu zareza. Ovaj odnos napona je standardan za posude pod pritiskom. U narednom delu ovog poglavlja biće prikazani rezultati ispitivanja za svih 12 epruveta, u pogledu otpornosti na rast zamorne prsline, pri čemu će u obzir biti uzete i mikrostrukture, odnosno njihove razlike, prouzrokovane razlikom u temperaturi pri zavarivanju, sa obe strane zavarene ploče.

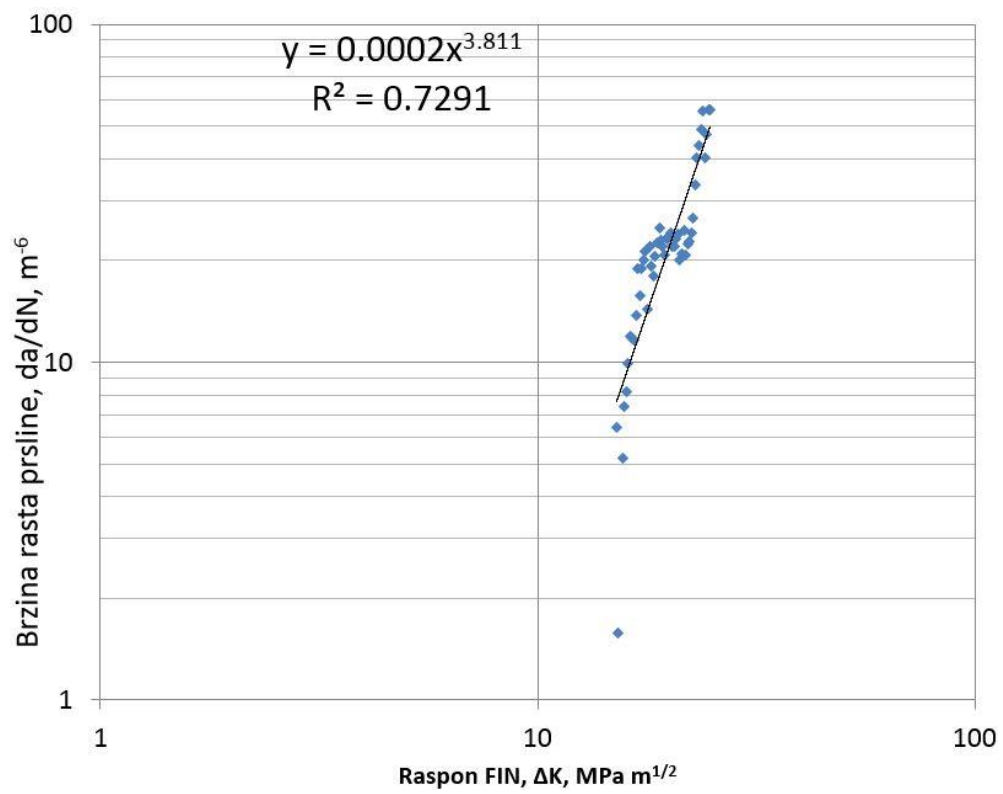
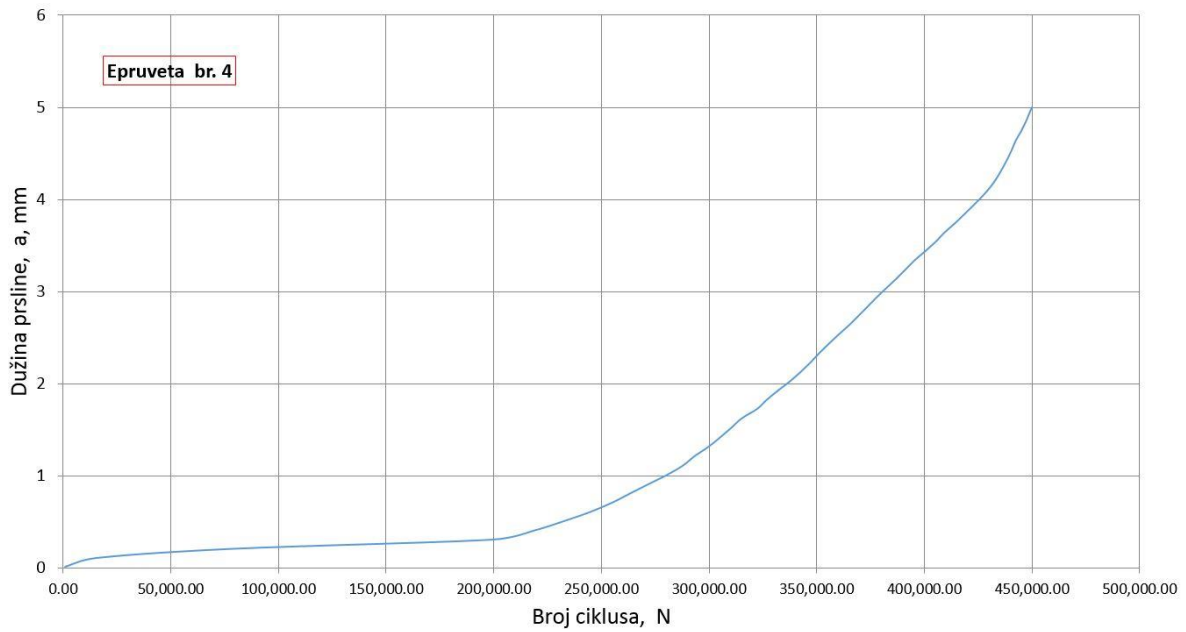
Kao što je već rečeno, rezultati ispitivanja su iskorišćeni kako bi se izračunali koeficijenti Parisove jednačine,  $C$  i  $m$ . Pored određivanja ovih koeficijenata za epruvetu sa zavarenim spojem, određene su i njihove vrednosti za svaku oblast zavarenog spoja pojedinačno, za potrebe detaljne numeričke simulacije. Ove oblasti obuhvatile su OM i dva različita dela ZUT-a (sitnozrni i krupnozrni). Takođe je izvršeno poređenje izgleda kriva  $a-N$  sa prelomnim površinama, kako bi se utvrdilo da li promene nagiba na ovim krivama prate promenu mikrostrukture polomljenih epruveta. Što se metala šava tiče, koeficijenti su određivani samo u slučajevima u kojima je prsline prolazila kroz ovu oblast.

Na sledećim slikama (6.50-6.57) su dati dijagrami za ukupno 8 epruveta, podeljenih u 4 grupe na prethodno opisani način. Za sve epruvete su prikazani dijagrami  $da/dN$  u zavisnosti od  $\Delta K$ , kao i dijagrami zavisnosti dužine zamorne prsline od broja ciklusa, odnosno  $a-N$  dijagrami. Dijagrami  $da/dN-\Delta K$  su prikazani u logaritamskoj razmeri. Vrednosti koeficijenata  $C$  i  $m$  za zavaren spoj u celini su određene fitovanjem odgovarajućih logaritamskih krivi (sa  $da/dN-\Delta K$  dijagrama), pri vrednostima koeficijenta  $C$  odgovaraju konstante uz  $x$  na dijagramima, dok vrednosti eksponenata predstavljaju koeficijente  $m$ . Iako je za ispitivanje zamora prvobitno predviđeno 12 epruveta, rezultati dobijeni na osnovu ovih 8 bili su dovoljno merodavno, pa je doneta odluka da preostale 4 epruvete ostanu u rezervi, stoga za njih nisu određene zamorne karakteristike.

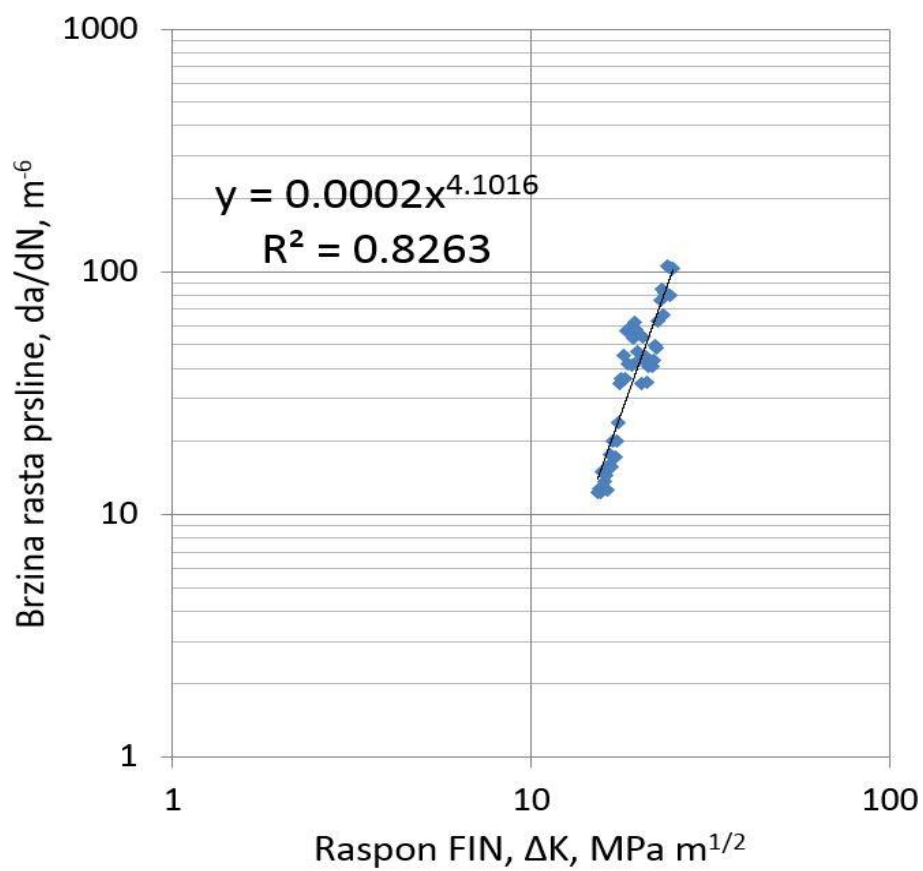
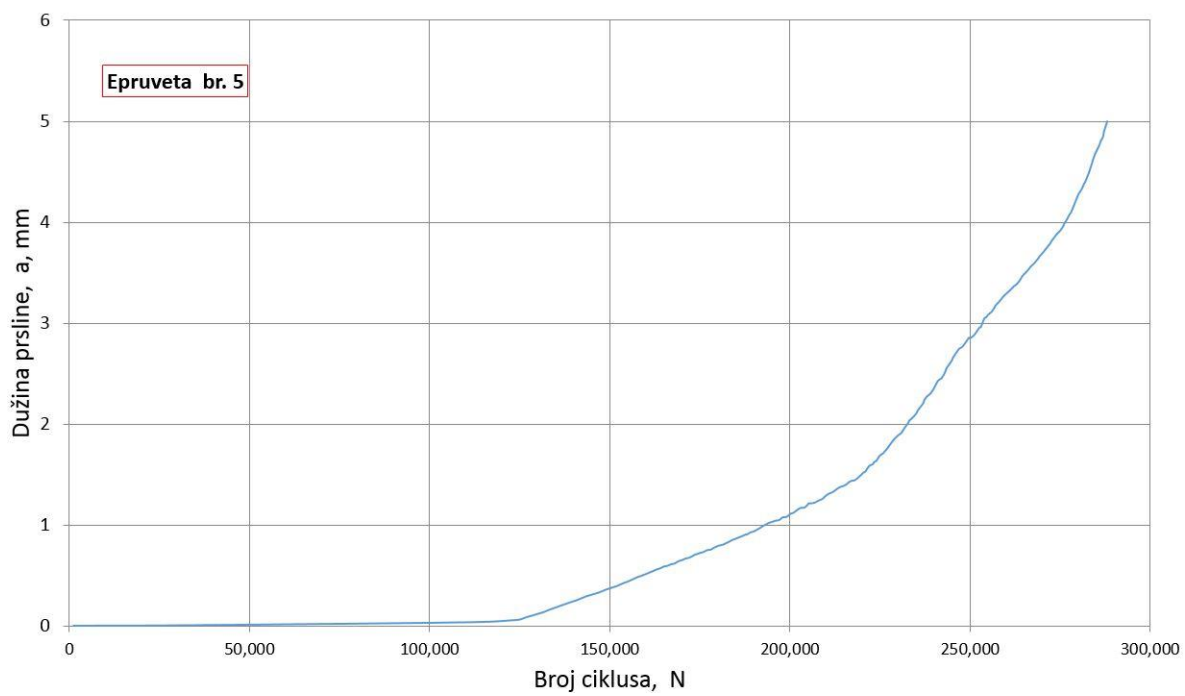
Vrednosti koeficijenata Parisove jednačine su prikazani i u tabeli 6.7.



Slika 6.50 Dijagrami a-N (gore) i da/dN-ΔK (dole) za epruvetu 1

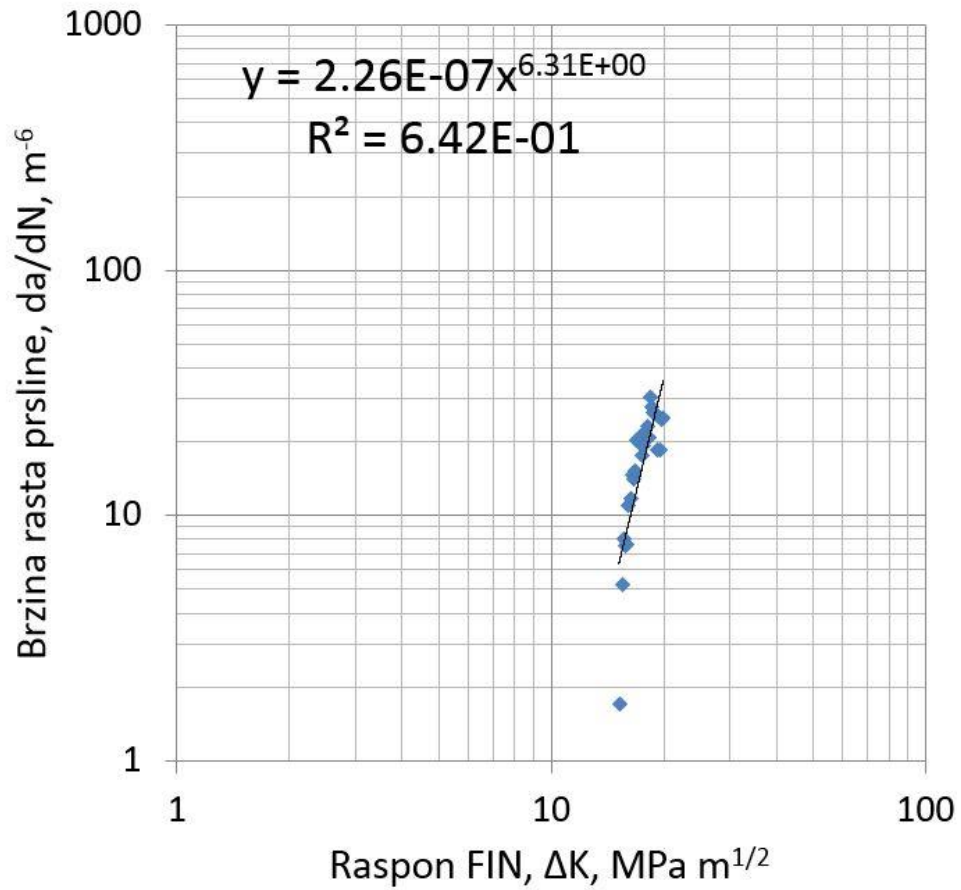
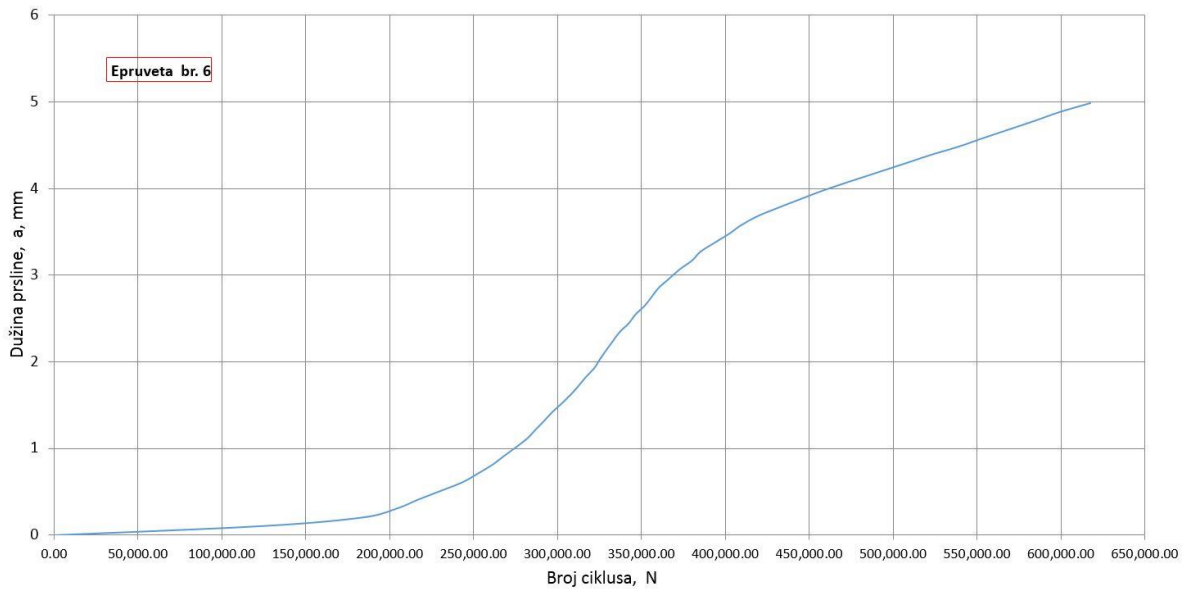


Slika 6.51 Dijagrami a-N (gore) i da/dN- $\Delta K$  (dole) za epruvetu 4

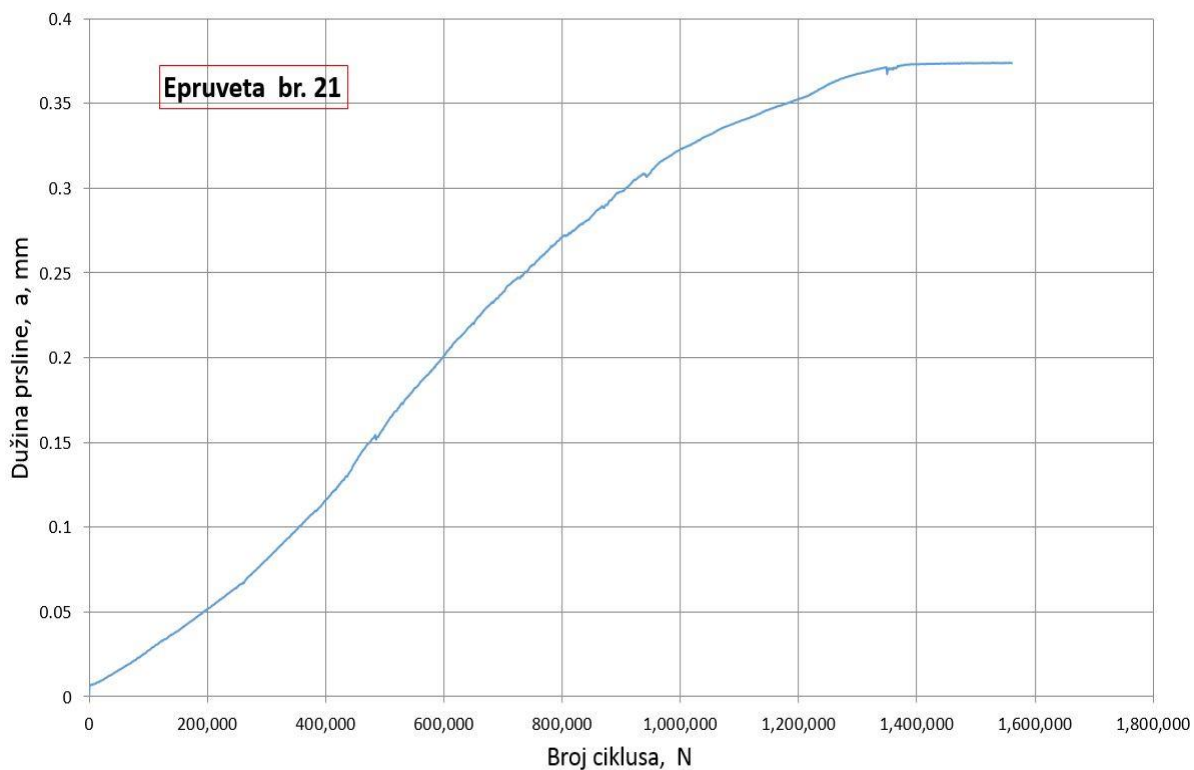


Slika 6.52 Dijagrami a-N (gore) i da/dN-ΔK (dole) za epruvetu 5





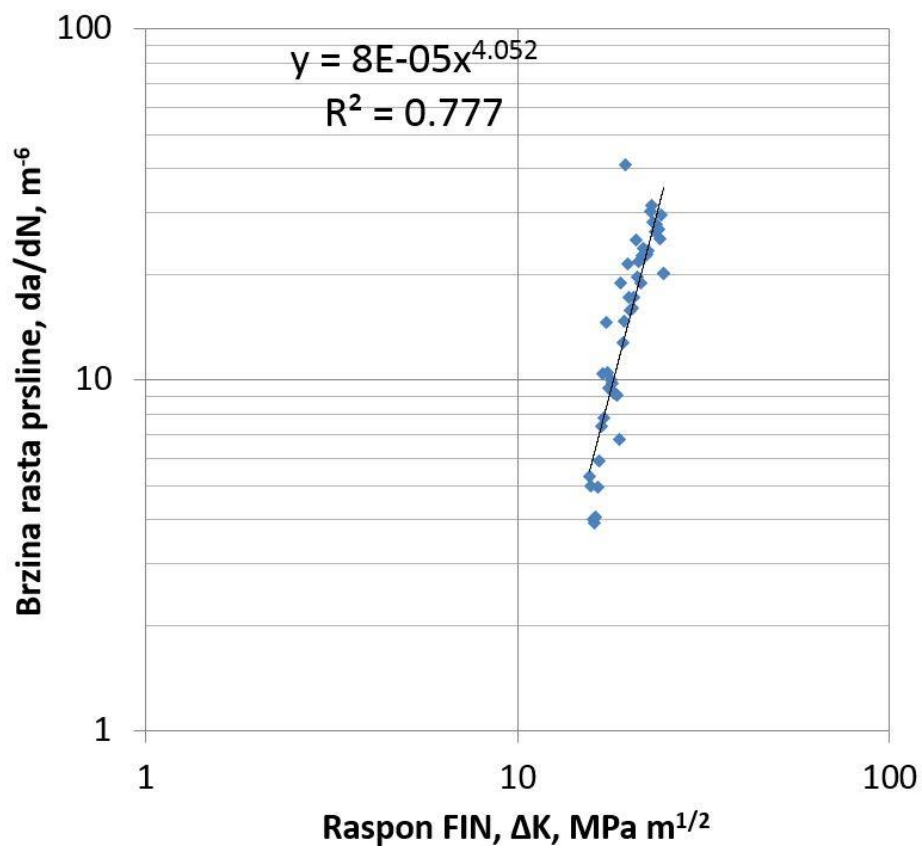
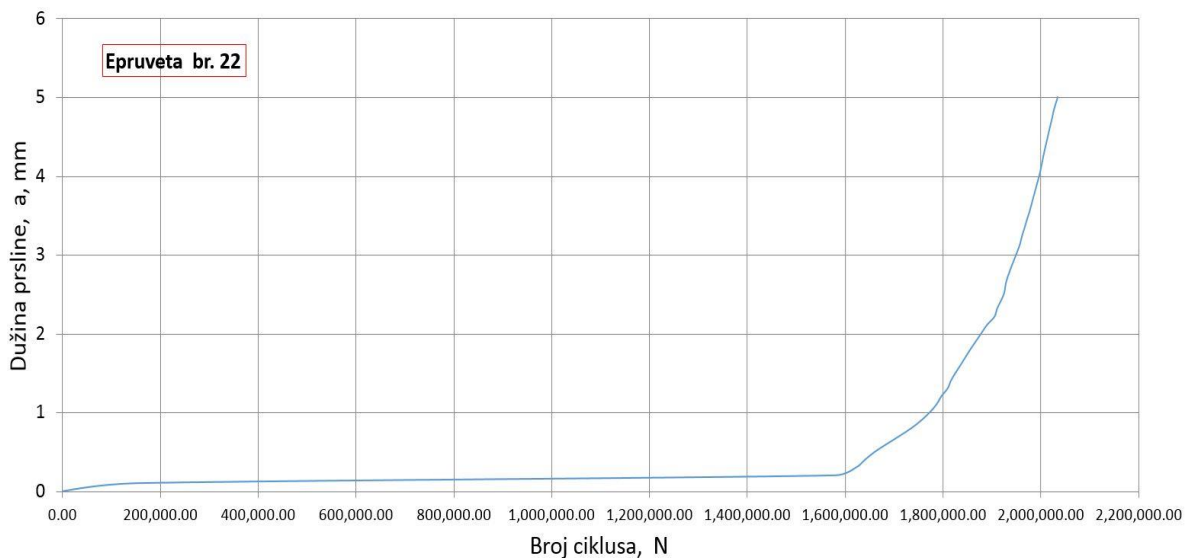
Slika 6.53 Dijagrami a-N (gore) i da/dN- $\Delta K$  (dole) za epruvetu 6



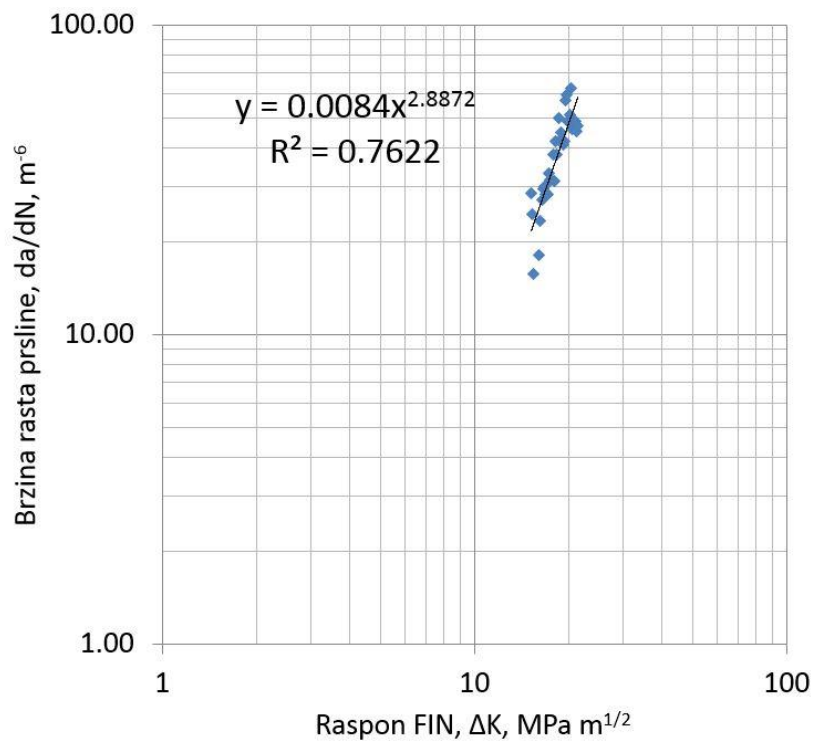
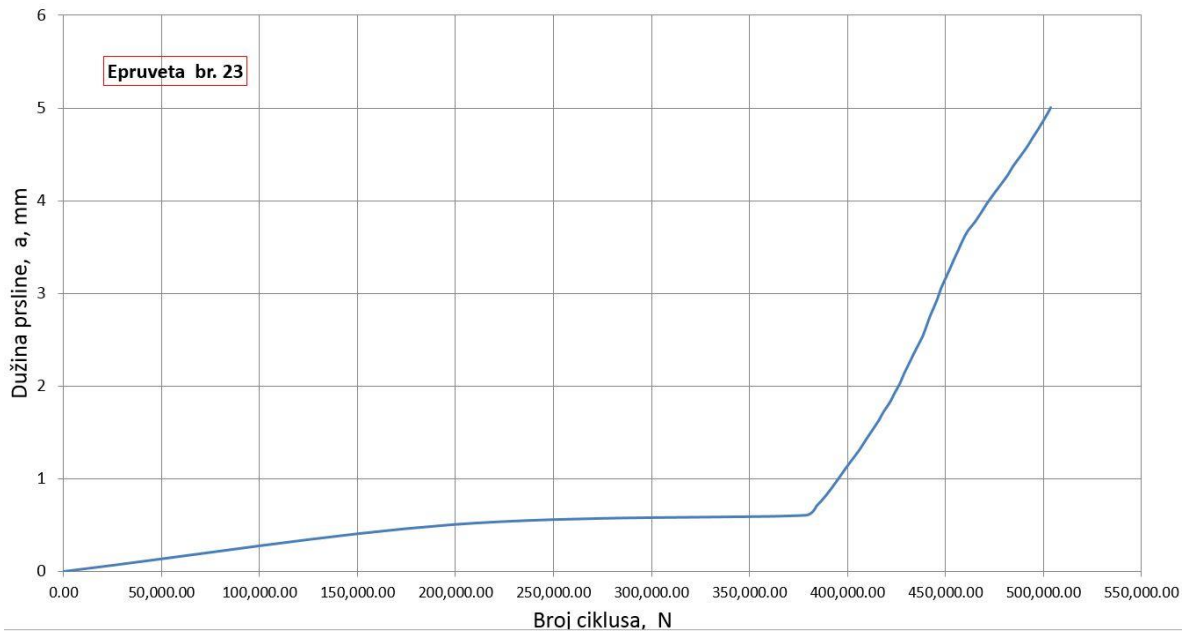
Slika 6.54 Dijagram a-N za epruvetu 21

Kao što se može videti, dijagram  $da/dN-\Delta K$  nije prikazan u slučaju epruvete 21, slika 6.54. U ovom slučaju, prsline je prestala da raste nakon oko 1 384 000 ciklusa, kao što se može videti na osnovu ravnog dela a-N krive, i dobijene vrednosti koeficijenata  $C$  i  $m$  nisu imale smisla. U narednim poglavljima će biti objašnjen uzrok ovih anomalija. Takođe se može primetiti da se od ove epruvete pa nadalje broj ciklusa značajno povećava, pri čemu treba imati u vidu da su epruvete 21-26 uzete iz lokacije 1.2 (gde su izmerene veće temperature).

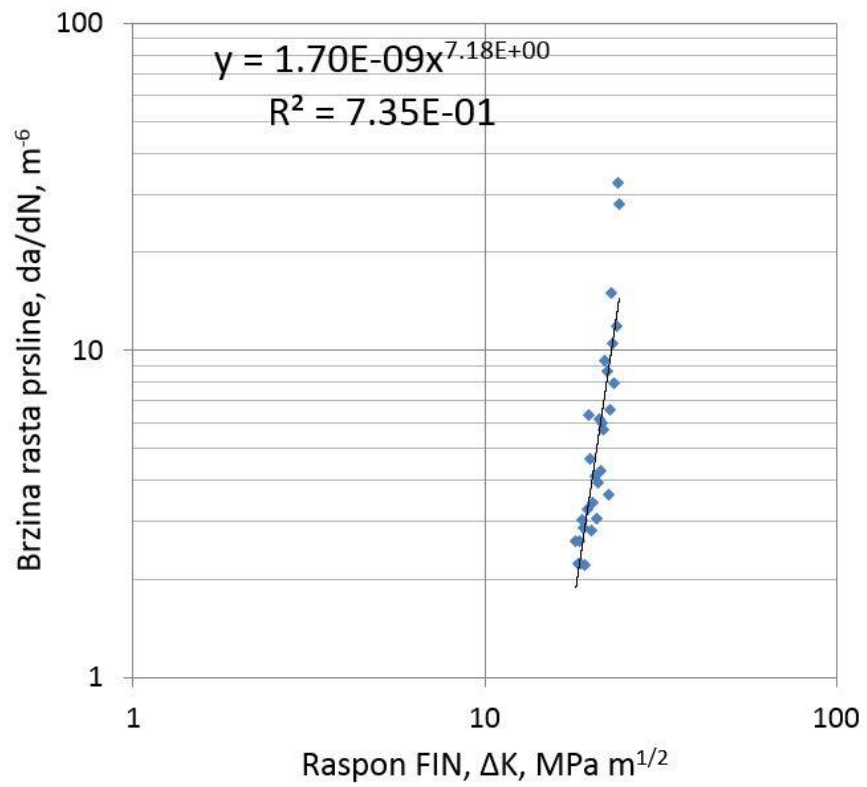
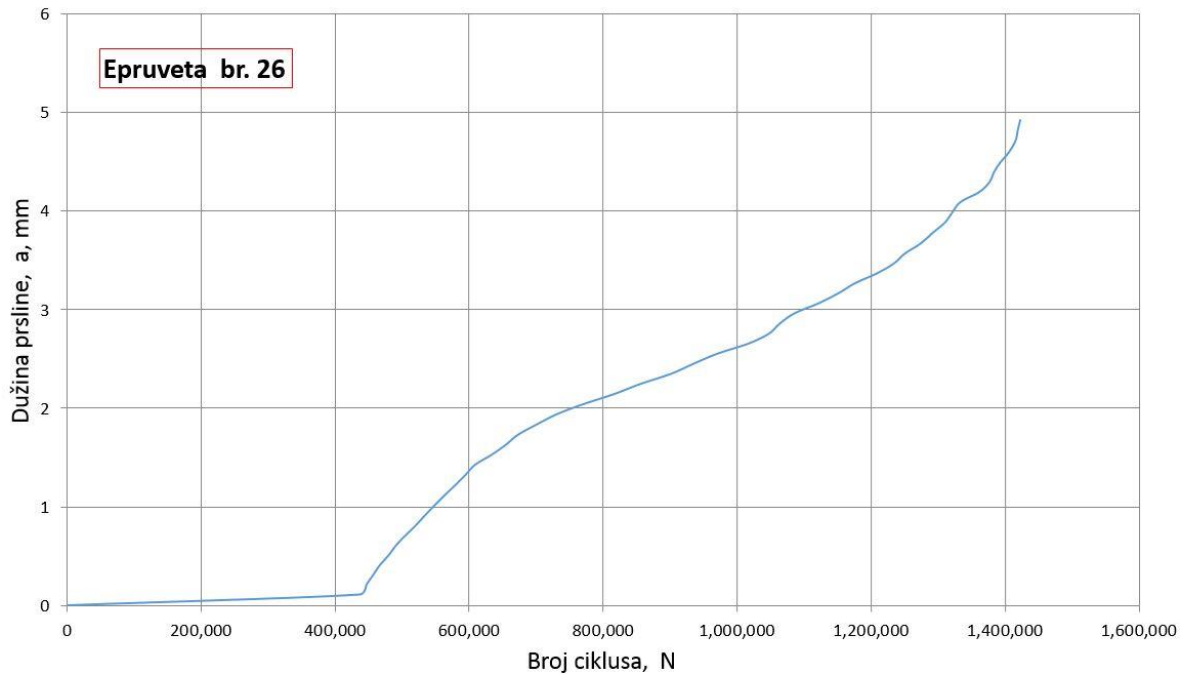
00



Slika 6.55 Dijagrami a-N (gore) i da/dN-ΔK (dole) za epruvetu 22



Slika 6.56 Dijagrami a-N (gore) i da/dN- $\Delta K$  (dole) za epruvetu 23



Slika 6.57 Dijagrami a-N (gore) i da/dN-ΔK (dole) za epruvetu 26

**Tabela 6.7** Parisovi koeficijenti određeni za epruvete ispitivane savijanjem u tri tačke

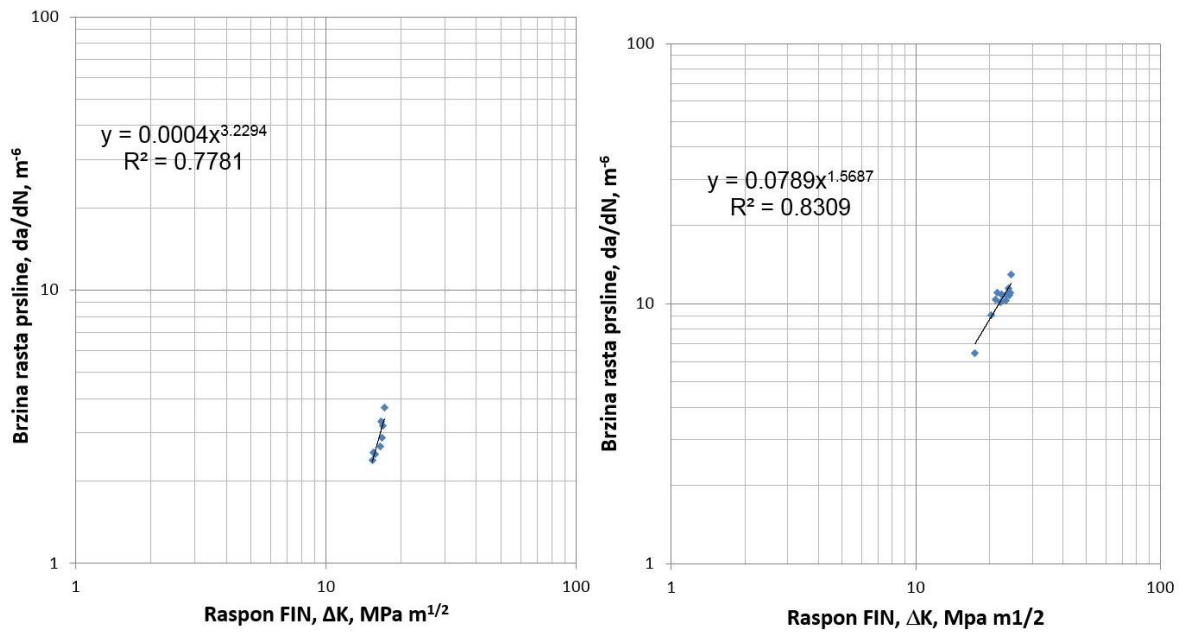
Epruveta	Grupa	C	m
1	1	$1.08 \cdot 10^{-10}$	3.77
4	2	$2 \cdot 10^{-10}$	3.81
5	2	$2 \cdot 10^{-10}$	4.10
6	2	$2.26 \cdot 10^{-11}$	6.31
21	3	-	-
22	3	$8 \cdot 10^{-11}$	4.0
23	4	$8.4 \cdot 10^{-9}$	2.89
26	4	$1.7 \cdot 10^{-15}$	7.18

Koeficijenti  $C$  i  $m$  prikazani u tabeli 6.7 određeni su na osnovu celokupne krive  $da/dN-\Delta K$ , nakon čega su njihove vrednosti određene i za pojedinačne oblasti zavarenog spoja. Broj različitih oblasti unutar zavarenog spoja svake epruvete je određen na osnovu promena nagiba krivih  $a-N$ , odnosno  $da/dN-\Delta K$ , uz pomoć slika dobijenih snimanjem prelomnih površina epruveta pomoću elektronskog mikroskopa. Cilj je bio da se utvrdi da li se promene na krivoj poklapaju sa promenama u mikrostrukturi zavarenog spoja.

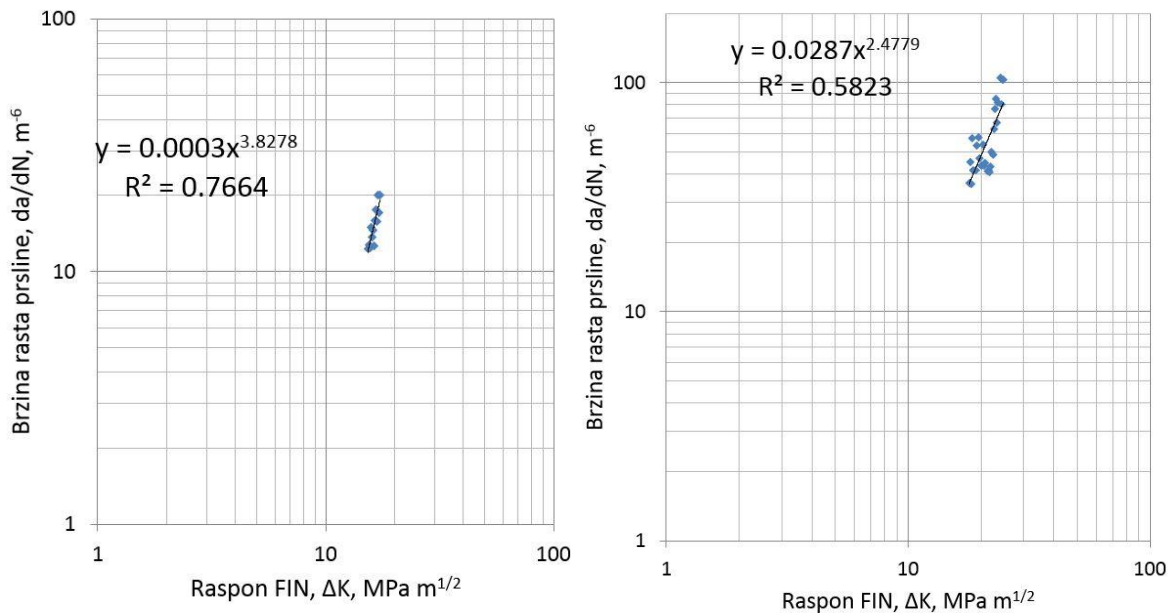
Na osnovu ovih rezultata su definisani parametri za numeričku simulaciju, i utvrđen je način na koji treba podeliti svaki model na određene zone različitih osobina. Potrebno je napomenuti da nije svaka oblast zavarenog spoja određena na ovaj način jednoznačno odgovarala osnovnom metalu, metalu šava i sitnozrnrom, odnosno krupnozrnrom ZUT-u, već su u nekim slučajevima određeni koeficijenti za oblasti u kojima se javljala kombinacija ovih zona. U većini slučajeva, identifikovane su dve različite zone unutar kojih je zamorna prslina rasla, dok su slučaju epruvete 22 definisane tri zone. Ovde su prikazani rezultati određivanja Parisovih koeficijenata za po jednu epruvete iz svake grupe:

8. Epruveta 1 - lokacija 1.1, zarez u licu
9. Epruveta 5 - lokacija 1.1, zarez u korenu
10. Epruveta 22 – lokacija 1.2, zarez u korenu
11. Epruveta 26 – lokacija 1.2, zarez u licu

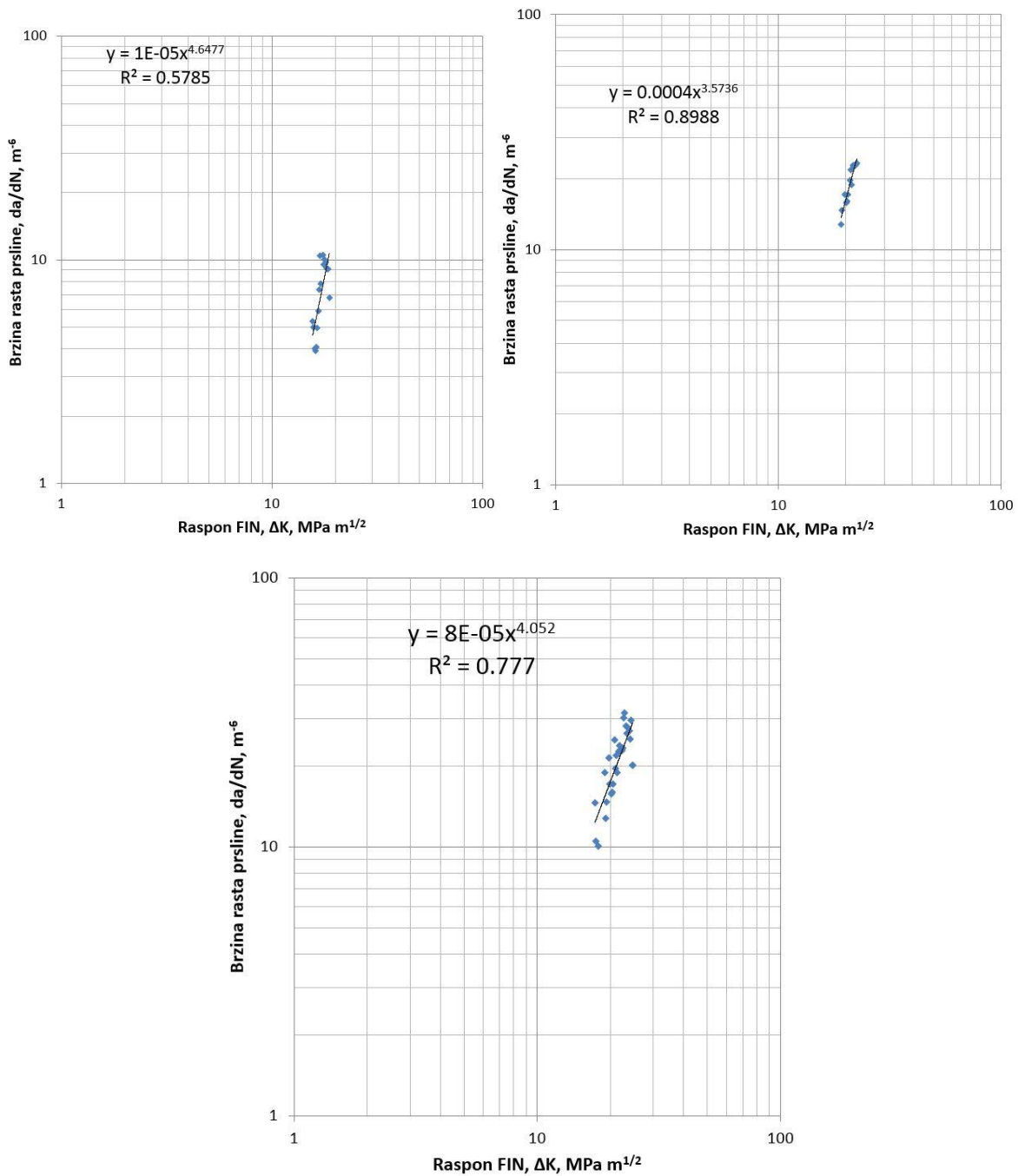
Slično kao i u slučaju određivanja ovih koeficijenata za celokupnu krivu, rezultati su dati u formi dijagrama, na slikama 6.58-6.61, kao i tabelarno (tabela 6.8). Na ovim slikama su prikazani odgovarajući segmenti svake krive prikazane na slikama 6.50-6.57.



Slika 6.58 Određivanje Parisovih koeficijenata za oblasti zavarenog spoja Epruvete 1 – ZUT (levo), OM (desno)

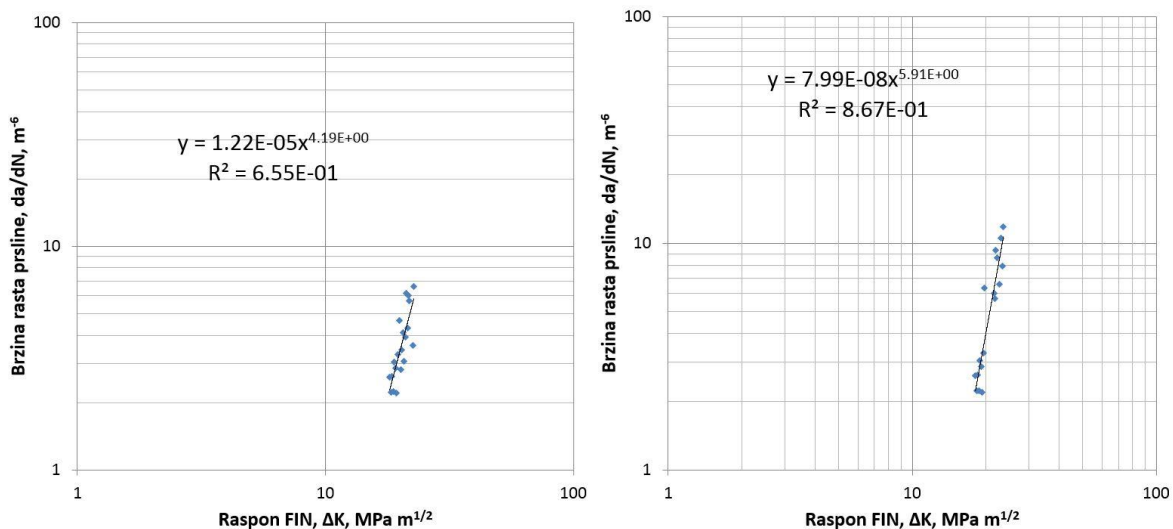


Slika 6.59 Određivanje Parisovih koeficijenata za oblasti zavarenog spoja Epruvete 5 – ZUT (levo), MŠ (desno)



Slika 6.60 Određivanje Parisovih koeficijenta za oblasti zavarenog spoja Epruvete 22 – OM (gore levo), ZUT (gore desno), ZUT sa MŠ (dole)





Slika 6.61 Određivanje Parisovih koeficijenata za oblasti zavarenog spoja Epruvete 26 – ZUT (levo), OM (desno)

**Tabela 6.8** Parisovi koeficijenti određeni za različite oblasti zavarenog spoja epruveta ispitivanih savijanjem u tri tačke.

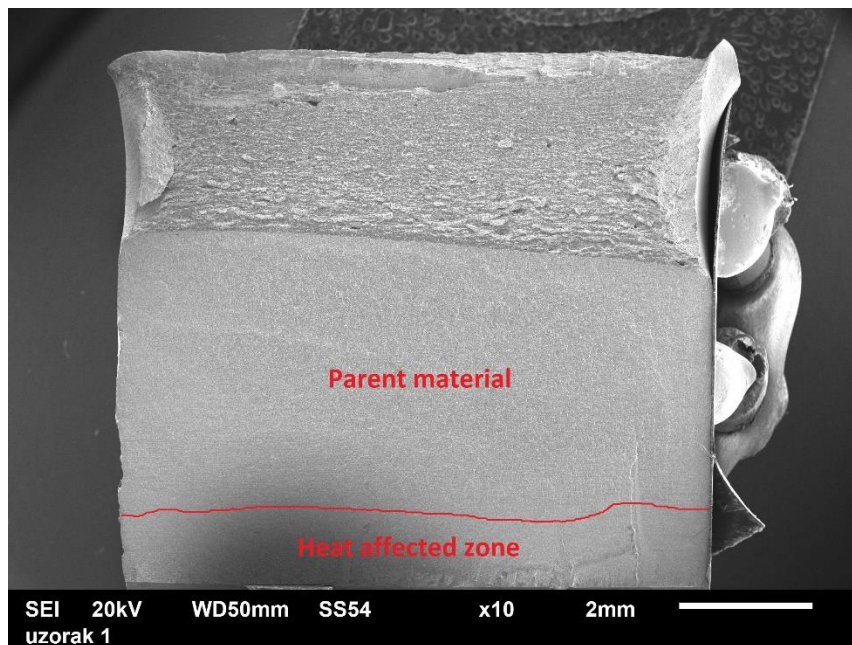
Epruveta	Oblast	C	m
1	Zona uticaja toplote	$4 \cdot 10^{-10}$	3.2294
1	Osnovni materijal	$7.89 \cdot 10^{-8}$	1.5687
5	Zona uticaja toplote	$3 \cdot 10^{-10}$	3.8278
5	Metal šava	$2.87 \cdot 10^{-8}$	2.4779
22	Osnovni materijal	$1 \cdot 10^{-11}$	4.6477
22	Zona uticaja toplote	$4 \cdot 10^{-10}$	3.5736
22	ZUT/metal šava	$8 \cdot 10^{-11}$	4.052
26	Zona uticaja toplote	$1.22 \cdot 10^{-11}$	4.19
26	Osnovni materijal	$7.99 \cdot 10^{-14}$	5.91

Detaljnija analiza ovih rezultata i njihova veza sa odgovarajućim mikrostrukturama će biti data u delu koji obuhvata diskusiju svih dobijenih rezultata, a poseban osvrt na vrednosti prikazane u tabeli 6.8 iznad će biti dat u narednom poglavlju, u delu vezanom za definisanje ulaznih parametara za numeričku simulaciju.

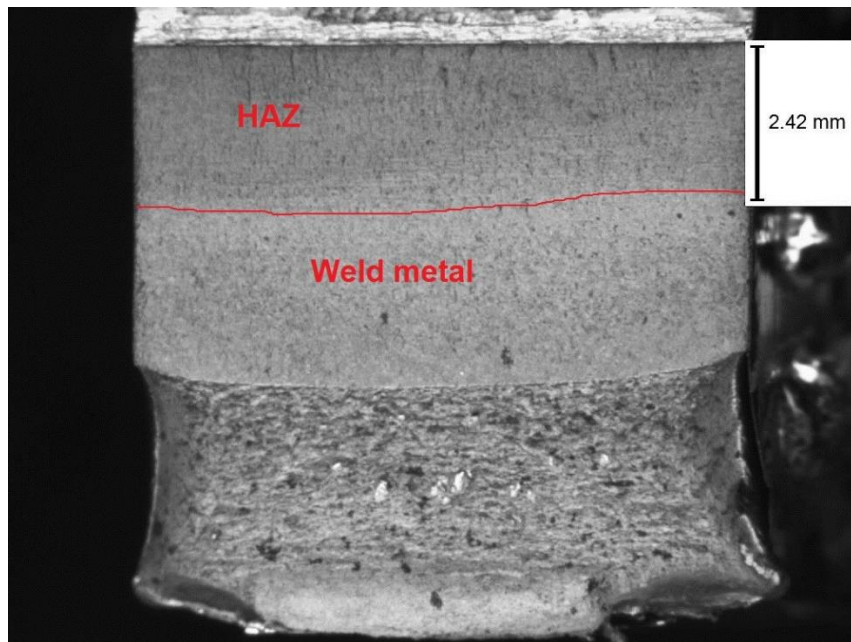
## 6.9 Fraktografija

Nakon što su završena zamorna ispitivanja, epruvete 1, 4-6, 21-23 i 26 su polomljene na Charpy-jevom klatnu (korišćenom pri ispitivanju žilavosti u okviru ovog istraživača), i prelomne površine su snimljene stereo mikroskopom, kako bi se vizuelno utvrdila povezanost nagiba stabilne zone krive brzina rasta prsline – broj ciklusa sa promenom mikrostrukture pri prelazima zamorne prsline između različitih oblasti unutar zavarenog spoja. Na slikama 6.62-6.68 su prikazane prelomne površine ovih epruveta (sa izuzetkom 21), i obeleženim oblastima zavarenog spoja, odnosno oblastima sa manje ili više izraženim razlikama u mikrostrukтури, pri čemu su neke od ovih slika preuzete iz [96].

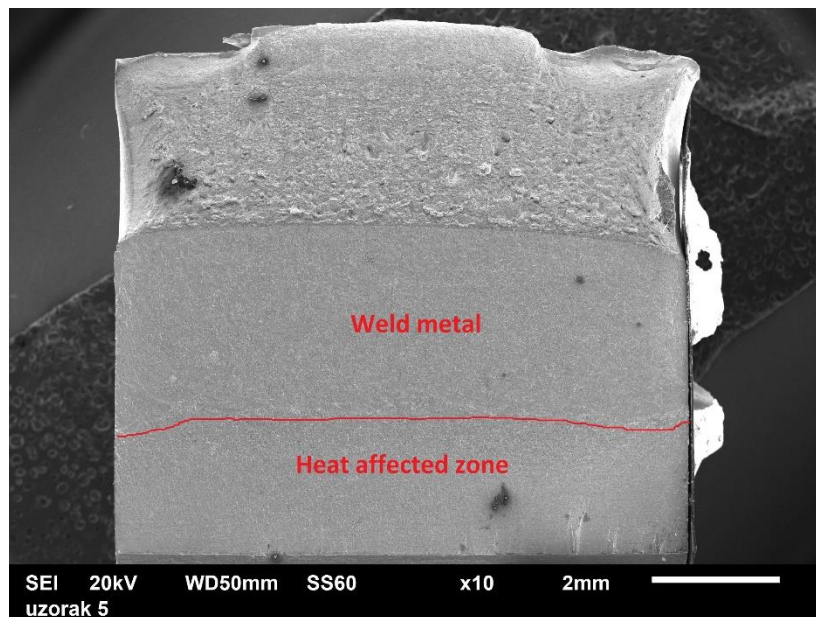
Treba napomenuti da za epruvete 4,6 i 23 nije urađeno određivanje vrednosti Parisovih koeficijenata, budući da su prve 4 epruvete dale dovoljno različite i merodavne rezultate, a ove epruvete su bile uzete iz istih grupa.



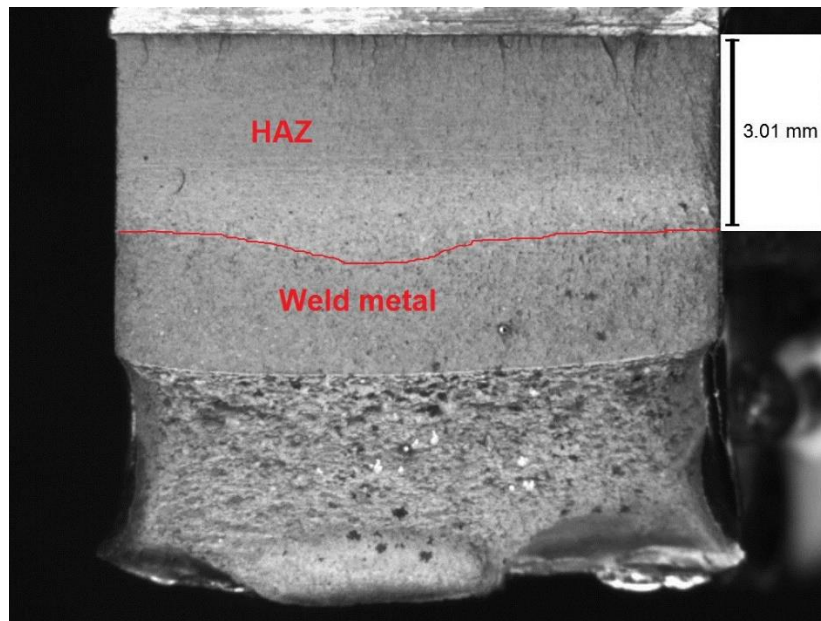
Slika 6.62 Izgled prelomne površine epruvete 1 (OM + ZUT).



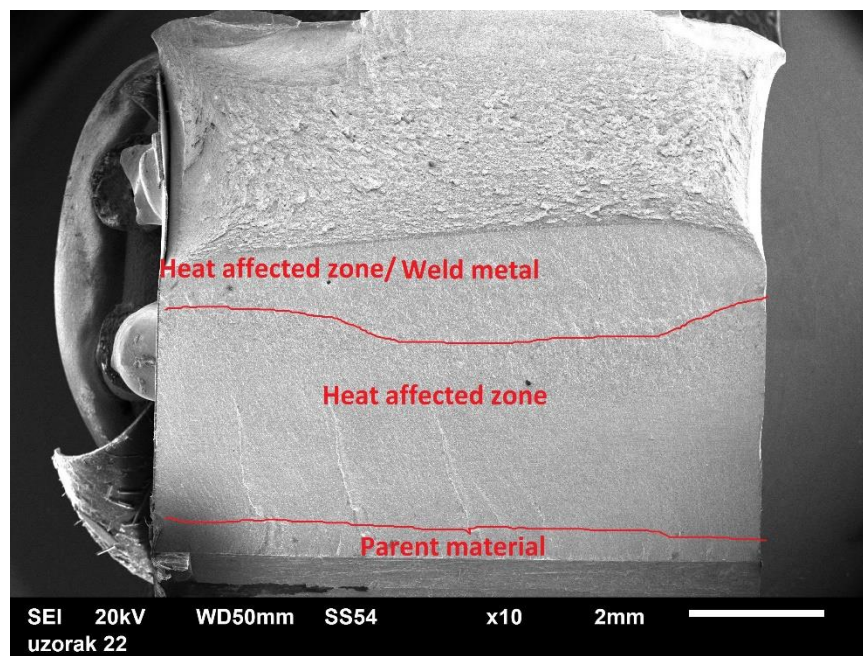
Slika 6.63 Izgled prelomne površine epruvete 4 (ZUT + MŠ)



Slika 6.64 Izgled prelomne površine epruvete 5 (ZUT + MŠ)

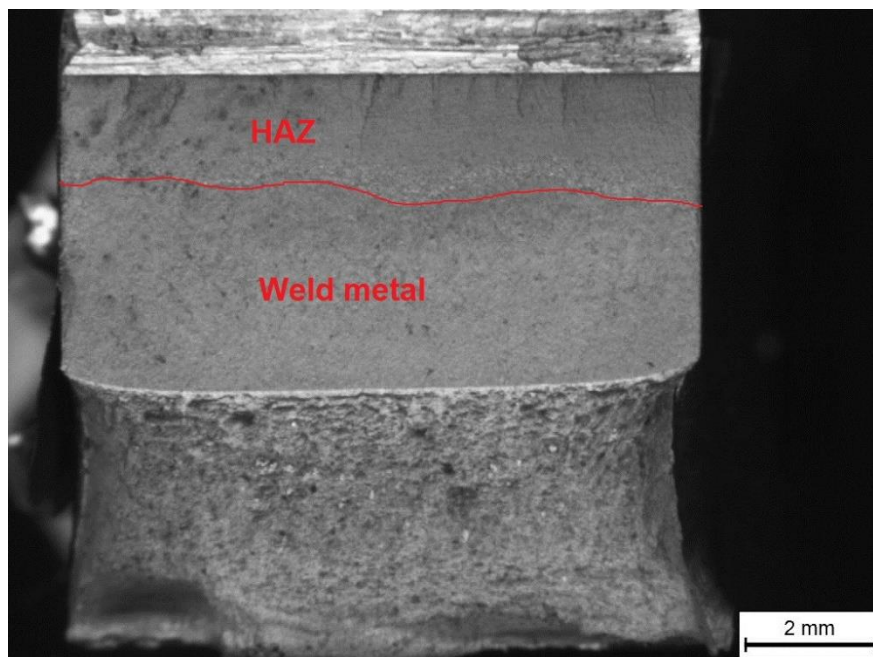


Slika 6.65 Izgled prelomne površine epruvete 6 (ZUT + MŠ)

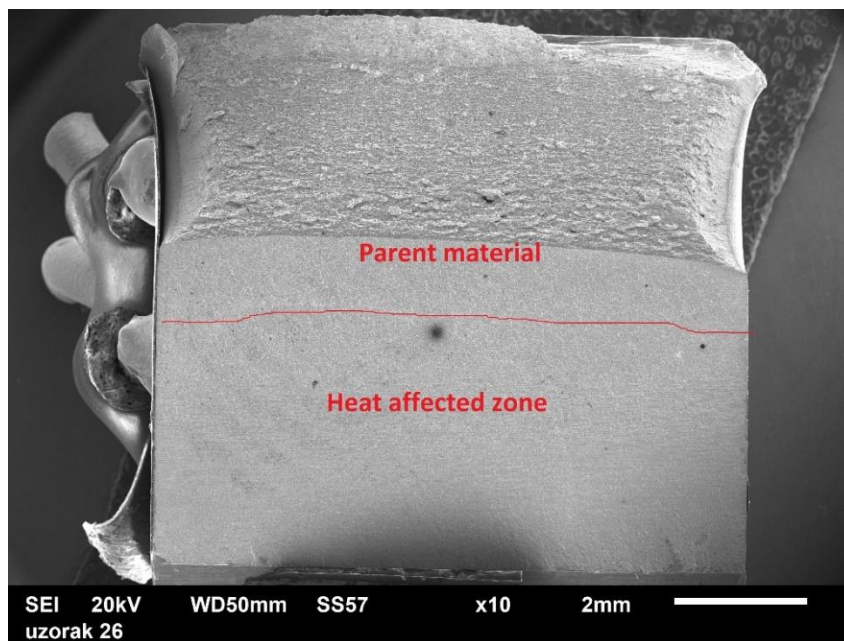


Slika 6.66 Izgled prelomne površine epruvete 22 (OM + ZUT + MŠ)





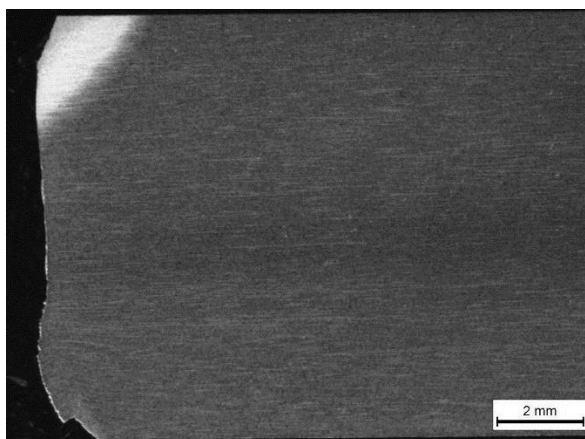
Slika 6.67 Izgled prelomne površine epruvete 23 (ZUT + MŠ)



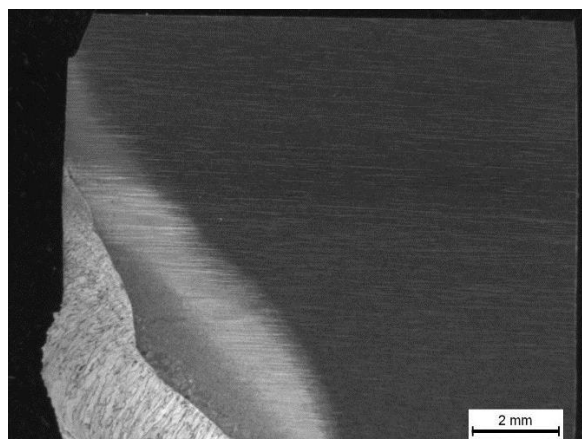
Slika 6.68 Izgled prelomne površine epruvete 26 (OM + ZUT)

Na slikama prelomnih površina prikazanim iznad se (manje ili više) lako mogu uočiti prelazi između različitih oblasti zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT), koji odgovaraju promenama nagiba stabilnog dela odgovarajućih  $da/dN$ - $\Delta K$  krivi. Takođe se može primetiti da je veći deo

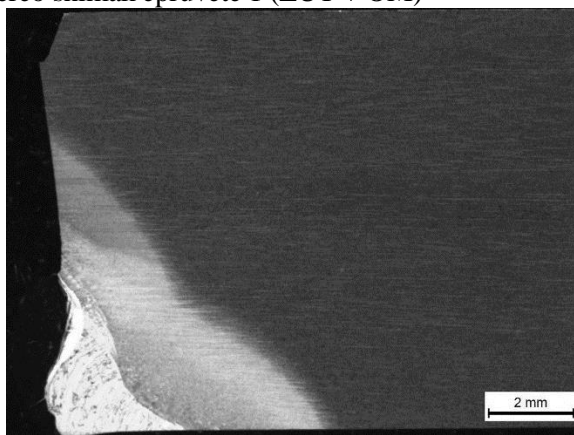
poprečnog preseka obuhvaćen zamornom prslinom, odnosno da područje krtog loma zauzima njegov manji deo. Iz ovoga se može zaključiti da je ispitani zavareni spoj pokazao jako dobru otpornost na rast zamorne prsline, s obzirom da je do loma došlo tek nakon značajnog smanjenja nosećeg poprečnog preseka, kao što je i očekivano u slučaju materijala koji poseduju dobru rezervu plastičnosti i duktilnosti.



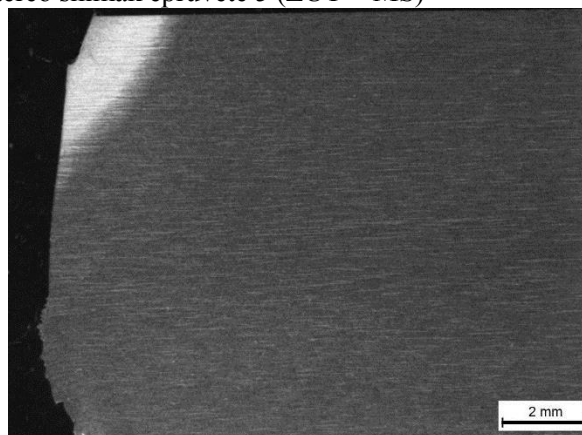
Stereo snimak epruvete 1 (ZUT + OM)



Stereo snimak epruvete 5 (ZUT + MŠ)



Stereo snimak epruvete 22 (OM + ZUT + MŠ)



Stereo snimak epruvete 26 (ZUT + OM)

Slika 6.69. Slike putanje rasta zamorne prsline dobijene stereo mikroskopijom

Na slici 6.69 prikazane su epruvete 1,5,22 i 26 nakon loma, snimljene stereo mikroskopom. Na ovoj slici se mogu videti prelomne površine „iz profila“, odnosno sve oblasti zavarenog spoja kroz koje je zamorna prslina prošla tokom svog rasta. Na ovim slikama se mogu jasno videti razlike u smislu oblasti zavarenog spoja kroz koje je prslina prolazila, u zavisnosti od položaja zareza (koren ili lice ZUT). Razlika u debljini zone uticaja toplote usled većih temperatura, izmerenih tokom postupka zavarivanja se može videti na

slikama za epruvete 5 i 22, sa kojih je očigledno da je ZUT u slučaju epruvete 22 sveukupno širi nego kod epruvete 5 (iako i kod ove epruvete postoji deo ZUT koji je neznatno manji u poređenju sa najširim delom ZUT epruvete 22). Takođe se može primetiti i da je u slučaju epruvete 22 vrh zareza bio zapravo u osnovnom materijalu, što je u značajnoj meri uticalo na rezultate ispitivanja savijanjem u tri tačke. Povezanost ovih slika sa otpornošću na zamor ispitanih epruveta će biti naknadno analizirana u okviru poglavlja Diskusija i Zaključci.

## **7. Numerička simulacija rasta zamorne prsline**

### **7.1 Postavka numeričkog proračuna**

U ovom delu disertacija biće prikazan proces izrade numeričkih modela zasnovanih na eksperimentalno dobijenim rezultatima, koji su imali za cilj da što vernije prikažu ponašanje epruveta pri ispitivanju savijanjem u tri tačke. Osnovu numeričke analize, koja je urađena primenom proširene metode konačnih elemenata, koja je detaljno prikazana u teorijskom delu ovog rada, činile su  $da/dN-\Delta K$  krive, na osnovu kojih su određeni koeficijenti Parisove jednačine,  $C$  i  $m$ , na način opisan u prethodnom poglavlju. Pri tome su granični uslovi i opterećenja definisani u skladu sa eksperimentom, odnosno sa uslovima u kojima su epruvete ispitane na RUMUL fraktomatu.

Sve numeričke simulacije urađene su u softverskom paketu ANSYS, verzija 2019 R1, koji se oslanja na proširenu metodu konačnih elemenata. Najpre je napravljen model u SolidWorks-u, čija je geometrija (koja se sastojala od epruvete, kao i od ravni koja će u kasnijoj fazi predstavljati prslinu), potom uvezena u ANSYS, nakon čega su definisani granični uslovi i opterećenje. Sledeći korak je obuhvatao generisanje mreže konačnih

elemenata, pri čemu je veličina elemenata izabrana sa ciljem da se postigne konvergencija rezultata, odnosno da dobijene vrednosti napona, deformacija, itd teže nekoj graničnoj vrednosti. Usled zahteva samog programskog paketa, usvojeni su TET elementi (elementi oblika četverostrane piramide). Što se veličine elemenata tile, u samom modelu je varirala u zavisnosti od njihove lokacije, pri čemu su manji elementi (finija mreža) korišćeni na mestima gde se očekivala koncentracija opterećenja, odnosno rast zamorne prsline, kako bi se dobili što precizniji rezultati. Na mestima udaljenim od kritičnih, korišćeni su veći elementi, kako bi se njihov ukupan broj, kao i broj čvorova smanjio, čime je proračun u određenoj meri pojednostavljen. Pri generisanju mreže je takođe vođeno računa o tome da nema oštih prelaza između elemenata maksimalnih i minimalnih veličina.

Usled činjenice da je u ovom trenutku nemoguće u okviru jednog modela definisati različite vrednosti za Parisove koeficijente (koje bi odgovarale određenim oblastima zavarenog spoja), odlučeno je da se pristupi izradi modela sa jednim materijalom (koji će odgovarati jednoj od oblasti utvrđenih metalografskim ispitivanjima), i njegovim odgovarajućim vrednostima  $C$  i  $m$ . Vrednosti ovih koeficijenata su usvajane u skladu sa rezultatima dobijenim ispitivanjem savijanjem u tri tačke, za svaku epruvetu zasebno.

U ovim modelima su prvobitno usvojeni Paris-ovi koeficijenti koji su odgovorali zoni u kojoj se nalazio zarez (odnosno vrh prsline), tj. ZUT, i ovaj proračun je trajao do trenutka u kome bi prsline prešla u sledeću zonu. Zatim je proračun ponovljen za istu geometriju i granične uslove, kao i opterećenje, ali sa početnom dužinom prsline koja je odgovarala dužini koju je prsline dostigla u stvarnom eksperimentu, u trenutku prelaska iz jedne zone u drugu. Cilj je bio da se uporedi ukupan broj ciklusa potrebnih za dostizanje dužine prsline od 5 mm (kao i brojevi ciklusa za svaki odgovarajući segment Paris-ove krive), sa eksperimentalno dobijenim rezultatima.

Zbog načina na koji su epruvete za savijanje u tri tačke opterećene (moment savijanja, umesto uobičajene prakse primene koncentrisane sile), numerički modeli su urađeni u 3 dimenzije, s obzirom da je u tom slučaju daleko jednostavnije dobiti rezultate. Vrednosti momenta za svaku epruvetu su uzete iz rezultata dobijenih na fraktomatu, a koji su takođe uporebljeni pri izradi pretodno prikazanih dijagrama vezanih za zamorno ponašanje. Momenti u ovim tabelama su zadati u Njutn-metrima, dok su u proračunu zadati u Njutn-



milimetrima, kako bi se red veličine uskladio sa dimenzijama samog modela (koje su zadate u milimetrima). Iz istog razloga je i modul elastičnosti za svaki materijal (odnosno svaku zonu zavarenog spoja) definisan u MPa ( $1 \text{ MPa} = \text{N/mm}^2$ ). Opterećenje od momenta deluje na sredini vrha zareza, i dovodi do savijanja poprečnog preseka. Tokom izrade numeričkih modela je utvrđeno da bi definisanje čistog momenta savijanja deformisalo model na način koji bi doveo do zatvaranja prsline, odnosno do dobijanja negativnih vrednosti faktora intenziteta napona, čime bi ceo proračun bio obesmišljen. Stoga je, umesto momenta, usvojena odgovarajuća sila kao opterećenje. Vrednost sile je za svaki model usvojena je tako da svojim delovanjem proizvodi moment savijanja u skladu sa vrednostima iz tabela.

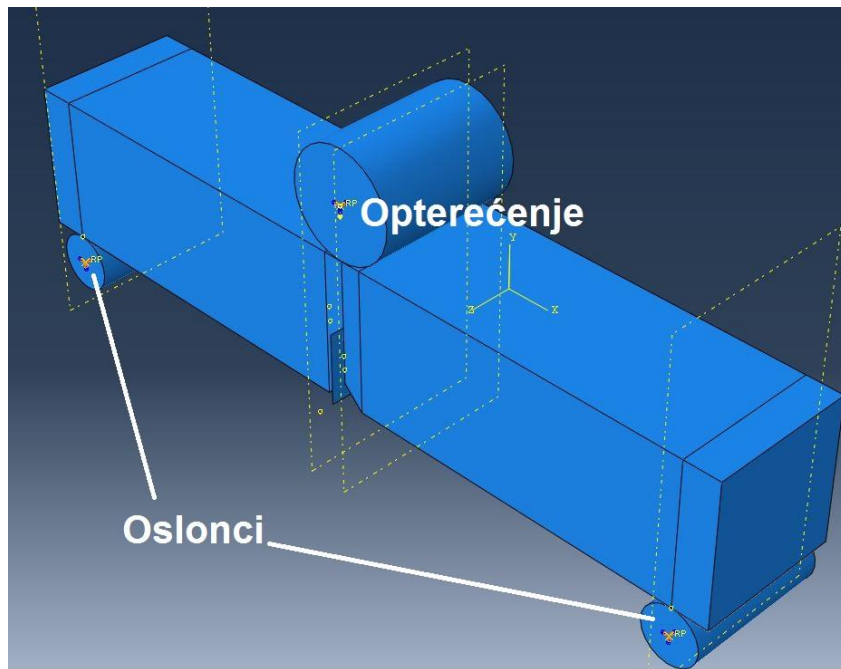
Potrebno je naglasiti da su vrednosti sile u ovom slučaju definisane tabelarno, odnosno da sila od početne vrednosti opada do minimuma koji je zabeležen za odgovarajuće momente iz eksperimentalno dobijenih tabela. Ovo odgovara stvarnim uslovima, s obzirom da fraktomat polako smanjuje moment savijanja pri zamaranju epruvete, kako bi se ispratilo smanjivanje poprečnog preseka epruvete usled rasta prsline. Uzimanje ovog faktora u obzir je bio jedan od razloga za odluku da se proračun radi u ANSYS-u, koji odnedavno ima mogućnost definisanja promenljivog opterećenja, na gore opisani način.

Što se graničnih uslova tiče, i oni su usvojeni na način koji odgovara stvarnom oslanjanju epruvete tokom ispitivanja. U ovom slučaju, epruveta je uklještena sa obe strane, što je uzeto u obzir i kod numeričkog modela. Stoga je model epruvete ograničen po površinama koje odgovaraju krajevima epruvete (dimenzija  $10 \times 10 \text{ mm}$ ), pri čemu su onemogućena pomeranja duž sve tri ose, kao i rotacije oko osa  $x$  i  $y$ . Rotacija oko  $z$  ose je ostala slobodna, budući da opterećenje zadato na prethodni način deluje upravo oko ove ose (koja leži u ravni poprečnog preseka epruvete). Iako u eksperimentu prsline u epruvetama u početku nisu bile prisutne, u numeričkoj simulaciji su one morale da budu definisane, i stoga je za svaki model u vrhu zareza postavljena prsline male početne dužine, kao osnova za dalji rast. Ova početna dužina iznosila je  $0.2 \text{ mm}$ . Nakon simulacije, rast zamorne prsline je upoređen sa realnim stanjem, pri čemu treba imati na umu da je pri savijanju u tri tačke na fraktomatu prsline rasla do dužine od  $5 \text{ mm}$ , pa je takvo ograničenje uvedeno i u modele. Pri tome je u slučaju svake zasebne oblasti prsline rasla do dužine koja je odgovarala rastojanju između vrha prethodne prsline i sledeće oblasti zavarenog spoja. Usled toga, kod rezultata

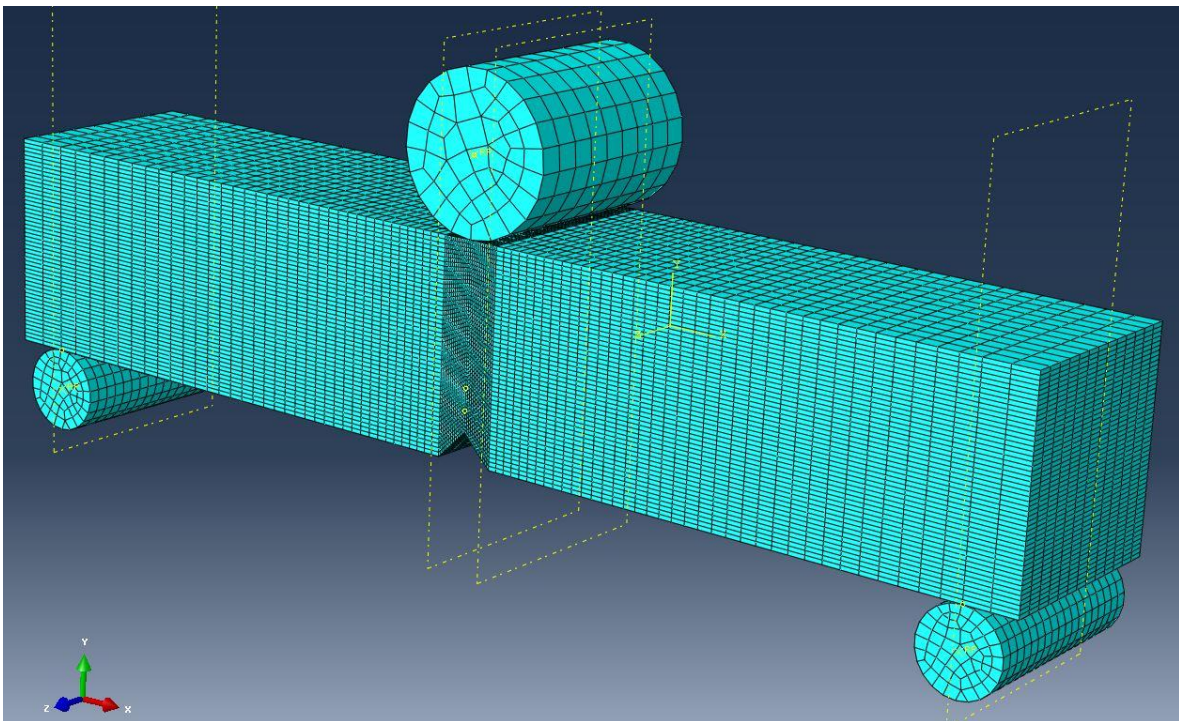
dobijenih primenom proširene metode konačnih elemenata, u obzir je uzet trenutak u kome je dostignut broj ciklusa opterećenja koji je odgovarao realnom broju ciklusa pri kojem je dostignuta dužina prsline od 5 mm, za svaku epruvetu, kao i za dužine prsline za svaku oblast ponaosob. Pri tome je na ukupan broj ciklusa dodat i broj ciklusa potreban stvarnoj zamornoj prslini da dostigne dužinu od 0.2 mm, odnosno svoju početnu vrednost u numeričkim modelima.

## **7.2 Definisane parametara**

Na slikama 7.1 i 7.2 se mogu videti faze izrade modela, sa definisanjem graničnih uslova, opterećenja i mreže konačnih elemenata. Kao što se može videti, usvojeni su TET elementi, s obzirom da jedino sa takvim elementima može da se uradi proračun rasta zamorne prsline u slučaju primene ANSYS-a. Kao što se može videti, model epruvete je podeljen u tri oblasti, pri čemu je centralna oblast (slika 7.2) predstavljala domen u kome prslina raste, kako bi proračun pojednostavio, jer bi u slučaju izbora celog modela za domen došlo do bespotrebno komplikovane analize koja ničemu ne bi doprinela, s obzirom da će prslina svakako rasti u pravcu zareza. Ovakav pristup je omogućio i ukрупnjavanje mreže konačnih elemenata u oblastima van domena prsline, čime se proračun dalje pojednostavljuje. Za sam domen prsline usvojeni su nešto manji elementi, koji se potom dalje automatski usitnjavaju u okolini samog vrha prsline, tokom trajanja simulacije. U ovom slučaju bi izbor veoma malih elemenata doveo do preteranog usitnjavanja mreže tokom analize, što bi opet značajno produžilo njeno trajanje, bez ikakvog poboljšanja što se rezultata tiče. Naravno, svaka simulacija obuhvatala je određen broj iteracija kako bi se dobila odgovarajuća konvergencija rezultata.



Slika 7.1. Granični uslovi i opterećenje, za sve modele



Slika 7.2 Mreža konačnih elemenata (model epruveta 1 – ZUT)

Granični uslovi su definisani na krajevima epruvete, koji su fiksirani kako bi se sprečilo njeno eventualno pomeranje u neželjenim pravcima, čime je obezbeđeno da se model savija u  $xy$  ravni. Treba napomenuti da je i u tački gde je definisana sila takođe definisan i granični uslov koji onemogućava sva pomeranja sa izuzetkom pravca delovanja sile, odnosno  $y$  ose.

Što se opterećenja tiče, već je opisan način na koji je ono usvajano, pri čemu treba napomenuti da je sila definisana u formi tabele, pri čemu su usvajane određene vrednosti između maksimalne i minimalne, u odnosu na broj ciklusa tokom eksperimenta. U ovim tabelama se zavisnost sile definiše u odnosu na vreme, i stoga su merodavni brojevi ciklusa usvajani na osnovu vremena trajanja eksperimenta, za korake od 0.2 (ako pretpostavimo da je ceo vremenski interval 1), čime je obezbeđena realnija simulacija promene opterećenja tokom samog eksperimenta. Usvojena vrednost opterećenja je iznosila 2569 N, pošto je utvrđeno da bi ovakva sila u sredini epruvete izazvala momente koji bi odgovarali eksperimentu.

Broj konačnih elemenata (slika 7.2) je varirao za različite modele, usled potrebe da se postigne konvergencija. U slučaju modela koji su prikazivali rast prsline nakon njenog prelaska u narednu oblast zavarenog spoja je korišćen veći broj elemenata (pri čemu je najprogušćenija bila mreža u domenu prsline). U tabeli 7.1 je prikazan broj elemenata i čvorova za svaki od modela.

Tabela 1. Broj elemenata i čvorov za modele različitih oblasti zavarenog spoja za epruvete 1,5,22 i 26

Model	Broj elemenata	Broj čvorova
Epruveta 1 – ZUT	81973	131174
Epruveta 1 – OM	94452	162248
Epruveta 5 – ZUT		
Epruveta 5 – MŠ		
Epruveta 22 – OM		
Epruveta 22 – ZUT		
Epruveta 22 - MŠ		
Epruveta 26 – ZUT	81973	131174
Epruveta 26 - OM	91920	155617

Takođe je definisan i broj koraka rasta prsline, kako bi se omogućilo da ona dostigne odgovarajuću dužinu i kako bi se onda posmatrao broj ciklusa i njegov odnos sa eksperimentalnim rezultatima. Broj koraka za svaki model je naravno varirao usled različitih

vrednosti Paris-ovih koeficijenata, kao i različitih dimenzija oblasti zavarenog spoja kroz koje se zamorna prslina kretala tokom svog rasta.

Što se tiče osobina materijala, one su određene na osnovu prethodno opisanih eksperimenata, pre svega ispitivanja zatezanjem, za osnovni i dodatni materijal (pri čemu su za ovaj drugi rezultati dobijeni u okviru ispitivanja prikazanog u referenci [72], odnosno preko mikrotvrdoće, u slučaju zone uticaja toplote. Vrednosti tvrdoće koje su usvojene kao merodavne su bile one koje su izmerene na delovima ZUT-a kroz koje se prslina kretala, i usvojena je njihova prosečna vrednost, nakon čega su određene mehanike osobine.

Urađeni su modeli za ukupno četiri epruvete, po jednu iz svake od četiri grupe – 1,5,22 i 26, što je zahtevalo ukupno 9 različitih modela (tri epruvete sui male po dve oblasti zavarenog spoja kroz koje je prslina rasla, epruveta 22 ih je imala 3).

Što se tiče mehaničkih osobina, utvrđenih na prethodno opisane načine (za svaku potrebnu oblast zavarenog spoja), od najvećeg značaja su bile granica tečenja i zatezna čvrstoća, kao i izduženje, i u tabeli ispod su prikazane njihove usvojene vrednosti (date su stvarne vrednosti napona, čiju upotrebu ABAQUS zahteva, a koje se određuju na osnovu vrednosti sa inženjerske krive napon-deformacija):

Model	Granica tečenja [MPa]	Zatezna čvrstoća [Mpa]	Izduženje [-]	Modul elastičnosti [GPa]	Poisson-ov Koeficijent [-]
Epruveta 1 ZUT	652	1085	16.8	206	0.33
Epruveta 1 OM	461	735	21.75	206	0.33
Epruveta 5 ZUT	652	1085	16.8	206	0.33
Epruveta 5 MŠ	481	772	17.4	206	0.33
Epruveta 22 OM	461	735	21.75	206	0.33
Epruveta 22 ZUT	663	1112	21.84	206	0.33
Epruveta 22 MŠ	481	772	17.4	206	0.33
Epruveta 26 ZUT	634	1044	16.6	206	0.33
Epruveta 26 OM	461	735	21.75	206	0.33

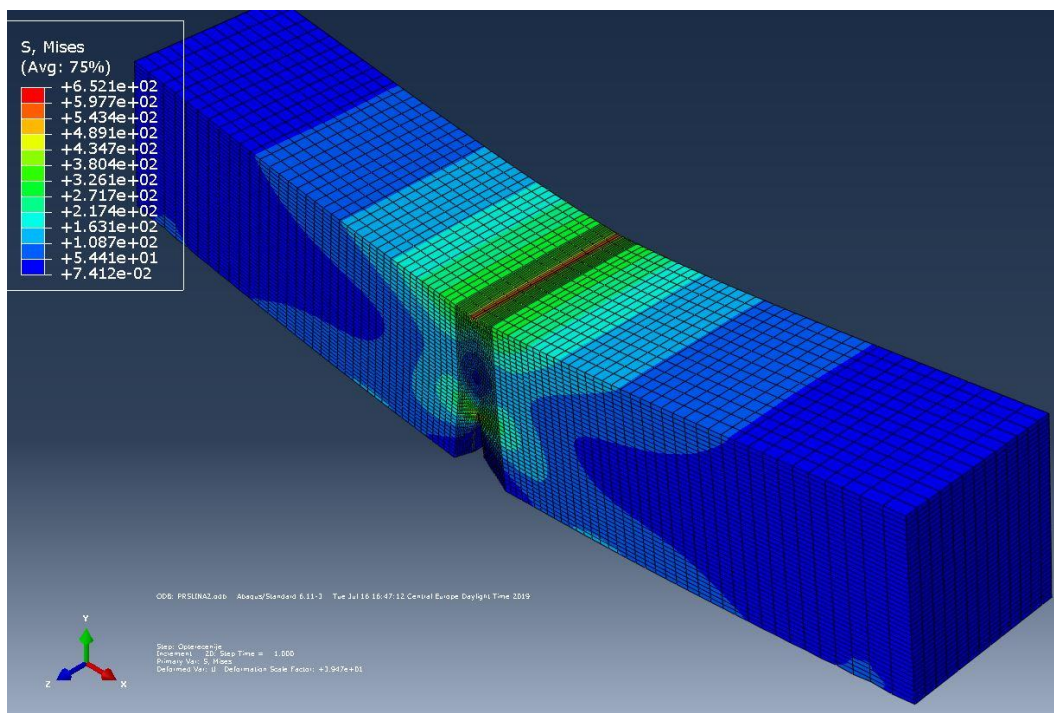
### 7.3 Rezultati simulacija

U ovom delu poglavlja o numeričkoj simulaciji rasta zamorne prsline će biti prikazani dobijeni rezultati za sve četiri merodavne epruvete. U okviru rezultata, prikazani su sami modeli u deformisanom obliku, sa vrednostima napona i deformacija, kao i dobijeni

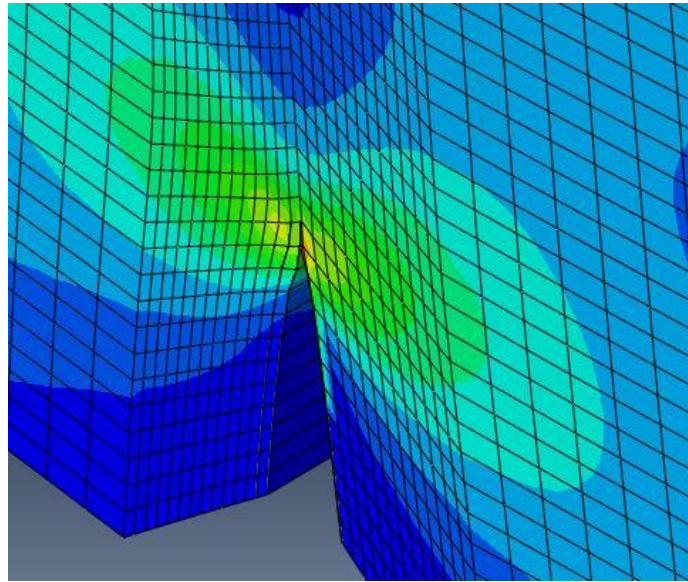
dijagrami dužina prsline – broj ciklusa za svaki model. Na kraju, prikazane su i vrednosti faktora intenziteta napona, za prvi oblik otvaranja prsline (s obzirom da je taj oblik otvaranja i jedini bitan kod posuda pod pritiskom, usled opterećenja koje deluje u njima).

### 7.3.1 Epruveta 1

U slučaju epruvete 1 su urađena dva modela, jedan za zonu uticaja toplote, iz koje je prslina krenula, i drugi za osnovni materijal, kroz koji je rasla u drugoj fazi, i gde je dostigla dužinu od oko 5 mm. Kao što je napomenuto, u prvom modelu je zadata mala početna dužina prsline (kako bi se obezbedilo da njen rast zapravo i krene), i posmatran je broj ciklusa potreban da se dostigne dužina pri kojoj zamorna prslina prelazi u osnovni materijal (u ovom slučaju je dužina bila oko 1.4 mm. Broj ciklusa je iznosio 705 000, za ZUT odnosno 1 023 000 za ZUT i OM, ukupno, što predstavlja vrednosti nešto niže u odnosu na eksperimentalno dobijene brojeve ciklusa pri odgovarajućim dužinama prsline. Izgled modela nakon delovanja zamornog opterećenja je prikazan na slikama 7.3 i 7.4, sa raspodelom napona u okolini vrha prsline. Oblast obeležena crvenom bojom na vrhu modela predstavlja lokaciju delovanja sile, i kao takva neće biti uzeta u obzir pri analiziranju dobijenih rezultata.

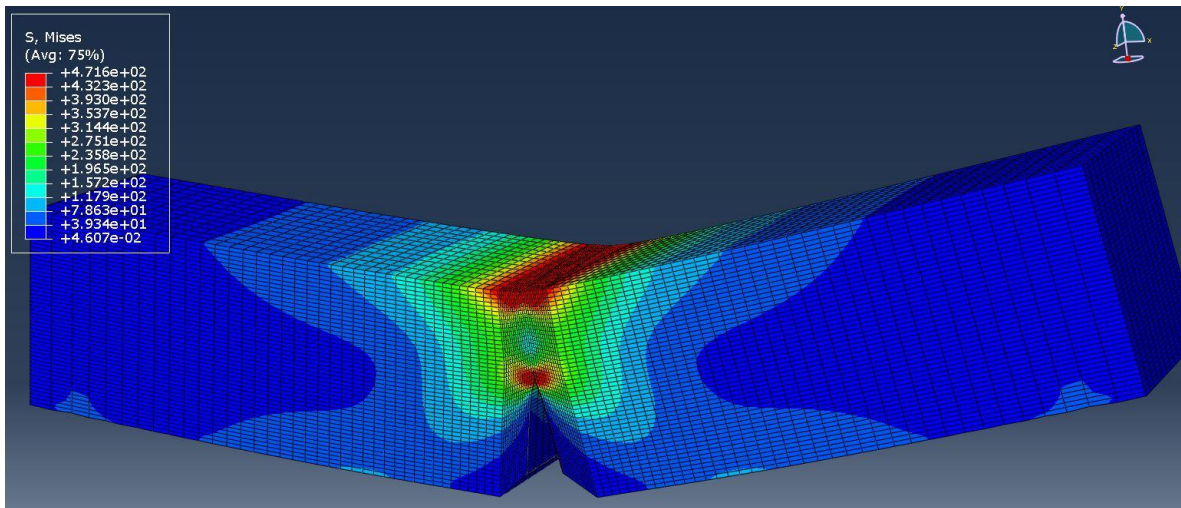


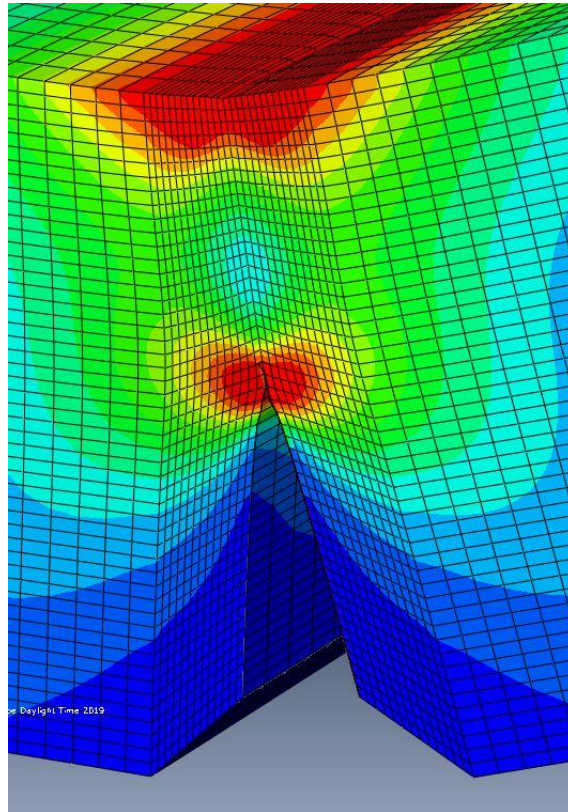




Slika 7.3 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 1 ZUT (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 1 ZUT (dole)





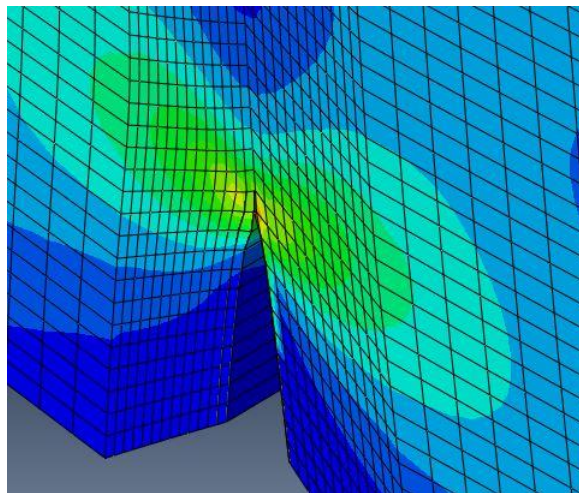
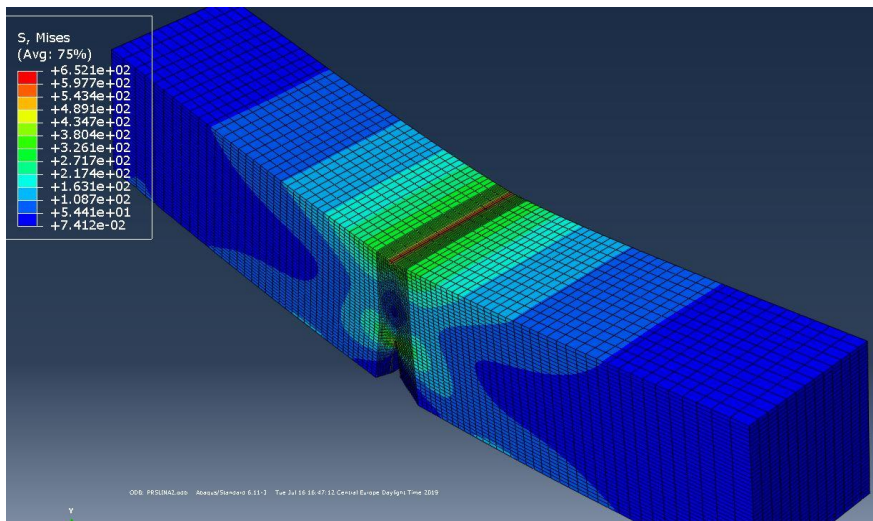
Slika 7.4 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 1 OM (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 1 OM (dole)

### 7.3.2 Epruveta 5

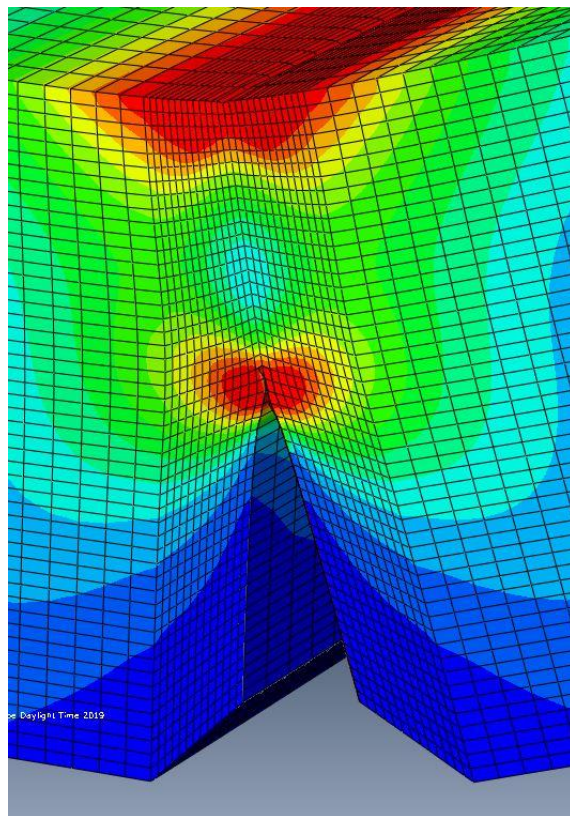
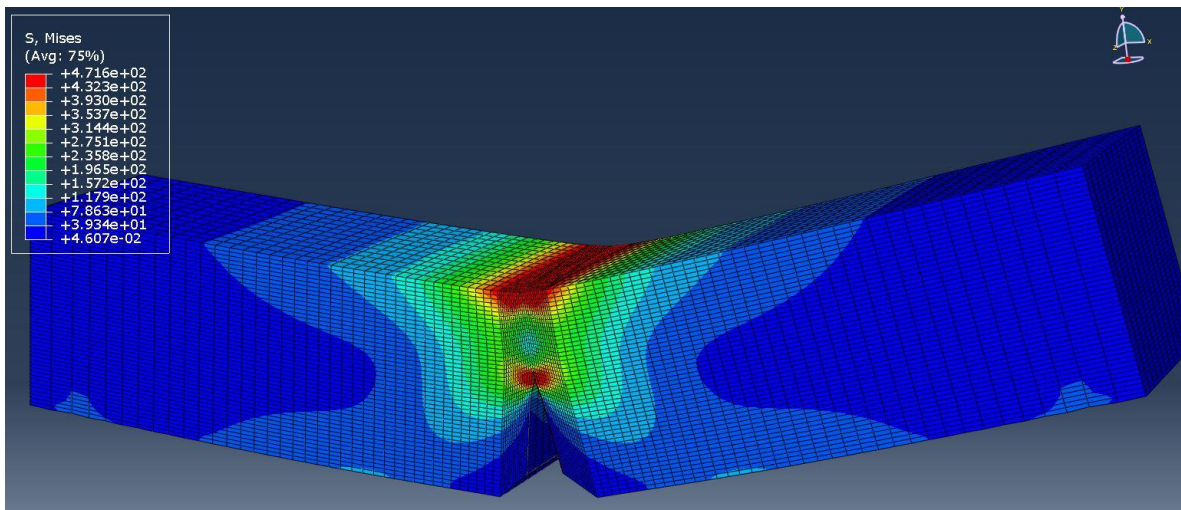
U slučaju epruvete 5 su takođe urađena dva modela, s tim što je u ovom slučaju jedan urađen za ZUT, a drugi za metal šava (zarez se naazio u korenu). Posmatran je broj ciklusa potreban da se dostigne dužina pri kojoj zamorna prslina prelazi u osnovni materijal (u ovom slučaju je dužina bila oko 2.2 mm. Broj ciklusa je iznosio 215 000, za ZUT odnosno 271 600 za ZUT i MŠ, ukupno, što predstavlja vrednosti nešto niže u odnosu na eksperimentalno dobijene brojeve ciklusa pri odgovarajućim dužinama prsline. Izgled modela nakon delovanja zamornog opterećenja je prikazan na slikama 7.5 i 7.6.





Slika 7.5 Raspodela napona u deformisanom modelu, epruveta 5 ZUT (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom napona u vrhu, epruveta 5 ZUT (dole)

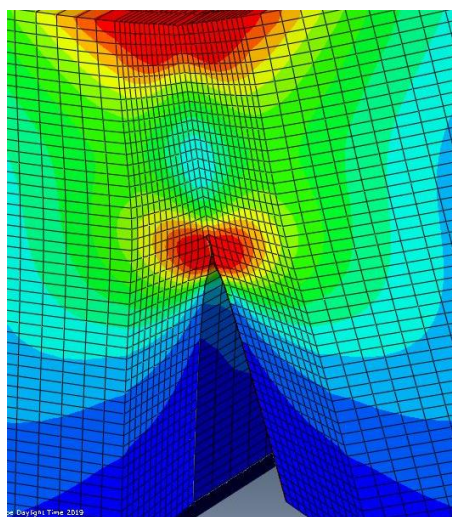
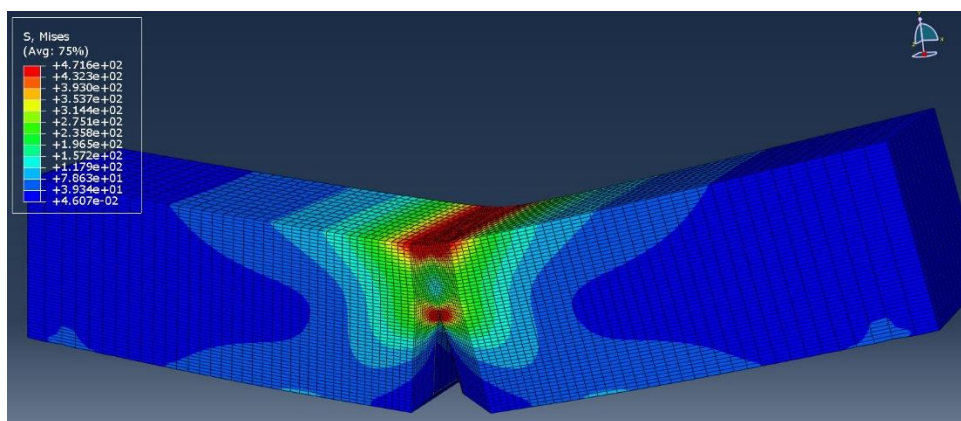


Slika 7.6 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 5 MŠ (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 5 MŠ (dole)

### 7.3.3 Epruveta 22

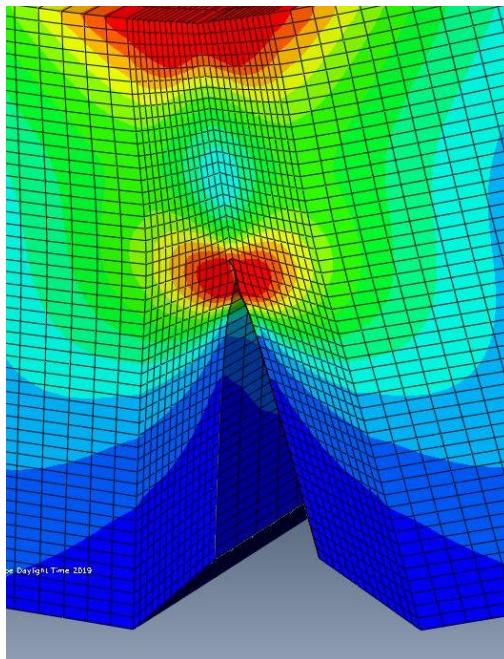
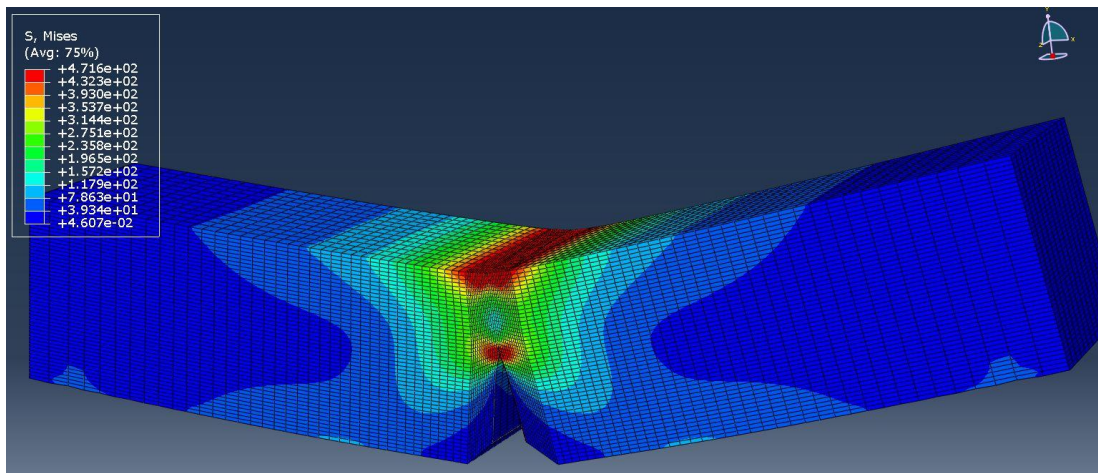
Kod ove epruvete su napravljena tri modela, s obzirom na putanu zamorne prsline, čiji se vrh u ovom slučaju nalazio u osnovnom materijalu, i tek naknadno prešao u zonu uticaja toplote, nakon čega je dužina od 5 mm dostignuta u metalu šava. Posmatran je broj ciklusa potreban da se dostigne dužina pri kojoj zamorna prslina prelazi iz OM u ZUT je iznosila 0.5 mm, i odgovarao joj je broj ciklusa od 1 432 000, dok je na prelazu iz ZUT u MŠ prslina dostigla dužinu od 3.8 mm, pri ukupnom broju ciklusa 1 740 700. Konačan broj ciklusa do loma iznosio je oko 2 045 000. Izgled modela nakon delovanja zamornog opterećenja je prikazan na slikama 7.7-7.9.



Slika 7.7 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 22 OM (gore)

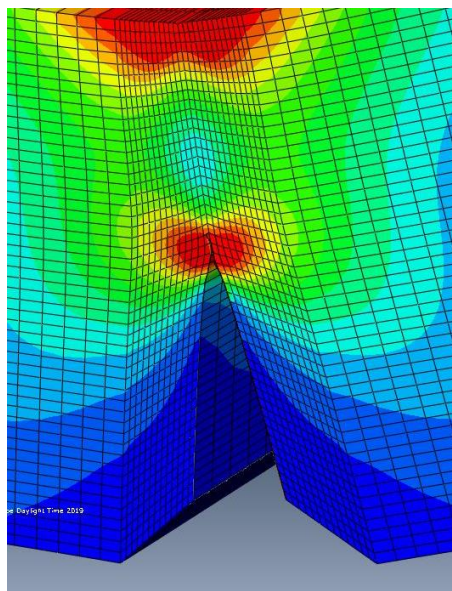
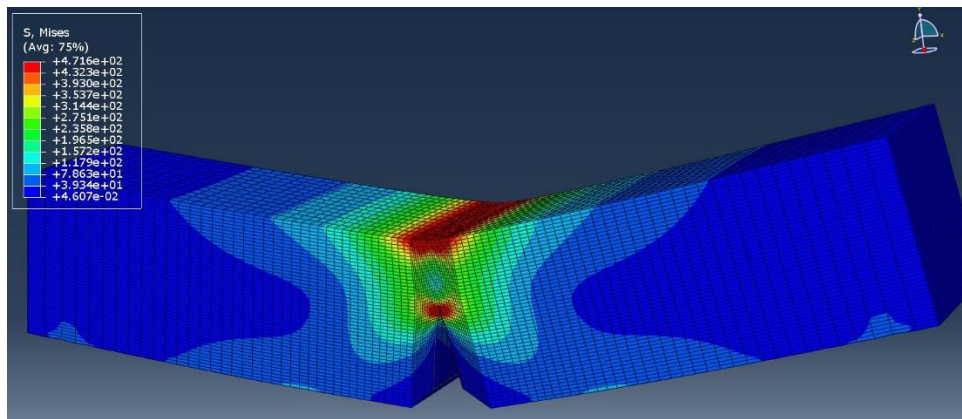
Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 22 OM (dole)





Slika 7.7 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 22 ZUT (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 22 ZUT (dole)

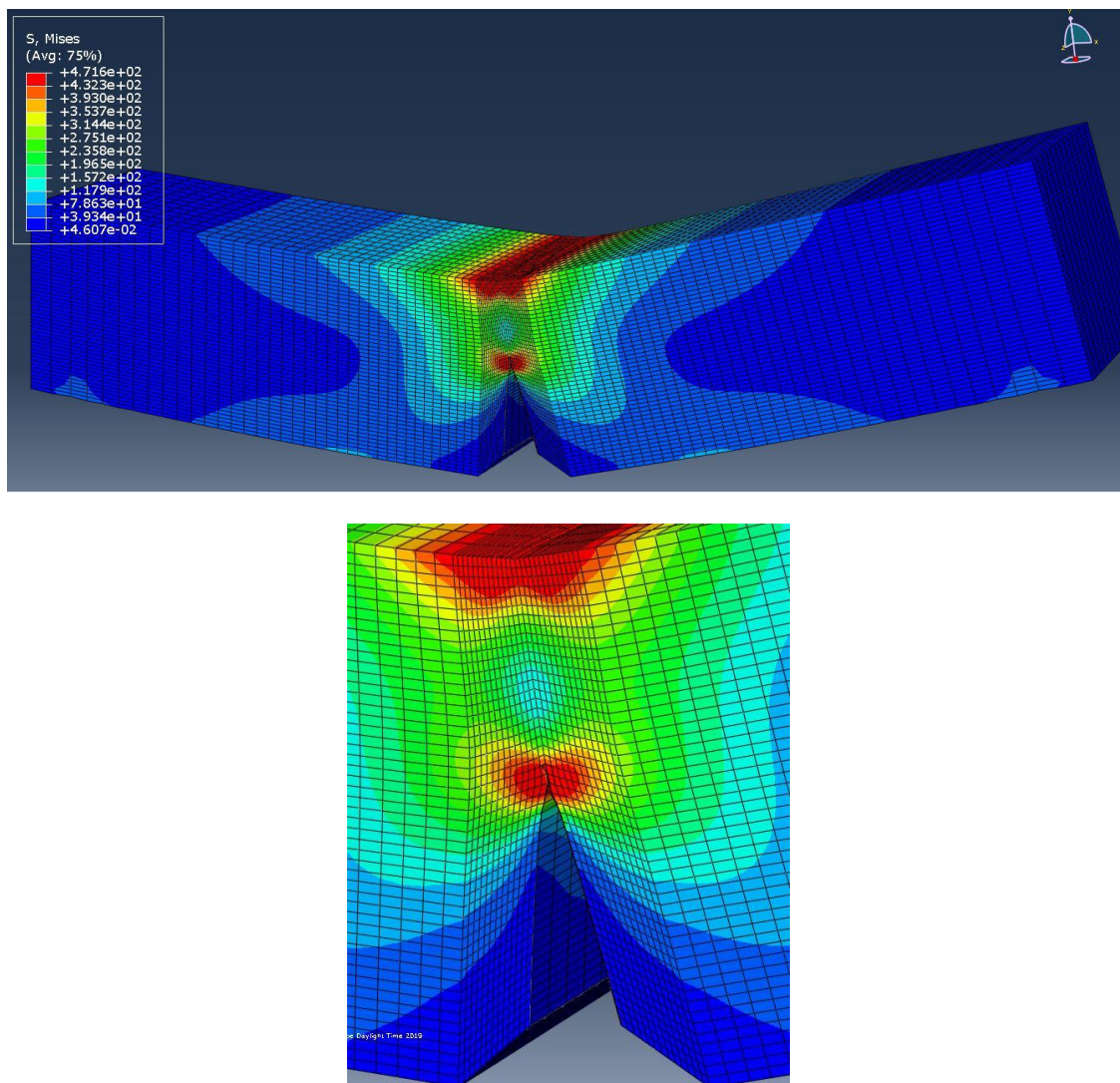


Slika 7.9 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 22 MŠ (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 22 MŠ (dole)

### 7.3.4 Epruveta 26

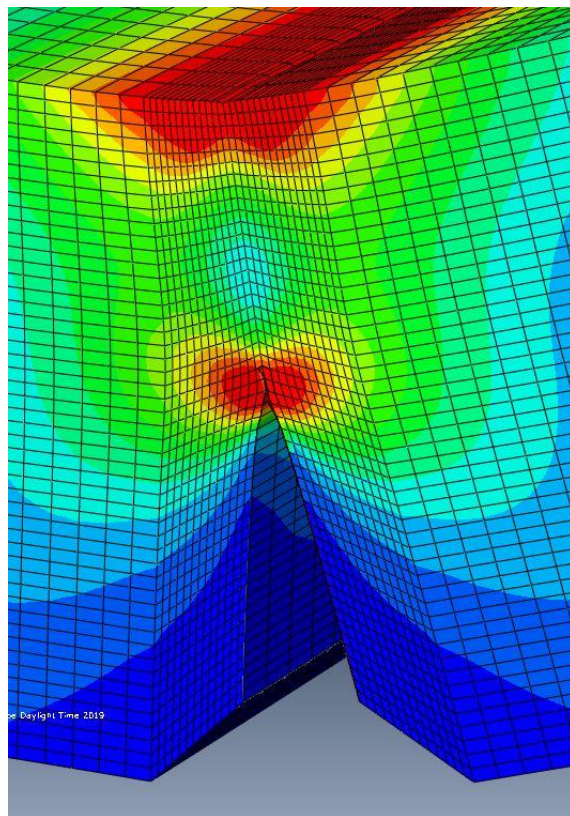
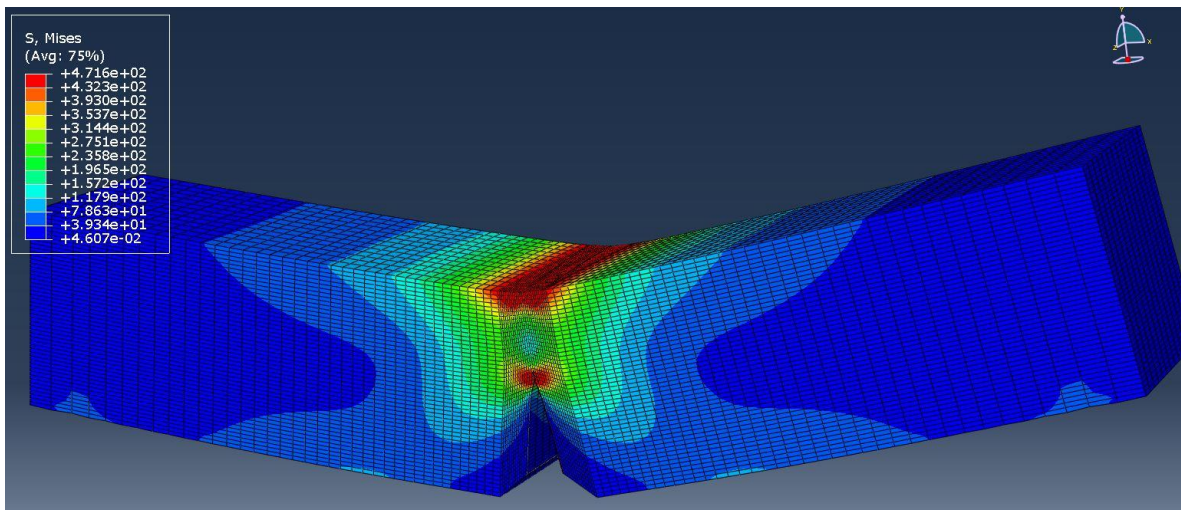
U slučaju epruvete 26 su urađena dva modela, za ZUT i drugi za OM. Dužina prsline na prelasku iz ZUT u OM je iznosila oko 2.2 mm, pri broju ciklusa od 882 600, dok je ukupan broj ciklusa iznosio 1 527 400, što predstavlja nešto veće vrednosti u odnosu na eksperimentalno dobijene brojeve ciklusa pri odgovarajućim dužinama prsline. Izgled modela nakon delovanja zamornog opterećenja je prikazan na slikama 7.10 i 7.11, sa raspodelom napona u okolini vrha prsline.



Slika 7.10 Raspodela napona u deformisanom modelu, epruveta 26 ZUT (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom napona u vrhu, epruveta 26 ZUT (dole)





Slika 7.11 Raspodela naponu u deformisanom modelu, epruveta 26 OM (gore)

Detaljniji izgled zamorne prsline, sa koncentracijom naponu u vrhu, epruveta 26 OM (dole)

### 7.3.6 Poređenje rezultata

U ovom delu poglavlja biće prikazano međusobno poređenje dobijenih rezultata, kao i njihovo poređenje sa eksperimentalnim vrednostima, uz osvrt na dobijene vrednosti faktora intenziteta napona za svaki pojedinačni model oblasti zavarenog spoja, za sve 4 epruvete koje su uzete u obzir za potrebe ove numeričke simulacije.

Kao što se može videti na osnovu numerički dobijenih vrednosti prethodno pominjanih parametara, faktor intenziteta napona se kretao od 989 do 1259 Mpa m<sup>1/2</sup>, pri čemu su najmanje vrednosti dobijene za epruvetu 26, model OM, dok su najveće vrednosti dobijene za epruvetu 22, u metalu šava. Sveukupno, kod modela koji su predstavljali metal šava je, očekivano, i uočen najbrži porast faktora intenziteta napona (najveći nagib na krivama), odnosno njihove najviše vrednosti, u poređenju sa ostalim oblastima. Analitički određene vrednosti faktora intenziteta napona za dužinu prsline od 5 mm su bile u rasponu oko 1137.5 Mpa m<sup>1/2</sup>. Numerički dobijeni rezultati su, dakle, bili za do 10% manji, ili veći, od vrednosti izračunate na osnovu opterećenja i dimenzija poprečnog preseka epruvete izloženog dejstvu momenta savijanja, što predstavlja dobro slaganje.

U pogledu broja ciklusa potrebnih za dostizanje određenih dužina prsline (kako prelaznih, tako i konačne od 5 mm), numeričke simulacije su pokazale tendenciju ka nešto nižim vrednostima kod obe varijante dužina, sa izuzetkom epruvete 26, gde su dobijeni nešto veći brojevi ciklusa u trenutku prelaza i na kraju rasta zamorne prsline. Razlike između eksperimentalnih i numeričkih rezultata su se kretale u rasponu od 6% (epruveta 5) do 12% (epruveta 1), i ovime je potvrđeno dobro slaganje između ove dve metode analiziranja rasta zamorne prsline u zavarenom spoju.



## **8. Diskusija i zaključci**

### **8.1 Pregled eksperimentalnih rezultata**

Kao što je najavljeno u poglavu 6, u ovom delu doktorske disertacije je dat detaljniji pregled rezultata svih eksperimenata koji su prethodno pominjani, i njihovo tumačenje. Pored upoređivanja rezultata svakog zasebnog eksperimenta za različite epruvete, takođe će biti uzet u obzir i uticaj mikrostrukture i njene heterogenosti, koja je karakteristična za zavarene spojeve. Uticaj temperature je od velikog značaja za proučavanje veze mikrostrukture i mehaničkih osobina, odnosno ponašanja zavarenog spoja pri različitim vrstama opterećenja, s obzirom da temperatura dovodi do promena u mikrostrukтури različitih oblasti zavarenog spoja (u zavisnosti od toga u kolikoj meri su ove oblasti izložene temperaturnih promenama), kao i zbog činjenica da uticaj temperature takođe može dovesti i do različitih dimenzija ovih oblasti, u slučaju epruvetu uzetih iz iste ploče.

Stoga će se ova diskusija u najvećoj meri koncentrisati na razlike u ponašanju onih epruveta koje su bile podeljene u 4 grupe (na više puta ponovljen način), što pre svega obuhvata ispitivanje žilavosti i zamora. Međutim, pre nego što se pređe na detaljniju analizu ovih rezultata, prvo je potrebno ponoviti i detaljnije analizirati rezultate merenja temperature tokom procesa zavarivanja, budući da je ovo eksperimentalno merenje prethodilo svim ostalima. Nakon toga, diskusija će obuhvatiti, u manjoj ili većoj meri, rezultate ispitivanja zatezanjem, savijanjem u tri tačke, merenje tvrdoće, kao i metalografiju i fraktografiju, pri čemu će u ovom delu biti značajno više teksta a manje lepih slika, u poređenju sa šestim poglavljem.

Treba napomenuti da fraktografska i metalografska ispitivanja neće imati svoja zasebna potpoglavlja, budući da će se njihovi rezultati konstantno provlačiti kroz diskusiju rezultata preostalih ispitivanja, i na taj način će i njihov uticaj biti analiziran.

### 8.1.1 Uticaj temperature i vremena hlađenja

Kao što je prethodno napomenuto, prvi od niza eksperimenata urađenih u okviru ovog istraživanja obuhvatao je merenje temperature tokom zavarivanja, sa ciljem da se da osnova za dalja razmatranja, budući da je uticaj temperature od velikog značaja u ovom slučaju. U tu svrhu je urađeno merenje temperature tokom svih 6 prolaza (sa prekidima u slučaju prva 4, i bez u slučaju poslednja 2), primenom kontaktnog termometra, nakon što su temperatura predgrevanja i međuprolazna temperatura određene postupkom prikazanim u poglavlju 6. Takođe su određena i vremena hlađenja  $t_{8/5}$ , odnosno njihovi dozvoljeni intervali za izabrani postupak i dimenzije ploča.

Vrednosti izmerenih temperatura su očekivano bile veće kod Uzorka 2, uzetog sa kraja ploče, pri čemu su ove vrednosti bile 1.7-2.5 puta veće, iako je uneta količina toplote u oba slučaja bila identična. Iz istog razloga su i izmerene vrednosti  $t_{8/5}$  bile primetno veće u drugom slučaju. Pomenuto je i da su ove razlike u temperaturi dovele do znatno šire zone uticaja toplote u slučaju Uzorka 2 (oko 50% razlike), što je kod kasnijih ispitivanja takođe dovelo do razlika u rezultatima. Ovo se može objasniti činjenicom da je nešto drugačija geometrija zone uticaja toplote (koja je, naravno, najviše zahvaćena temperaturnim promenama) za rezultat imala drugačiju putanju zamorne prsline, u smislu da je u slučaju epruveta 21-26 prsline morala da prođe kroz više zone uticaja toplote u odnosu na epruvete sa drugog kraja ploče (1-6).

S obzirom da razlike u dimenzijama ZUT nisu bile ravnomerne duž cele oblasti, potrebno je posmatrati svaku epruvetu zasebno, budući da je bilo slučajeva da je ZUT u epruvetama sa suprotnog kraja skoro istih dimenzija, u delu kroz koji je prsline prošla. Razlike se recimo jasno mogu videti u slučaju epruveta 5 i 22 (slika 6.69), gde se vidi da je kod epruvete 5 brže stigla do metala šava, i gde je dužina prsline od 5 mm postignuta mnogo brže nego u slučaju epruvete 22. Ubaciti deo za 1 i 26 kad budem znao zašto. Kod epruveta 4 i 23 (grupe 2 i 3, respektivno), su razlike u ZUT bile daleko manje izražene (i nije bilo slučaja da je vrh zareza bio malo izvan), i dobijeni su dosta sličniji rezultati, pri čemu je epruveta 23 izdržala nešto veći broj ciklusa, budući da je deo njene putanje kroz ZUT bio nešto veći (odnosno deo kroz MŠ je bio manji), što je bio povoljniji slučaj sa tačke gledišta otpornosti na rast zamorne prsline (ZUT se pokazao sveukupno otporniji od MŠ).

Što se tiče tvrdoće, utvrđeno je da su na pojedinim mernim mestima u ova uzorka njene vrednosti neznatno premašile dozvoljenu granicu od 350 HV (u slučaju niskolegiranih feritnih čelika), i da je temperatura imala više uticaj na raspodelu tvrdoće unutra ZUT, nego na same maksimalne vrednosti. Nešto veće vrednosti su izmerene u Uzorku 2, što se opet može objasniti višim temperaturama, usled kojih je došlo da nešto izraženijeg porasta zrna u ZUT, što dovodi do povećanja tvrdoće, ali i gubitka duktilnosti. Ovo se može videti i na slikama 6.12-6.19, gde se kod epruveta iz grupa 3 i 4 (koje dogovaraju lokaciji sa koje je uzet Uzorak 2) može uočiti izraženije prisustvo grubozrnih oblasti unutar ZUT-a. Iako se vremena hlađenja  $t_{8/5}$  bila ispod minimalne granice tokom određenih prolaza (pre svega korenog i popune I, kod oba Uzorka), nije primećen značajan porast tvrdoće u ovim delovima zavarenog spoja, u poređenju sa ostalim prolazima, na mernim mestima u ZUT. Sa druge strane, najveće vrednosti su izmerene blizu lica šava (što se može objasniti nedostatkom samootpuštanja u završnom prolazu), iako su u ovom slučaju vrednosti  $t_{8/5}$  upadale u predviđeni interval. Iz ovoga se može zaključiti da način na koji su određene ove vrednosti u startu nije uvek 100% merodavan, i da bi pri njihovom proračunu trebalo uzeti u obzir i faktore vezane za neravnomerni unos toplote tokom zavarivanja (a koji se obično usvaja kao konstantan).

### **8.1.2 Ispitivanje zatezanjem**

Cilj ovog ispitivanja je bio da se, u kombinaciji sa ispitivanjima izvršenim u okviru drugih radova na sličnu temu [72], kao i sa merenjem mikrotvrdoće, utvrdile mehaničke osobine materijala, pre svega osnovnog metala, u kome je i došlo do loma, pri sili od 21.2 kN. Pri tome je i granici tečenja odgovarala sila od oko 16.0 kN, odnosno napon tečenja je iznosio ~460 MPa, što je u skladu sa očekivanim vrednostima za ovaj čelik. Treba napomenuti da je u slučaju druge epruvete dobijen dijagram koji je u određenoj meri odstupao od očekivanog u smislu linearnog dela (do napona od oko 16.3 MPa), usled nešto izraženijeg šuma tokom ispitivanja epruvete označene kao Z3. Kako je do ovoga došlo? Uprkos ovome, granice tečenja su male približne vrednosti u oba slučaja, dok šum nije imao uticaja na nelinearni deo dijagrama sila-pomeranje, koji odgovara plastičnoj deformaciji epruvete i njenom lomu. S obzirom da je taj deo dijagrama bio od mnogo većeg značaja za

ovu analizu, odlučeno je da ova dva rezultata budu usvojena kao merodavni, a da se treća epruveta, Z2, “poštediti” ispitivanja zatezanjem. Ovoj epruveti je naknadno određena drugačija sudbina, i biće iskorišćena za potrebe ispitivanja koja će se u velikoj meri oslanjati na rezultate ove disertacije.

Iz rezultata dobijenih ovim ispitivanjima se može videti da je zavareni spoj dobro urađen, budući da je do loma došlo u osnovnom materijalu, a u slučaju čelika iz ove grupe se teži ka tome da zavareni spoj ima nešto bolje ili iste mehaničke osobine u odnosu na osnovni materijal. Drugim rečima, do konačnog loma epruvete došlo je na očekivanom mestu. Pri tome treba napomenuti da i sila pri kojoj je došlo do loma, a koja ujedno predstavlja zateznu čvrstoću epruvete, bila u očekivanom intervalu. Njena vrednost iznosila je 607 MPa, što i odgovara uobičajenoj zateznoj čvrstoći čelika P460NL1.

Drugi bitan faktor koji je potvrđen samim izgledom dijagrama sila-pomeranje, dobijenog na osnovu ovog ispitivanja je vezan za žilavost i duktilnost predmetnog čelika. Kao što je na samom početku napomenuto, glavni razlog za upotrebu ovog čelika (iako postoje srodni čelici više čvrstoće i granice tečenja) leži u velikoj rezervi plastičnosti, odnosno površini ispod nelinearnog dela krive prikazane na slikama 6.8 i 6.9. Iz ovih slika se jasno može videti da su epruvete od čelika P460NL1 ispitane u okviru ovog istraživanja pokazale izrazitu sposobnost plastične deformacije. Ovo je kasnije dodatno potvrđeno ispitivanjem žilavosti na Šarpijevom klatnu.

### **8.1.3 Merenje tvrdoće sa tačke gledišta mikrostrukture**

Rezultati merenja tvrdoće su prethodno povezani sa mikrostrukturama u pogledu uticaja temperature i vremena hlađenja na raspodelu vrednosti tvrdoće iznad dozvoljene granice, dok će u ovom delu diskusije biti razmatrane vrste mikrostrukture čije je prisustvo utvrđeno metalografskim ispitivanjem, i njihova veza sa izmerenim vrednostima tvrdoće, s tim što će u ovom slučaju u obzir biti uzete i vrednosti izmerene u osnovnom materijalu i metalu šava.

Metalografskim ispitivanjima su detaljno uvrđene mikrostrukture osnovnog materijala, metala šava i zone uticaja toplote, pri čemu su oblastima u kojima je izmerena manja tvrdoća (OM i MŠ odgovarale feritno-perlitna i livena, dendritna struktura,

respektivno, što se jasno može videti na brojnim slikama prikazanim u okviru poglavlja šest. Čelici koji inače pripadaju ovoj grupi materijala su najčešće karakterisani upravo ovakvom kombinacijom mikrostruktura u osnovnom materijalu, usled niskog sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata, usled čega se kao dominantna mikrostruktura javlja ferit, sa delimičnim prisustvom perlita. Ovakvu mikrostrukturu karakterišu upravo osobine koje poseduje i predmetni čelik, odnosno povišena čvrstoća (uz prosečnu tvrdoću), kao i dobra žilavost, obezbeđena prisustvom mikrolegirajućih elemenata poput Nb i Ti, čija je glavna uloga smanjenje veličine zrna. Rezultati merenja tvrdoće u OM (prikazani u radu [72]) su značajno manje varirali u odnosu na ZUT, što znači da je struktura OM bila mahom veoma homogena, što se na slikama iz poglavlja šest i može videti, odnosno da je OM bio zadovoljavajućeg kvaliteta, bez primetnih grešaka.

U slučaju zone uticaja toplote, oblastima izraženo veće tvrdoće odgovaraju oblasti u kojima je uočena mikrostruktura koja se sastojala u najvećoj meri od gornjeg beinita (i povremeno Widmannstätten-ovog ferita), dok su vrednosti koje su se nalazile ispod zahtevan granice odgovarale oblastima u kojima je preovladao donji beinit (sitnozrni ZUT). Donji beinit je u ovom slučaju naravno bio najpovoljnija struktura, usled nešto povećanih granica tečenja i zatezne čvrstoće (što je određivanje ovih osobina na osnovu mikrotvrdoće koje je objašnjeno u prethodnom poglavlju potvrdilo), i žilavosti koja je smanjena u prihvatljivoj meri. Sa druge strane, gornji beinit je već doveo do primetnije degradacije u zoni uticaja toplote, što je imalo uticaja u slučajevima gde je zamorna prslina prolazila i kroz ovaj, lošiji deo ZUT. Primera radi, kod prethodno pominjanih epruveta 4 i 23, naglašeno je da je epruveta 23 pokazala veću otpornost prema rastu prsline, usled činjenice da je zamornom prslini trebalo više vremena i duži put da pređe u slabiju oblast (MŠ u oba slučaja). Međutim, u ovom slučaju je prslina dobrim delom putanje prolazila kroz grubozrni (gornjebeinitni) deo ZUT, što je u određenoj meri smanjilo njenu otpornost na rast prsline i značajno snizilo ukupan broj ciklusa. Sa druge strane, u slučaju epruvete 23 (kao što se može videti na slici 6.18), zarez je opet bio u osnovnom materijalu, pa je zamorna prslina opet morala da napreduje kroz određen deo osnovnog materijala. Usled izražene otpornosti na rast zamorne prsline, OM je u određenoj meri „poništió“ brži rast prsline kroz grubozrni ZUT, i time ipak omogućio veći broj ciklusa potreban za dostizanje dužine prsline od 5 mm, u odnosu na

epruvetu 4. Ovo je naročito izraženo na a-N dijagramima, gde se može videti da početni deo stabilnog segmenta krive za epruvetu 23 ima značajno manji nagib (zbog OM), ali da u kasnijoj fazi mnogo brže raste.

Sušтина ovog potpoglavlja nije bila da se istaknu neke očigledne činjenice (npr. da je OM najotporniji na rast prsline, a MŠ najslabiji u tom pogledu), već da se skretanjem pažnje na ovaj i slične zaključke potvrdi da su zavareni spoj, kao i upotrebljeni materijali, proizvedeni bez primetnih grešaka i u skladu sa očekivanjima. To dalje sugerise da su rezultati ispitivanja dobijeni od epruveta veoma dobrog kvaliteta, odnosno da su ti rezultati merodavni sa stanovišta kriterijuma definisanih odgovarajućim standardima. Dakle, može se zaključiti da je suština poređenja mikrostruktura i mehaničkih osobina različitih oblasti zavarenog spoja, kao i analiza njihovih međusobnih odnosu u nekom smislu i verifikacija celokupnog eksperimentalnog ispitivanja u okviru ove disertacije.

#### **8.1.4 O žilavosti i grupama epruveta**

Ovaj deo diskusije se direktno nadovezuje na priču o ispitivanju žilavosti svih oblasti zavarnog spoja, odnosno Charpy-jevih epruveta uzetih iz OM, MŠ i ZUT (sa posebnim fokusom na poslednje), i njihove energije udara, u smislu odnosa komponenata. Sve ove vrednosti su date u tabeli 6.6, a ovde ćemo se podsetiti prosečnih vrednosti za različite materijale:

za OM je ukupna energija iznosila 198.7 J, sa odnosom  $A_p$  prema  $A_i$  od 2.60

za MŠ je ukupna energija u proseku bila 138 J, sa odnosom  $A_p$  prema  $A_i$  od 1.98

za ZUT su vrednosti varirale od 144 (epruveta 8) do 198 (epruveta 9), pri čemu su prosečne vrednosti bile sledeće – prva grupa – 177 J; druga grupa – 174.7 J; treća grupa – 182.3 J; četvrta grupa – 171 J (bez epruvete 21, iz znanih razloga), sa odnosom  $A_p$  prema  $A_i$  od 1.55-2.83.

Ove vrednosti su potvrdile sve što je dosad rečeno na račun žilavosti zasebnih oblasti ispitanog zavarnog spoja, odnosno o njihovoj otpornosti na rast prsline, koja je potvrđena u kombinaciji sa zamornim ispitivanjem. Može se videti da prosčeni odnosi komponenti ukupne udarne energije,  $A_p$  i  $A_i$  kod epruveta iz ZUT značajno variraju, čak i u pogledu prosečnih vrednosti, pri čemu su prosečne vrednosti ovih odnosa uzete za grupe 2 i 3

(minimalni deo intervala od 1.55), odnosno grupe 1 i 4 (maksimalni deo intervala, prosek od 2.83), uzimajući u obzir značajne razlike među njima. Ove razlike, kao što je već napomenuto su posledica različitog položaja zareza u zoni uticaja toplote.

Temperatura nije igrala presudnu ulogu u ovom slučaju, mada je pokazala povoljan uticaj na odnos komponenata, naravno u korist energije rasta prsline, kao dominantne komponente. Ovaj uticaj ipak nije izražen u istoj meri kao uticaj zareza, i epruvete iz grupa sa različitom temperaturom (1,2 sa jedne, odnosno 3,4 sa druge strane), sa povećanjem od oko 10% u proseku. Što se uticaja temperature na prosečne vrednosti ukupne energije udara tiče, ona je bila zanemarljiva, iako su i najbolja i najslabija grupa u tom smislu bile upravo grupe sa većom temperaturom. Ipak, u proseku su vrednosti ovih energija bile veoma bliske (175.85 za niže temperature, odnosno 176.65 za oblast više temperature). Razlika koja se mogla uočiti jasno je bila u homogenosti, odnosno raspodeli pojedinačnih rezultata. Epruvete iz grupa 3 i 4 su pokazale daleko manje rasipanje, u poređenju sa grupama 1 i 2 (naročito grupom jedan, koje je dala i najbolju i najslabiju epruvetu, 8 i 9, respektivno).

Moguće objašnjenje ovakvog uticaja temperature na žilavost ispitanih epruveta leži u prethodno razmatranim vremenima hlađenja – deo ploče sa višim temperaturama, iz kojeg su uzete epruvete koje su dale homogenije rezultate (i nešto veće prosečne vrednosti), je takođe deo kod kojeg su vremena hlađenja bila približnija zahtevanim vrednostima, odnosno više puta pominjani Uzorak 2 (i u većini slučajeva se uklapala u definisani interval). S obzirom da preporučeno vreme hlađenja ima uticaja na mikrostrukture, iako ne u onolikoj meri koliko je pretpostavljano, i da je taj uticaj u našem slučaju povoljan, logično je da su i rezultati ispitivanja žilavosti nešto bolji, pre svega u pogledu odnosa energije rasta i energije nastanka prsline. Ovo se ogleda u činjenici da je energija nastanka nešto niža, ali da je i energija rasta nešto viša, što ukazuje na smanjenu čvrstoću, ali i povećanju žilavost ispitivanih uzoraka, što je upravo i poenta vremena hlađenja – poboljšanje mikrostrukture u pogledu prethodno pominjanih osobina, na „štetu“ čvrstoće i tvrdoće.

### **8.1.5 Zamor**

Najvažniji deo celokupnog istraživanja se odnosio na ponašanje zavarenih od predmetnog čelika pri dejstvu dinamičkog, odnosno zamornog opterećenja. Cilj je bio da se

uspostavi veza između rezultata ispitivanjem savijanjem u tri tačke, koja su obuhvatala praćenje rasta zamorne prsline u epruvetama sa zarezom u zoni uticaja toplote, i mikrostrukture. Na ovaj način je objašnjena i indirektna veza između zamora i temperature, s obzirom na prethodnu analizu njenog uticaja na tvrdoću, žilavost i geometriju zavarenog spoja i njegovih sastavnih delova. Pre nego što se pristupi detaljnoj analizi dobijenih rezultata, valja se podsetiti sledećih činjenica:

Ispitano je ukupno 8 od 12 epruveta, iz 4 grupe, definisane na isti način kao i u slučaju ispitivanja žilavosti. Na kraju je odlučeno da nema potrebe da se ispituju i preostale 4 epruvete, koje su sačuvane za potrebe narednih istraživanja

Epruvete 1,6,21 i 26 su ispitane pod režimom 7, sa konstantnim  $\Delta K$ , i konstantnim odnosom napona R (koji je iznosio 0.1), dok su epruvete 4,5,22 i 23 ispitane pod režimom 5, koji radi sa promenljivim, tj.rastućim  $\Delta K$ , što treba uzeti u obzir pri međusobnom poređenju, s obzirom da je promena režima sa 7 na 5 ubrzala proces rasta zamorne prsline.

Svi eksperimenti su trajali do trenutka kada prsline dostigne dužinu od 5 mm, sa izuzetkom epruvete 21, čije je savijanje u tri tačke prekinuto nakon što je došlo do prestanka rasta prsline. Naknadnim lomljenjem na Charpy-jevom klatnu je utvrđena veoma nepravilna prelomna površina, i ova epruveta je odstranjena iz daljeg analiziranja. Razlozi njenog neobičnog ponašanja bi svakako mogli da posluže kao tema za razmatranje u nekom budućem radu. Što se ove epruvete tiče, zanimljivo je primetiti da je ona uzeta sa slične lokacije kao i epruveta 20, upotrebljena za ispitivanje žilavosti, koja je takođe dala značajno drugačije rezultate od ostalih epruveta, kako iz svoje, tako i iz drugih grupa, što nagoveštava prisustvo neke greške u tom delu zavarenog spoja. U tabeli 8.1 ispod je prikazan broj ciklusa koji je bio potreban za dostizanje dužine od 5 mm, kao i režim ispitivanja za svaku epruvetu.

**Tabela 8.1** Broj ciklusa za 8 ispitanih epruveta

Epruveta	Grupa	Broj ciklusa do dužine prsline 5 mm	Režim ispitivanja
1	1	1,107,800	7
4	2	449,957	5
5	2	288,124	5
6	2	617,410	7
21	3	928,719*	7
22	3	2,033,838	5
23	3	503,485	5



26	4	1,422,282	7
----	---	-----------	---

\*Broj ciklusa u trenutku prekida eksperimenta.

Kao i u slučaju koeficijenata Paris-ove jednačine,  $C$  i  $m$ , uočavaju se značajne razlike u dobijenim vrednostima, pri čemu je epruveta 5 najbrže dostigla dužinu od 5 mm (manje od 300,000 ciklusa), dok je epruveta 22 za istu dužinu bilo potrebno preko 2 miliona. Treba naglasiti da je u slučaju te epruvete vrh zarez ležao u OM, a ne u ZUT. Među epruvetama kod kojih se zarez nalazio gde je predviđeno, najbolje se pokazala epruveta 26, koja je izdržala preko milion i četrsto hiljada ciklusa do dostizanja predviđene dužine.

Naravno, i prethodno pomenuti Paris-ovi koeficijenti su značajno varirali, kao posledica veoma različitih oblika kriva a-N koji su dobijeni ovim ispitivanjima. I u nekim od prethodnih primera se vidi kako u slučaju zarez u osnovnom materijalu, kriva ima veoma blag nagib (skoro paralelan  $x$ -osi), usled prethodno hvaljenih osobina čelika P460NL1. Kod ostalih epruveta, prelazi između različitih oblasti zavarenog spoja nisu toliko izraženi, ali su i dalje uočljivi. Poređenjem oblika a-N krivi sa prelomnim površinama je utvrđeno da prelazi zamorne prsline iz jedne oblasti u drugu zaista odgovaraju promenu nagiba stabilnog dela krive  $da/dN-\Delta K$ . Ovime je verifikovana i logika određivanja vrednosti koeficijenata Paris-ove jednačine za svaku pojedinačnu oblast. Kao što je prikazano u poglavlju 6, ove vrednosti su značajno varirale, što i ne iznenađuje kada se uzmu u obzir brojni faktori koji su uticali na sam rast zamorne prsline, odnosno na broj ciklusa. Pored osnovnih kriterijuma, položaja zarez u zoni uticaja toplote (ili van nje, u slučaju epruveta 22 i 23) i temperature izmerene tokom zavarivanja, utvrđeno je da i oblasti u okviru zone uticaja toplote (grubo-zrni i sitnozrni ZUT, sa mikrostrukturama od gornjeg i donjeg beinita, respektivno) imaju uticaj na rast zamorne prsline. Uz sve to, ne treba zanemariti ni izbor režima rada, koji je takođe u određenoj meri zaslužan za raznolikost dobijenih rezultata, i određene komplikacije pri poređenju zamornog ponašanja epruveta iz različitih grupa. Treba naglasiti da ovakav pristup, sa dva različita režima ispitivanja nije predstavljao pokušaj da se eksperiment učini još raznovrsnijim, odnosno da se u obzir uzme dodatni faktor, već je isključivo posledica činjenice da je autor disertacije platio danak neiskustvu u ranoj fazi ispitivanja.

Vrednosti ovih koeficijenata, dobijene u uslovima opisanim u prethodnom delu ovog, kao i završnom delu šestog poglavlja, u značajnoj meri odstupaju od rezultata sa kojima su

poređene u okviru rada [96]. Ovo poređenje je izvršeno upravo kako bi ilustrovalo razlike između uobičajenih pristupa eksperimentalnom određivanju Paris-ovih koeficijenata (na kojem se stalno i uporno insistira, iz razloga koji su očigledni kad se pogledaju rezultati ovde prikazanog eksperimenta). Pokazalo se da pristup na kome je zasnovana ova disertacija, a koji uključuje i brojne detalje koji nisu razmatrani prethodno (a i ako jesu, nisu svi uzeti u obzir istovremeno), daje pouzdane i precizne rezultate, na osnovu kojih se ponašanje zavarenih spojeva pri rastu zamorne prsline može opisati još detaljnije. Pri tome treba napomenuti da se radi o materijalu koji prethodno nije ispitivan na ovakav način, usled činjenice da materijali iz ove grupe inače ne nalaze primenu u eksploataciji koja uključuje zamor, odnosno dinamičko opterećenje. Sa druge strane, posude pod pritiskom od čelika P460NL1 takođe se koriste i u transportu, što ih izlaže upravo dinamičkom opterećenju.

## **8.2 Analiza rezultata numeričkih simulacija**

U ovom delu poglavlja Diskusija i Zaključci, biće data detaljna analiza rezultata dobijenih numeričkom simulacijom ponašanja epruveta tokom savijanja u tri tačke. Biće razmatrani rezultati za epruvete 1,5,22 i 26, kao što je i najavljeno u prethodnom poglavlju, uz sve usvojene aproksimacije i definisane parametre.

U poglavlju sedam je dat pregled dobijenih rezultata, pre svega broja ciklusa i faktora intenziteta napona, uz osvrt na raspodelu napona u modelima. Izvršeno je i poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima eksperimentalnog dela istraživanja, koji su dobijeni ispitivanjem savijanjem u tri tačke. U oba slučaja, posmatran je broj ciklusa potreban da se dostigne dužina zamorne prsline od 5 mm, pri čemu je u obzir uzet i broj ciklusa na prelascima prsline iz jedne oblasti zavarenog spoja u drugu, u zavisnosti od ispitivane epruvete. Poređenjem vrednosti dobijenih numeričkom simulacijom sa vrednostima zabeleženim na RUMUL-ovom Fraktomatu, odnosno dijagramima a-N koji su iz njih proistekli je zaključeno da je postignuto dovoljno dobro slaganje, sa razlikama koje su u proseku iznosile oko 10%. Ove razlike su utvrđene kako za brojeve ciklusa, tako i za vrednosti FIN. Treba napomenuti da su sve numeričke simulacije rađene iterativno, kako bi

se postigla zadovoljavajuća konvergencija rezultata, pre njihovog poređenja sa eksperimentom.

Kao i rezultati dobijeni eksperimentalim pristupom, rezultati ovih simulacija su pokazali primetne razlike pri međusobnom poređenju, kako za epruvete iz različitih grupa, tako i za modele različitih oblasti unutar iste epruvete. Ovo je posledica zadavanja ulaznih parametara, pre svega vrednosti koeficijenata Paris-ove jednačine, pri svakom proračunu, ali takođe i posledica različitih mehaničkih osobina koje su određene za slučaj nekih oblasti zavarenog spoja. Ove razlike su se javljale u slučaju zone uticaja toplote kod sve 4 epruvete, budući da je zamorna prslina proazilakroz različite delove ZUT u zavisnosti od početnog položaja. Kod svake epruvete su mehaničke osobine određene na osnovu tvrdoća izmerenih na delu ZUT kroz koji je prslina prošla, a među njima je već u startu bilo razlika (mada one nisu bile preterano izražene, pošto su u proseku vrednosti bile veoma slične, za različite delove ZUT).

Najbolje slaganje su pokazale epruvete 1 i 26, dok su razlike u eksperimentalnim i numeričkim rezultatima kod epruveta 5 i 22 bile nešto izraženije. Interesantno je primetiti da su boji rezultati dobijeni u slučaju epruveta iz grupa sa zarezom u korenu šava, kod kojih je zamorna prslina prešla iz ZUT u OM. Ove razlike u preciznosti su ipak zanemarljive, na osnovu čega je utvrđeno da položaj zareza, odnosno promene u geometriji izazvane povišenim temperaturama ne utiču na konvergenciju i tačnost rezultata u značajnijoj (ili bilo kakvoj meri). Potrebno je naglasiti da se pojam „promena u geometriji“ ovde odnosi na debljinu ZUT kod različitih epruveta – u nekim slučajevima je veća debljina ove zone kao posledicu imala duži put zamorne prsline kroz nju, odnosno veću dužinu od vrha zareza do prelaksa u sledeću oblast. Ovo je uticalo na broj ciklusa na sličan način kao i u eksperimentu, kod epruveta 1 i 26, gde je razlika izražena. U slučaju epruveta 5 i 22, ovo poređenje ne bi imalo smisla, usled položaja vrha zareza u OM u slučaju ove druge. Interesantno je primetiti da je u slučaju epruveta 1 i 26 veći broj ciklusa dobijen u slučaju gde je zamorna prsline više vremena provela u ZUT-u uprkos činjenici da je osnovno materijal otporniji na njen rast. Ovo bi se moglo pripisati prisustvu povoljnijih mikrostruktura u ovom delu zavarene ploče, usled bolje usklađenog vremena hlađenja.

Dobijeni rezultati, u slučaju svih 9 modela (odnosno 4 epruvete) su potvrdili validnost numeričkog pristupa analizi ponašanja zavarenog spoja sa zamornom prslinom u zoni uticaja toplote, mada treba imati u vidu i brojne aproksimacije koje su usvojene, usled načina na koji je zadato opterećenje pri eksperimentu, a koji nije bilo moguće na isti način definisati i kod numeričkih modela. Stoga, ove rezultate uzeti u obzir sa određenom rezervom, i nastaviti u pravcu razvoja i stvaranja modela koji će još bolje i efikasnije predstavljati pravi eksperiment.

### **8.3 Zaključci**

U okviru izrade ove doktorske disertacije je prikazana eksperimentalna i numerička analiza rasta zamorne prsline u zavarenom spoju od sitnozrnog mikrolegiranog niskougljeničnog čelika povišene čvrstoće, za posude pod pritiskom, P460NL1. Za potrebe ovog istraživanja je prvo zavarena ploča dimenzija 500x500x14 mm, primenom MAG postupka, nakon čega se pristupilo eksperimentalnoj fazi tokom koje su urađena brojna ispitivanja, uključujući merenje temperature, žilavosti, savijanje u tri tačke, zatezanje, fraktografiju i metalografiju.

Cilj ovih ispitivanja je bio da se povežu mikrostrukture različitih oblasti zavarenog spoja sa njihovim mehaničkim osobinama i ponašanjem pri statičkom, a pre sve pri dinamičkom ispitivanju. Ovakav detaljan pristup analiziranju ponašanja pri zamoru je rezultirao u velikom broju interesantnih rezultata, koji su potvrdili da uticaj mikrostrukture, koji je pre svega posledica promena koje se dešavaju u zavarenom spoju tokom samog postupka zavarivanja ima veliki značaj na samo ponašanje zavarenih spojeva. Treba napomenuti da je glavni faktor u ovom slučaju predstavljala temperatura, izmerena tokom zavarivanja. Zatim je posmatran uticaj ovih temperatura (merenih na suprotnim krajevima ploče, odnosno blizu početka i kraja zavarenog spoja) na rezultate ostalih ispitivanja. Zaključeno je da je temperatura imala uticaja na geometriju (dimenzije) zone uticaja toplote, i samim tim na putanju rasta zamorne prsline. Različite dimenzije zone uticaja toplote su dakle direktno uticale na broj ciklusa potreban da prslina dostigne dužinu od 5 mm, u slučaju određenog broja ispitanih epruveta.

Vreme hlađenja  $t_{8/5}$  je, sa druge strane, imalo određen uticaj na rezultate žilavosti, pošto je utvrđeno da su epruvete iz dela gde se vreme hlađenja uklapalo u izračunat interval vrednosti pokazale nešto bolje ponašanje u smislu ukupne energije, kao i međusobnog odnosa njihovih komponenti.

Što se samog zamora tiče, eksperiment je potvrdio potrebu za detaljnim određivanjem vrednosti Paris-ovih koeficijenata  $C$  i  $m$ , s obzirom na primetne razlike u njihovim vrednostima koje su uočene nakon poređenja različitih epruveta. Upravo iz tog razloga su epruvete podeljene u 4 grupe, i određen broj iz svake od ovih grupa je ispitan.

Doprinos i inovativnost ovog istraživanja, i samim tim doktorske disertacije, se upravo ogleda u ovako detaljnom postupku određivanja koeficijenata Paris-ove jednačine, kao i činjenice da ovakva ispitivanja nisu rađena, ni u manjem obimu, za ovaj konkretni čelik. Pri tome treba još jednom naglasiti da je čelik P460NL1 pokazao izuzetnu otpornost na rast zamorne prsline, kao i žilavost. Time je potvrđeno i da je zavaren spoj urađen dobro, i da su upotrebljeni materijali odgovarajućeg kvaliteta. Uvid u rast zamorne prsline koji je stečen nakon ovih ispitivanja može predstavljati kvalitetnu osnovu za dalja istraživanja, i da se iskoristi kako bi se preciznije procenio vek konstrukcije sa zavarenim spojevima od ovog materijala, imajući u vidu očekivanu putanju prsline, pre svega u smislu toga u kojoj oblasti zavarenog spoja se ona inicira.

Drugi deo disertacije je posvećen numeričkoj analizi, urađenoj primenom proširene metode konačnih elemenata (PMKE), u softverskom paketu ANSYS. Ova analiza je bila zasnovana na eksperimentalno dobijenim rezultatima, pre svega vezanim za mehaničke osobine materijala (granica tečenja, zatezna čvrstoća) i Paris-ovim koeficijentima, određenim iz  $a$ - $N$  dijagrama za odgovarajuće epruvete. Takođe je uzet u obzir i broj ciklusa potreban za dostizanje kako granične dužine prsline od 5 mm, tako i za prelazak ove prsline iz jedne oblasti zavarenog spoja u drugu.

Pri proračunu su definisani granični uslovi, opterećenja i mreža konačnih elemenata, u skladu sa prethodnim iskustvom i uz odgovarajuće, neophodne aproksimacije. Određivanje mehaničkih osobina je urađeno na osnovu ispitivanja zatezanjem, ali i merenja mikrotvrdoće (za zonu uticaja toplote), uzimajući u obzir deo ZUT kroz koji je prslina prolazila pri rastu, za svaku epruvetu, kao što je detaljnije opisano u prethodnom delu ovog poglavlja.

Numeričke simulacije su urađene za ukupno 4 epruvete, po jednu iz svake grupe, i napravljeno je ukupno 9 modela, pri čemu ovaj broj odgovara broju različitih mikrotstrukture koje su utvrđene metalografskim ispitivanjem. Rezultati su pokazali dobro slaganje sa eksperimentalno dobijenim brojem ciklusa za sve epruvete, pri čemu su u nekim slučajevima ove vrednosti bile približnije u odnosu na druge. Ovim je verifikovan i numerički pristup rešavanju problema vezanih za rast zamorne prsline u zoni uticaja toplote u zavarenom spoju od čelika P460NL1. Naravno, dalje istraživanje će ići u smeru optimizovanja numeričkih modela, sa ciljem da se sve oblasti zavarenog spoja, sa svojim razlikama u pogledu vrednosti koeficijenata Paris-ove jednačine  $C$  i  $m$ , objedine u jedan model, čime bi se proračun učinio nešto jednostavnijim i daleko bržim. Brz i impresivan razvoj metoda vezanih za softvere koji koriste PMKE će u budućnosti svakako biti značajan faktor za postizanje ovog cilja.

## 9. Reference

- [1] A. Sedmak, S. Sedmak, Lj. Milović: Pressure equipment integrity assessment by elastic-plastic fracture mechanics methods, Society for Structural Integrity and Life, 2011.
- [2] I. Hajro, O Pašić, Z. Burzić: Investigation of elastic-plastic fracture mechanics parameters of quenched and tempered high-strength steel welds, Structural Integrity and Life, Vol 10, No. 3, 2010, pp. 225-230.
- [3] B. Kuhn, M. Lukić, A. Nussbaumer, H.P. Gunther, R. Helmerich, S. Herion, M.H. Kolstein, S. Walbridge, B. Androic, O. Dijkstra, O. Bucak: Assessment of existing steel structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, JRC Scientific and Technical Reports, 2008.
- [4] R. Jovičić, S.A. Sedmak, U. Tatić, U. Lukić, W. Musraty, Stress state around imperfections in welded joints, Structural Integrity and Life, Vol 15, No. 1, 2015.
- [5] S.A. Sedmak, R. Jovičić, A. Sedmak, M. Arandžević, B. Đorđević, Influence of Multiple Defects in Welded Joints Subjected to Fatigue Loading According to SIST EN ISO 5817:2014, Structural Integrity and Life, Vol. 18, No. 1, 2018, p. 77-81.
- [6] H.E. Boyer, Atlas of Fatigue Curves, ASM International, 1986.
- [7] Aleksandar Grbović: Istraživanje zamornog veka nosećih strukturalnih elemenata izrađenih od superlegura, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu, 2012.
- [8] Algoul, M. ; Sedmak, A. ; Petrovski, B. ; Tatić, U. ; Sedmak, S. ; Đurđević, A.: Quality Assurance of a Large Welded Penstock Manufacturing by Means of Full-scale Model Testing, 2nd International Conference Manufacturing Engineering & Management 2012, 107-108, ISBN 978-80-553-1216-3.
- [9] E. Džindo, S.A. Sedmak, A. Grbović, N. Milovanović, B. Đorđević: XFEM simulation of fatigue crack growth in a welded joint of a pressure vessel with a reinforcement ring, Archive of Applied Mechanics, Vol. 89, No. 5, pp. 919-926.

- [10] Z. Han, H. Luo, Y. Zhang, J. Cao: Effects of micro-structure on fatigue crack propagation and acoustic emission behaviors in a micro-alloyed steel, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 559, 2013, pp. 534-542
- [11] Aleksandar Čabrilo: Mehaničke osobine i brzina rasta zamorne prsline u zavarenom spoju pancirnog čelika, doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2018.
- [12] R. Jovičić, N. Pantelić, S.A. Sedmak, D. Pavlović, Ž. Štrbački, O. Popović, R. Prokić-Cvetković: Zavarivanje debelozidnog čelika u uskom žljebu, *Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije*, Vol. 63, No. 3, 2018, pp. 119-129.
- [13] Radomir Jovičić: Analiza uticaja prsline na integritet feritno - austenitnih zavarenih spojeva, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2007.
- [14] Bashir Younise: Micromechanical fracture analysis of high strength steel weldments, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2013.
- [15] T.L. Panontin, S.D. Sheppard, *Fatigue and Fracture Mechanics*, 29th Volume, ASTM, 1999.
- [16] C. Mei, R.R. Chen: Finite element non-linear random response of composite panels of arbitrary shape to acoustic and thermal loads, Wright Laboratory, 1997.
- [17] C.E. Inglis: Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, *Spring meetings of the Fifty-fourth session of the Institution of Naval Architecture*, 1913.
- [18] A.A. Griffith: *The phenomena of Rupture and Flow in Solids*, 1920.
- [19] H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin: *The stress analysis of cracks handbook*, ASME Press, 2000.
- [20] M.A. Sutton, X. Deng, F. Ma, J.C. Newman Jr., M. James: Development and application of a crack tip opening displacement-based mixed mode fracture criterion, *Int. Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, 2000, pp. 3591-3618.
- [21] James R. Rice: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.



- [22] A. Sedmak, Z. Burzić, J. Kurai, B. Aleksić, A. Bređan: Destructive testing for diagnosis, repairment and integrity assessment of platforming reactor, *Structural Integrity and Life*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-34.
- [23] Lj. Milović, V. Milošević-Mitić, Z. Radaković, N. Anđelić, B. Petrovski: Assessment of pressure vessel load capacity in the presence of cracks, *Structural Integrity and Life*, Vol. 13, No. 1, pp. 9-16.
- [24] Tamara Golubović, *Integracija ljudskih i organizacionih faktora u model procene rizika i integriteta opreme pod pritiskom*, doktorska teza, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2018.
- [25] Taško Maneski: *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura*, Mašinski Fakultet, 1998.
- [26] D. Chambers: *Digital Image Correlation: Advanced Methods and Applications*, Nova Science Publishers, 2017.
- [27] G.C. Sih: *Handbook of Stress-intensity Factors*, Lehigh University, Institute of Fracture and Solid Mechanics, 1973.
- [28] Š. Dunjica: *Otpornost materijala (uvodu mehaniku deformabilnog tela)*, Građevinski Fakultet, 1995.
- [29] Sanjin Krščanski: *Analiza uvjeta nastanka pukotina i model procjene vijeka trajanja konstrukcija*, doktorska disertacija, Rijeka, 2013.
- [30] C.T. Sun, Z. Jin: *Fracture Mechanics*, Academic Press, 2011.
- [31] ASTM E1820-13 – Standard test method for measurement of fracture toughness
- [32] G.R. Irwin: Relation of stresses near a crack to the crack extension force, 9th Cong. App. Mech., Brussels, 1957.
- [33] K-H. Schwalbe, J.D. Landes, J. Heerens: *Classical Fracture Mechanics Methods*, Elsevier, 2007.
- [34] J. Landes, D. McCabe, "Load History Effects on the JR-Curve," in *Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, Volume II Fracture Resistance Curves and Engineering Applications*, 1983, pp. 723-738.

- [35] Narayana, K.B.; Dattaguru B.; Ramamurthy, T.S.; Vijayakumar, K.: „Modified Crack Closure Integral Using Six-noded Isoparametric Quadrilateral Singular Elements”, Eng. Fract. Mech., 6, 36, 945-955, 1990
- [36] D.A. Molodov, S.V. Safranov: Effect of the asymmetry factor on the nature of failure and deformation of the surface of fatigue fractures, Strength of Materials, Vol. 22, No. 5, 1990, pp. 692-698.
- [37] Paris, P.C.; Gomez, M.P.; Anderson, W.E.: A Rational Analytical Theory of Fatigue, Trend Eng., 13, 9, str. 9, 1961.
- [38] Elber, W.: Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension, Eng. Fract., 1970.
- [39] Stephens, R.I.; Fatemi, A.; Stephens, R.R.; Fuchs, H.O.: Metal Fatigue in Engineering, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [40] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, L. J. Topp, Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, Journal of the Aeronautical Sciences, 23 (9), September 1956.
- [41] Đorđević, B.; Sedmak, A.; Sedmak, A.S.; Tatić, U.; Pavišić, M.; Perović, J.; Milošević, M.: The use of non-contact optical systems for determination of fracture mechanics parameters, Welding & Material Testing 2/2014,
- [42] Sedmak, A.S.; Tatić, U.; Jovičić, R.; Sedmak, A.; Milošević, M.; Bakić, R.; Sedmak, S.; Numerical modeling of austenite-ferrite weldment tensile test, 20th European conference on Fracture (ECF 20), Procedia Materials Science 3 (2014) pp. 1123-1128.
- [43] M. Mikota, S. Staib, S. Schmauder, Ž. Božič, Numerical determination of Paris law constants for carbon steel using a two-scale model, Journal of Physics Conference Series 843.
- [44] Katarina Čolić: Analiza otpornosti na lom biomaterijala za veštački kuk, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu, 2012.
- [45] Uroš Tatić: Uticaj geometrije na integritet i radni vek rekonstruktivnih ortopedskih pločica, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu, 2017.

- [46] K.A. Eldwaib, A. Grbović, A. Sedmak, G. Kastratović, D. Petrašinović, S.A. Sedmak: Fatigue Life Estimation of Damaged Integral Wing Spar Using XFEM, *Tehnički Vjesnik*, Vol. 25, No. 6, 2018, pp. 1837-1842.
- [47] A. R. Khoei: *Extended Finite Element Method, theory and applications*, Wiley, 2015.
- [48] Melenk J. M., Babuška I., *The partition of unity finite element method: basic theory and applications*, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, 1996, pp. 289-314.
- [49] G. Jovičić, M. Živković, D. Jovičić, D. Milovanović: Improvement of algorithm for numerical crack modelling, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2010, pp. 19-35.
- [50] V.E. Saouma: Saouma V. E., *Lecture Notes in Fracture Mechanics*, CVEN-6831, Dept. Of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Univ. of Colorado, 2000.
- [51] Rice J. R., Rosengren G. F., *Plain Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, 1968, pp. 1-12.
- [52] Ventura G., Gracie R., Belytschko T., *Fast integration and weight function blending in the extended finite element method*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 77, No. 1, 2008, pp. 1-29.
- [53] Tarancon J., Vercher A., Giner E., Fuenmayor J., *Enhanced blending elements for XFEM applied to linear elastic fracture mechanics*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 77, No. 1, 2008, pp. 126-148.
- [54] Chanine E., Laborde P., Renard Y., *Crack tip enrichment in the XFEM using a cutoff function*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 75, No. 6, 2008, pp. 629-646.
- [55] Moës N., Dolbow J., Belytschko T., *A finite element method for crack growth without remeshing*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 4Daux

- [56] C., Dolbow J. E., Sukumar N., Belytschko T., Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 12, 2000, pp. 1741-1760.6, No. 1, 1999, pp. 131-150.
- [57] T. Liber: Application of the Dirac Delta Function, the Heaviside Unit Function, and the Laplace Transform to Some Boundary Value Problems in Mechanics, Northwestern University, 1962.
- [58] Westergaard I., Bearing pressures and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 6, No. 1, 1939, pp. 49-53.
- [59] Williams M., On the stress distribution at the base of a stationary crack, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, No. 1, 1957, pp. 109-114.
- [60] Sukumar N., Huang Z. Y., Pr̄vost J. H., Suo Z., Partition of unity enrichment for bimaterial interface cracks, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 59, No. 8, 2004, pp. 1075-1102.
- [61] Duarte C., Hamzeh O. H., Lyszka T. J., Tworzydło W. W., A generalized finite element method for the simulation of three-dimensional dynamic crack propagation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, No. 15-17, 2001, pp. 2227-2262.
- [62] Karihaloo B. L., Xiao Q. Z., Modelling of stationary and growing cracks in FE framework without remeshing. A state-of-the-art review, *Computers and Structures*, Vol. 81, No. 3, 2003, pp. 119-129.
- [63] Sukumar N., Pr̄vost J. H., Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method, Part I: Computer implementation, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 26, 2003, pp. 7513-7537.
- [64] Xiaoping H., Moan T., Weicheng C., An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, No. 1, 2008, pp. 2-10.
- [65] Tanaka K., Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tension axis, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, No. 3, 1974, pp. 493-507.

- [66] Rhee H., Salama M., Mixed-mode stress intensity factors solutions for a warped surface flaw by three-dimensional finite element analysis, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 28, No. 2, 1987, pp. 203-209.
- [67] Liu Y., Mahadevan S., Threshold stress intensity factor and crack growth rate prediction under mixed-mode loading, *Engineering Fracture Mechanics*; Vol. 74, No. 3, 2007, pp. 332-345.
- [68] BS EN 10028-3:2009
- [69] R. Jovičić, R. Prokić-Cvetković, B. Zrilić, K. Jovičić-Bubalo: Unos toplote pri zavarivanju, *Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije*, Vol 2, 2015, pp. 61-69.
- [70] ISO TR 15608:2000(E)
- [71] T. Gladman: *The physical metallurgy of microalloyed steels*, Institute of Materials, 1997
- [72] R. Jovičić, S.A. Sedmak, N. Ilić, Lj. Radović, S. Štrbački, M. Antić, Z. Burzić: Uticaj temperature ivice žljeba i unete toplote na strukturu i tvrdoću zone uticaja toplote zavarenog spoja čelika P460NL1, *Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije*, Vol. 63, No. 3, pp. 101-113
- [73] Dodatni materijali za zavarivanje, Elektrode Jesenice, 2010.
- [74] S. Sedmak, A. Sedmak: Integritet cevovoda hidroelektrane, *Integritet i Vek Konstrukcija*, Vol. 5, No. 2, 2005, pp. 59-70
- [75] K. Weman et al: *World Wide Welding*, ESAB AB, 2002.
- [76] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bringel, R.A. Spurling, C.C. Bampton: Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 1, 1997.
- [77] W.M. Thomas, E.D. Nicholas: Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, Vol. 18, No. 4-6, 1997, pp. 269-273.
- [78] S. Tornblom: Undermatching butt welds in high strength steel, master rad, Lulea University of Technology, 2007.
- [79] A. Saxena, J.D. Landes, J.L. Bassani: *Nonlinear Fracture Mechanics: Volume I – Time-dependent Frature*, Third International Symposium on Nonlinear Fracture Mechanics, Knoxville, USA, 1986.

- [80] ISO 17635:2016
- [81] L. Jeremić, B. Đorđević, S.A. Sedmak, A. Sedmak, M. Rakin, M. Arandelović: Uticaj navarivanja plazmom i prisustva karbida na pojavu prslina i mikroprslina, Vol 18, No. 2, 2018, pp. 99-103.
- [82] B. Đorđević, G. Bakić, L. Jeremić, M. Đukić, B. Rajičić, S.A. Sedmak: The Effects of Exploitation Conditions and Welding on Crack Initiation and Propagation in a Starting Pressure Vessel, 18th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture, Lisbon, Portugal, ISBN: 978-989-20-8548-7, pp 167-170.
- [83] D. Tanasković, B. Đorđević, S.A. Sedmak, U. Tatić, M. Gajin: The case of unsuccessful repair welding of a Treiber roll, Proceedings of the 8th International Scientific Conference IRMES 2017, pp. 371-374.
- [84] M. Smiljanić: Weldable fine grain structural steels welding and weldability, Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije, Vol. 4, 2006, pp. 155-164.
- [85] A.C. Davies: The science and practice of Welding, Volume 2 – The practice of welding, Cambridge University Press, 2003.
- [86] Lj. Beara: Utjecaj parametara zavarivanja na svojstva zavara mikrolegiranih čelika izvedenih elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom CO S<sub>2</sub>, 1988.
- [87] A. Sedmak, V. Šijački-Žeravčić, A. Milosavljević, V. Đorđević, M. Vukićević: Mašinski materijali II deo, Izdanje Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000.
- [88] <https://www.kemppi.com/en-US/>
- [89] A. Halsig, S. Pehle, M. Kusch, P. Mayr: Potential of error for arc welding processes - where can I make mistakes and how they affect the component?, Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije, Vol. 61, No. 1, 2017, pp. 27-39.
- [90] U. Lukić, R. Prokić-Cvetković, O. Popović, B. Zrilić, R. Jovičić: Mogućnosti savremenih uređaja za zavarivanje MAG/MIG postupkom, Synthesis 2015 Conference, Belgrade, Serbia, 2105.
- [91] (<http://www.ceweld.com/en/content/cooling-times-delta-t85-s355-till-s960>)
- [92] Standard EN 1011 – 2/2007: Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika

- [93] Ruukki: Hot rolled steel sheets, plates and coils, Welding general, Ruukki Metals Oy, Finland, 2014.
- [94] <https://www.buehler.com/wolpert-hardness-testing-legacy-testers.php>
- [95] <https://www.rumul.ch/index.php>
- [96] S.A. Sedmak, Z. Burzić, S. Perković, R. Jovičić, M. Arandelović, Lj. Radović, N. Ilić: Influence of welded joint microstructures on fatigue behaviour of specimens with a notch in the heat affected zone, Engineering Failure Analysis, Special Issue, FRACT'4 Conference, Algeria, 2019.