

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Bojana V. Zečević

UTICAJ RADNE TEMPERATURE NA
OTPORNOST NA NASTANAK I RAST PRSLINA
NISKOUGLJENIČNOG MIKROLEGIRANOG
ČELIKA ZA TERMOENERGETSKA
POSTROJENJA

Doktorska disertacija

Beograd, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Bojana V. Zečević

EFFECT OF OPERATING TEMPERATURE ON
THE RESISTANCE OF LOW CARBON
MICROALLOYED STEEL FOR THERMAL
POWER PLANTS TO CRACK INITIATION AND
GROWTH

Doctoral dissertation

Belgrade, 2022

Mentor doktorske disertacije:

Dr Ljubica Milović, redovna profesorka
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

Dr Slaviša Putić, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Dr Bojan Međo, docent
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Dr Aleksandar Grbović, redovni profesor
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Zijah Burzić, naučni savetnik
Vojnotehnički institut, Beograd

Datum odbrane:

PREDGOVOR

Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat dugogodišnjem istraživanju u okviru projekta TR35011 finansiranom od strane Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod nazivom „Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature“.

Ogromnu zahvalnost ovim putem želim da izrazim pre svega svojoj mentorki prof. dr Ljubici Milović na neizmernoj pomoći i savetima tokom celokupnih doktorskih studija i tokom izrade same disertacije.

U Laboratoriji za mehanička ispitivanja i mehaniku loma Tehnološko-metalurškog fakulteta urađen je jedan deo eksperimentalnih istraživanja, i ovim putem želim da se zahvalim profesoru Miloradu Zriliću na svojoj pomoći i svim sugestijama.

Ostala eksperimentalna istraživanja urađena su na Vojnotehničkom institutu u Žarkovu u Laboratoriji za konstrukcione i tehničke materijale pod rukovodstvom dr Zijaha Burzića, naučnog savetnika, i mr Srđe Perkovića, kojima ovim putem zahvaljujem na ogromnoj pomoći tokom izrade eksperimenta kao i tumačenja rezultata. Dr Ljubici Radović, naučnom saradniku, takođe veliko hvala na pomoći tokom slikanja optičke i skening elektronske mikroskopije, kao i na komentaranju dobijenih fotografija.

Profesoru Aleksandru Grboviću sa Mašinskog fakulteta sam zahvalna na ogromnoj pomoći tokom izrade numeričkog dela disertacije.

Profesoru Blagoju Petrovskom želim od srca da zahvalim na svim savetima i sugestijama.

Članovima komisije, profesoru Slaviši Putiću i Bojanu Medjo hvala što su prihvatili da sarađuju sa mnom kao i na sugestijama da ovaj rad dobije konačnu formu.

Veliko hvala i kolegici Ani Maksimović što je bila tu da pomogne kad god je trebalo.

Svojoj najbližoj porodici, majci Sanji, ocu Vujadinu i sestrama Ani i Jeleni želim da izrazim zahvalnost i neizmernu ljubav na podršci, pomoći i strpljenju tokom ovih godina. Bez njih ne bi bilo ni ove disertacije.

Mojim momcima Milanu i Danilu i mojim devojkama Zoi i Rei hvala na ljubavi koja mi je punila baterije.

Uticaj radne temperature na otpornost na nastanak i rast prslina niskougleničnog mikrolegiranog čelika za termoenergetska postrojenja

Rezime

Svrha inženjerskog projektovanja je da konstrukcije budu izrađene tako da efikasno, sigurno i ekonomično ispunjavaju predviđene eksploatacione funkcije. Da bi se to postiglo, inženjer polazi od pretpostavljenih radnih opterećenja i eksploatacionih uslova, izračunava napone u nosećim elementima konstrukcije i upoređuje ih sa dozvoljenim naponima za odgovarajući oblik oštećenja koji može da se pojavi. Ukoliko su projektovana opterećenja manja ili jednaka opterećenjima u toku rada, vek konstrukcije će zavistiti od izbora materijala čiji kvalitet i osobine treba da odgovaraju nameni konstrukcije, tehnologiji proizvodnje i tehnologiji i izvođenju zavarivanja.

Parovodi pripadaju visoko odgovornim konstrukcijama koje su tokom radnog veka izložene puzanju. Osnovno svojstvo čelika za parovode je otpornost na lom puzanjem u predviđenom radnom veku.

Predmet istraživanja ove disertacije je bio da se prikupe podaci o uticaju radne temperature na mehaničke i strukturne osobine niskougleničnog mikrolegiranog čelika za rad na povišenim temperaturama, koji će poslužiti za ocenu veka komponenata termoenergetskih postrojenja. Materijal je analiziran ispitivanjem uzoraka izrađenih od novog, nekorišćenog materijala na dve temperature, temperaturi okoline i radnoj temperaturi od 540 °C, pri delovanju statičkog i dinamičkog opterećenja.

Glavni cilj istraživanja je bio da se odredi otpornost analiziranog materijala prema nastanku prslina i lomu. Rezultati eksperimentalnih istraživanja su nam takođe pružili i sliku o ponašanju prslina na radnoj temperaturi.

Pored eksperimentalne analize urađena je i numerička simulacija ponašanja epruveta pri statičkom i dinamičkom opterećenju. Numerički proračun je rađen metodom konačnih elemenata (MKE) u softverskom paketu ANSYS. Simulacije su bile zasnovane na eksperimentalno određenim vrednostima J -integrala kao i na vrednostima koeficijenata iz Parisove jednačine. Pokazano je dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, čime je verifikovana primena MKE za razmatrane slučajeve opterećenja.

Dobijenim rezultatima ispitivanja dat je praktičan doprinos oceni uticaja radne temperature na ponašanje ispitivanog materijala u uslovima statičkog i dinamičkog opterećenja, a u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije. Takođe su date i smernice za produženje radnog veka procesne opreme izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

Ključne reči: parovodi, mehanika loma, metoda konačnih elemenata, integritet konstrukcija, radni vek.

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Inženjerstvo materijala, Mehanika loma

Effect of operating temperature on the resistance of low carbon microalloyed steel for thermal power plants to crack initiation and growth

Abstract

Purpose of engineering design is to construct structures to efficiently, safely and economically fulfill the estimated purposes in exploitation. To achieve this, the engineer starts from the assumed loads and operating conditions, calculates the stresses in the load-carrying structure elements' and compares them with the allowable stresses for type of damage that may occur. If the designed loads are less than or equal to the loads acting during operation, the structure's life will depend on the materials' selection whose quality and properties should correspond to the function of the structure, manufacturing technology and welding technology and performance.

Steam pipes belong to highly responsible constructions that are exposed to creep during their service life. The basic property of steel for steam lines is creep resistance in the expected service life.

The subject of research of this dissertation was to collect data on the effect of operating temperature on the mechanical and structural properties of low carbon microalloyed steel for elevated temperature service, which will be used to assess the life of components of thermal power plants. The material was analyzed by testing specimens made of virgin, unused material at two temperatures, ambient temperature and operating temperature of 540 °C, under static and dynamic loading conditions.

The main goal of the research was to determine the resistance of the analyzed material to crack initiation and its fracture resistance. The results of experimental research also helped us to understand the crack behavior at operating temperature.

In addition to the experimental analysis, a numerical simulation of specimens' behavior under static and dynamic loading was performed. The numerical calculation was done by the finite element method (FEM) in the ANSYS software package. The simulations were based on experimentally determined values of the J -integral as well as on the values of the Paris law coefficients. Good agreement with the experimental results was shown, which verified the application of FEM for the considered load cases.

The obtained test results give a practical contribution to the assessment of the operating temperature effect on the behavior of the tested material exposed to static and dynamic loading, in order to assess the integrity and the remaining life of the construction. Guidelines for extending the service life of process equipment made of steel for elevated temperatures operation are also given.

Key words: steam lines, fracture mechanics, FEM, structural integrity, operating life

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA.....	3
2.1. Mehanizmi loma čelika.....	5
2.2. Mehanika loma čelika.....	7
2.2.1. Faktor inteziteta napona.....	9
2.2.2. Konturni J -integral.....	12
2.2.3. Otvaranje vrha prsline (CTOD)	15
2.2.4. Brzina rasta zamorne prsline dA/dN	17
2.3. Primena MKE u mehanici loma i oštećenja.....	19
2.3.1. ANSYS-komercijalni softverski alat za MKE.....	19
2.3.2. Numeričko određivanje J -integrala.....	21
2.3.3. Numerička simulacija rasta zamorne prsline da/dN	22
3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA.....	23
3.1. Uvod.....	23
3.2. Materijal.....	24
3.2.1. Ispitivanje hemijskog sastava materijala cevi.....	25
3.3. Merenje tvrdoće.....	27
3.4. Određivanje zateznih osobina.....	29
3.5. Udarne ispitivanja.....	33
3.6. Određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{IC}.....	47
3.6.1. Eksperimentalno određivanje K_{IC}	48
3.7. Određivanje parametara rasta zamorne prsline.....	64
3.8. Metalografska ispitivanja.....	75
3.8.1. Optička mikroskopija.....	75
3.8.2. Skening elektronska mikroskopija.....	77
3.8.2.1. Prelomne površine epruveta za udarne ispitivanja.....	77
3.8.2.2. Prelomne površine epruveta za određivanje žilavosti loma.....	77
3.8.2.3. Prelomne površine epruveta za merenje brzine rasta zamorne prsline.....	77
4. NUMERIČKA ANALIZA.....	82
4.1. Numerički proračun J-integrala.....	82
4.2. Numeričko predviđanje rasta zamorne prsline.....	97
5. ANALIZA REZULTATA.....	103
5.1. Eksperimentalni rezultati.....	103
5.1.1. Hemijski sastav ispitanog čelika.....	103
5.1.2. Tvrdoća.....	103
5.1.3. Zatezne osobine.....	104
5.1.4. Udarne ispitivanja.....	105
5.1.5. Žilavost loma pri ravnoj deformaciji.....	106
5.1.6. Brzina rasta zamorne prsline.....	107
5.1.7. Metalografija.....	108
5.1.7.1. Rezultati metalografske analize.....	108
5.1.7.2. Rezultati analize SEM fotografija.....	108
5.1.7.2.1. Prelomne površine epruveta za udarne ispitivanja.....	108
5.1.7.2.2. Prelomne površine epruveta za ispitivanje žilavosti.....	110
5.1.7.2.3. Prelomne površine epruveta određivanje brzine rasta prsline.....	111

5.2. Rezultati numeričke analize.....	112
5.2.1. Numerički proračun J -integrka i kritične vrednosti faktora inteziteta napona.....	112
5.2.2. Numerički proračun rasta zamorne prsline.....	112
6. ZAKLJUČCI.....	114
7. LITERATURA.....	115

1. UVOD

Učestalost lomova u prošlosti se povećavala sa povećanjem primene metala u konstrukcijama [1.1] Krajem 19. veka, veliki broj lomova privlačili su pažnju projektanata kao i proizvođača materijala. Primeri katastrofalnih lomova konstrukcija su mnogobrojni, a najteži su oni gde je broj ljudskih žrtava bio veliki, što je podstaklo dublje proučavanje kojima su se utvrđivala loša konstrukcijska rešenja i greške u materijalima. [1.2]

Oko 1930. godine uvođenjem zavarenih konstrukcija u proizvodnju, nastao je novi period učestalih lomova. Neki od njih su brodovi Liberti, gde se od proizvedenih 4694 broda, čak 233 slomilo na dva dela, a 1289 je pretrpelo teške lomove. Istraživanja su pokazala da je kod njih bila prisutna greška tipa prsline i značajna koncentracija napona, kao i unutrašnji naponi zaostali od zavarivanja. [1.1]

Vek postrojenja je uslovljen dobrom konstrukcijom i materijalom odgovarajućih osobina i kvaliteta. Potrebno je i kvalitetno izabrati i dobro sprovesti tehnologiju zavarivanja kao i prikladnu tehnologiju u proizvodnji, a sve to pod uslovima da opterećenja budu u skladu sa očekivanim opterećenjima.

Svrha inženjerskog projektovanja je da konstrukcije budu izrađene tako da efikasno, sigurno i ekonomično ispunjavaju predviđene eksploatacione funkcije. Da bi se to realizovalo, potrebno je da inženjer izračuna napone u raznim elementima konstrukcije i da ih upoređi sa kritičnim naponima za odgovarajući oblik oštećenja koji bi mogao da se pojavi, a sve to polazeći od pretpostavljenih eksploatacionih uslova i radnih opterećenja. [1.3]

Komponente konstrukcija mogu sadržati niz slabih mesta koja nastaju pri tehnološkom postupku dobijanja i prerade sirovog materijala, izradi komponenata, montaži, termičkoj obradi, zavarivanju, ili koja nastaju u toku eksploatacije. Kontrolom kvaliteta se greške ne mogu izbeći, ali se može uticati da se neke greške otklone ili da se smanje. Boljom tehnologijom, razvojem Matematičke analize, Mehanike kontinuuma, Analize napona i Mehanike loma se obezbeđuju pouzdanije konstrukcije i broj lomova se svodi na prihvatljiv nivo.

Glavni delovi procesnih postrojenja u termoelektranama jesu parovodi. Parovodi pripadaju visoko rizičnim konstrukcijama, stoga materijali parovoda, zajedno sa njihovim zavarenim spojevima, podležu oštećenjima koja se akumuliraju tokom eksploatacije i koja mogu dovesti do katastrofalnih lomova. Osnovno svojstvo čelika za parovode je otpornost na puzanje i lom u propisanom vremenu. U savremenim termoenergetskim postrojenjima se, zbog ekonomičnosti pogona, zahteva učestalije startovanje i isključivanje nego pre, čime se opterećenju puzanjem dodaje i niskociklični zamor pa se od novih materijala zahteva zadovoljavajuća otpornost na ovaj kombinovani vid opterećenja.

Zato je važno da u fazi projektovanja, izrade, a posle i eksploatacije imamo dostupne sve parametre elasto-plastične mehanike loma za materijale od kojih se izrađuje parovod, a to su vrednosti J -integrala, kao i podatke o uticaju radne temperature čijom obradom i primenom na konkretan slučaj možemo proceniti integritet i vek čelične konstrukcije parovoda.

Razvijen je lokalni pristup lomu za potpuno razumevanje mehanizma loma. Ovaj pristup je kombinacija teorije, eksperimenta i numeričkog rešenja koja omogućuju manje konzervativnu procenu značaja prsline i zaostalih napona [1.4, -1.8].

Otpornost na lom može se proceniti različitim parametrima mehanike loma. Tri od njih su u opštoj upotrebi: faktor intenziteta napona K_I , pomeranje otvora prsline (COD) i J -integral. Treba pomenuti da su njihove kritične vrednosti: otpornost na lom u ravni deformacije K_{Ic} , kritični COD i kritični J -integral, J_{Ic} , mera žilavosti loma, mogu koristiti kao svojstva homogenog materijala. Standardi za njihovo određivanje ispitivanjem dobro su definisani, primenjujući kvazi-statičko opterećenje [1.9-1.12].

Kod eksperimentalnog merenja pažnja je usmerena na merenje otpornosti prema nastanku loma, J_{IC} i J -R krive. [1.13] J -R kriva se eksperimentalno određuje koristeći metodu jednog uzorka, metodu koja prati elastičnu deformaciju zajedno sa merenjem otvaranja usta prsline (CMOD).

Za procenu radnog veka konstrukcije potrebno je i numeričko određivanje parametara mehanike loma pomoću kojih je određen stabilan i nestabilan rast prsline.

Metoda konačnih elemenata (MKE) se u velikoj meri koristi, a neki od radova na ovu temu uključuju dvodimenzionalnu MKE analizu opterećenja epruvete sa kratkim prslinama SENB uzorka [1.14] sa predloženom jednačinom za procenu J -integralu. [1.15]

Numeričko modelovanje i simulacija rasta prsline, na metalnoj konstrukciji parovoda, uz dejstvo statičkog i dinamičkog opterećenja primenom MKE uz verifikovane numeričke rezultate parametara elastoplastične mehanike loma mogu da omoguće brzu i pouzdanu procenu integriteta čelične konstrukcije parovoda.

Predmet istraživanja ove disertacije je da se prikupe podaci o uticaju temperature na mehaničke i strukturne osobine niskouglednog mikrolegiranog čelika za rad na povišenim temperaturama, koji će poslužiti za ocenu veka komponenata termoenergetskih postrojenja. Materijal je analiziran ispitivanjem uzoraka izrađenih od novog, nekorišćenog metala na dve temperature: 20 °C i radnoj temperaturi 540 °C.

Istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji sprovedena su u više faza koje obuhvataju:

- Izradu epruveta iz cevi za statička i dinamička ispitivanja;
- Eksperimentalna ispitivanja, određivanje mehaničkih osobina osnovnog materijala i određivanje elastoplastičnih parametara mehanike loma;
- Fraktografska ispitivanja - optička i skening elektronska mikroskopija;
- Izradu numeričkog modela i numeričko određivanje parametara mehanike loma pomoću metode konačnih elemenata.

Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza daju praktičan doprinos oceni uticaja radne temperature na ponašanje osnovnog metala, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije parovoda kao i produženja radnog veka procesne opreme izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Povećanje sigurnosti i ekonomičnosti termoenergetskih postrojenja je godinama jedan od vodećih problema koji timovi istraživača širom sveta pokušavaju da reše. Istraživanja su usmerena ka razvoju novih legura za rad na povišenim temperaturama i unapređenju postojećih i razvoju savremenih metoda procene preostalog veka.

Osnovni kriterijum za izbor čelika za parovode predstavljaju radni uslovi. Eksploatacija cevi parovoda ostvaruje se pri temperaturama 0,45-0,55 T topljenja i malim radnim opterećenjima ($\sigma \ll \sigma_{0,2}$). Osnovno svojstvo čelika za parovode, predstavlja otpornost prema puzanju i lomu, u toku zadatog vremena, odnosno vatrootpornost. Vatrootpornost se postiže racionalnom kombinacijom legiranja i termičke obrade. Imajući u vidu da procesi koji se odigravaju pri rekristalizaciji određuju brzinu puzanja, sa gledišta stabilnosti idealnu mikrostrukturu vatrootpornih legura trebao da predstavlja čvrsti rastvor na bazi železa ili nekog drugog osnovnog materijala (Ni, Co) sa legirajućim elementima koji podižu temperaturu rekristalizacije. Poznato je da legure čvrstih rastvora sa površinski centriranom kubnom rešetkom poseduju višu temperaturu rekristalizacije od bliskih po sastavu legura sa prostorno centriranom kubnom rešetkom, što znači da austenitna struktura obezbeđuje veću vatrootpornost čelika od feritne. Kod čelika, dodatno ojačavanje se najčešće postiže zahvaljujući pojavi prezasićenog čvrstog rastvora ugljenika i alfa železa - martenzita i njegovog otpuštanja. Čelici i legure, termički obrađeni na maksimalni nivo čvrstoće, zbog svoje metastabilne strukture mogu da se koriste samo za kratkotrajnu upotrebu i to na temperaturama na kojima je koagulacija čestica izdvojenih faza dovoljno mala. Nasuprot ovome, u slučaju čelika i legura predviđenih za dugotrajnu eksploataciju na povišenim temperaturama ide se na kompromisno rešenje, tako da se završna faza termičke obrade, otpuštanje ili starenje, izvodi u dugom trajanju na temperaturi koja znatno premaša radnu temperaturu. Time se na račun čvrstoće postiže mnogo stabilnija struktura, a što i predstavlja osnovni zahtev u datim uslovima. [2.1]

U energetskim postrojenjima za proizvodnju pare u početku su korišćeni ugljenični čelici. Kako su se vremenom postavljali zahtevi za višim temperaturama pregrejane pare i većim pritiscima, to se postepeno prelazilo na upotrebu sve više legiranih čelika. Razvoj čelika za rad na povišenim temperaturama započeo je dodatkom 0,25% molibdena, a potom i određenih količina hroma i vanadijuma, da bi se 50-ih godina stigli i do 12% hromnog čelika [2.2]. Za radne temperature više od 580°C, pored najčešće korišćenih visokolegiranih, austenitnih Cr-Ni čelika raznih modifikacija, primenu nalaze i neki drugi kompleksno legirani čelici sa visokim sadržajem legirajućih elemenata. Neophodna vatrootpornost niskolegiranih čelika, čija radna temperatura ne prelazi 600°C, postiže se kompleksnim legiranjem hromom, molibdenom, vanadijumom i titanom. Pri tome pojedinačni sadržaj prisutnih legirajućih elemenata, sa izuzetkom hroma ne prelazi 1%. U zavisnosti od temperature eksploatacije razvijeni su čelici legirani jednim ili sa više elemenata, pri čemu je sastav čelika složeniji što je temperatura viša. Niskolegirani vatrootporni čelici sadrže najčešće manje od 0,2%C, jer povećanje sadržaja ugljenika pospešuje kako proces koagulacije karbida, tako i preraspodelu legirajućih elemenata između čvrstog rastvora i karbidne faze, što nepovoljno utiče na ponašanje čelika pri puzanju, odnosno na granicu puzanja. Kada se radi o čelicima koji služe za izradu parovoda, smatra se da optimalni sadržaj ugljenika iznosi 0,08 - 0,12%, budući da se u ovom slučaju zahteva i dobra zavarljivost. [2.3, 2.4]

U Evropi su se sredinom šezdesetih godina prošlog veka pojavili prvi visokohromni feritni čelici. U Francuskoj je za parovode razvijen čelik oznake EM12. U Nemačkoj je u to vreme razvijen čelik oznake X20CrMoV12-1, koji je korišćen za parovode širom sveta. Ovaj čelik ima dobru martenzitnu mikrostrukturu, ali je čvrstoća puzanja manja nego kod čelika EM12 i zbog visokog sadržaja ugljenika teško se zavaruje. Sedamdesetih godina u Americi su modifikovali čelik EM12 i nastao je T91 za cevi pod pritiskom i P91 za parovode, i ovim materijalom su zamenjeni čelici EM12 i X20CrMoV12-1. Dalja poboljšanja čvrstoće puzanja postignuta su pojavom čelika NF616 i

HCM12A. [2.5] U Srbiji u termoelektranama je najzastupljeniji čelik X20CrMoV12 sa 12% hroma i 14MoV6-3 sa 0,3-0,6% hroma. [2.6]

U ovoj disertaciji ispitivanja su urađena na čeliku za parovode koji je po svojim mehaničkim osobina najbliži čeliku 14MoV6-3. Iz tog razloga u narednom delu je dat kratak pregled nekoliko naučnih radova u kojima pišu upravo o njemu ili generalno o eksperimentalno numeričkoj analizi i koji su nam bili osnova za ispitivanje koje je prikazano u ovoj doktorskoj disertaciji.

Autori iz rada [2.7] su predstavili hemijski sastav čelika 14MoV6-3, kao i njegova mehanička svojstva nakon termičke obrade, i zatim prikazali mikrostrukturu, karbidne faze i udeo vanadijuma. Dosli su do sledećih zaključaka: Da bi dobili željena mehanička svojstva veoma je važno da se kontroliše veličina feritnih zrna, kao i taloženje karbida, karbid-nitrata i karbid-vanadijuma. Udeo precipitata određuje konačnu otpornost čelika na puzanje. Željena veličina i raspodela precipitata se ostvaruje kontrolisanom termičkom obradom tako da je zaključak i da je nakon valjanja neophodna termička obrada čelika.

U radu [2.8] prikazana je ocena veka trajanja cevi i njenih remontovanih zavarenih spojeva od 14MoV6-3 čelika nakon dugotrajnog rada ispitivanjem mikrostrukture pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa, merenjem tvrdoće i ispitivanjem puzanja osnovnog materijala i zavarenih spojeva. Pomoću ovih ispitivanja moguće je odrediti vreme ponovnog servisiranja u odnosu na preostali vek materijala. Procena preostalog veka a time i procena i određivanje vremena sigurne eksploatacije, od velike je važnosti za rad komponenti koje rade izvan projektovog veka trajanja. Ispitivanja su pokazala da je rad nakon projektovanog vremena moguć, ali treba uzeti u obzir manju čvrstoću remontovanih zavarenih spojeva u projektivnim proračunima za produženje izvan projektovanog radnog veka.

U radu [2.9] autori su poredili mehaničke osobine čelika 14MoV6-3, tako što su napravili 5 različitih veličina epruveta, od mikro do makro i njihove rezultate uporedili. Uočeno je da ključni parametri materijala uključujući napon tečenja, zateznu čvrstoću i izduženje do loma zavise od veličine uzorka, veće su vrednosti u slučaju standardnog uzorka. S druge strane, površinska obrada uzoraka za ispitivanje mikro zatezanja dovodi do smanjenja razlika u mehaničkim svojstvima između standardnih i minijaturnih uzoraka.

Stepen oštećenja čelika nakon 100 000h eksploatacije analiziran je u radu [2.10] pomoću eksperimentalne i numeričke analize zasnovane na lokalnom pristupu lomu. Kritične vrednosti J -integrala su eksperimentalno određene na SENB uzorcima, a numerički korišćenjem dva mikromehaničkih modela, Rice-Tracey model i CGM (kompletan Gursunov model). Kao zaključak se može izvesti da sa Rice-Tracey modelom se ne može dati tačan opis mehanizma duktilnog loma, jer pokazuje vrlo velika odstupanja J_{IC} u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima, dok se sa CGM modelom može predvideti nivo oštećenja za elemente u okolini vrha prslina.

U radu [2.11] autori su prikazali postupak numeričko eksperimentalne dijagnostike čvrstoće konstrukcija. Numerička dijagnostika primenjuje metodu konačnih elemenata, analizu rezultata proračuna i definisanje parametara ponašanja. Eksperimentalna analiza obuhvata merenje i definisanje ulaznih veličina za proračun i ocenu rezultata proračuna. Numeričke i eksperimentalne metode posebno su prikazane. Na kraju se sumiraju rezultati dijagnostike i preporučuju mere za rekonstrukciju, popravku, poboljšanje ili revitalizaciju, uz procenu preostalog veka, ili se predlaže nabavka nove opreme. Parametri dijagnostike koji se odnose na opterećenja i napone su od velikog značaja jer se pomoću njih na pogodan način definišu zahtevi u pogledu ponašanja konstrukcije.

U narednom delu poglavlja biće predstavljene teorijske osnove mehanike loma kojom se i bavimo u ovom radu kao i teorijske osnove numeričke simulacije.

2.1. Mehanizmi loma čelika

Deo mašine ili konstrukcije može da bude onesposobljen za rad kada pod uticajem faktora, kao što su opterećenje i agresivna sredina, dođe do loma, razaranja, oštećenja ili deformacije materijala. U opštem slučaju javljaju se sledeće promene na materijalima, zbog kojih mašine ili konstrukcije mogu da zakažu u radu [2.12] :

1. Prekomerna elastična deformacija

- a. prekomerni ugib
- b. prokomarno izvijanje

2. Prekomerna plastična deformacija

- a. kvazistatička deformacija pri rastućem opterećenju
- b. statička deformacija (puzanje) pri konstantnom opterećenju na povišenim temperaturama.

3. Lom

- a. krti i duktilni lom
- b. lom izazvan zamarajućim opterećenjem
- c. lom usled dejstva konstantnog (statičkog) opterećenja na povišenim temperaturama
- d. lom usred istovremenog dejstva opterećenja i agresivne sredine:
 - naponska korozija
 - korozioni zamor
 - vodonična krtost
 - krtost u dodiru sa tečnim metalom
 - radijaciono oštećenje

4. Korozija

5. Habanje

Elastična deformacija

Prekomerna elastična deformacije može da prouzrokuje kvar na mašini ili konstrukciji na isti način kao što to čini prekomerna plastična deformacija ili lom. Npr. osovina kod koje se javlja suviše veliki ugib izaziva brzo habanje ležišta, dok vitoperenje dobro upasovanih delova dovodi do njihovog oštećenja. S druge strane prekomerni spoljašnji pritisak izaziva vitoperenje tankozidog suda.

Plastična deformacija

Prekomerna plastična deformacija može da se javi pod uticajem kvazistatičkog opterećenja ili pod uticajem statičkog opterećenja. Ovaj drugi oblik deformacije, koji je poznat kao statička deformacija ili puzanje, javlja se na povišenim temperaturama. Otpor metala prema deformaciji predstavlja jedan od dva osnovna oblika čvrstoće, dok je drugi oblik otpor prema lomu. Povećanjem čvrstoće, odnosno ojačavanjem metala, smanjuje se rizik od prekomerne plastične deformacije. Kao mera sposobnosti metala da spreči plastičnu deformaciju definiše se ili granica tečenja, odnosno opterećenje pri kome započinje plastična deformacija pri rastućem opterećenju ili statička čvrstoća, konstantno opterećenje na datoj temperaturi, pri kome minimalna brzina deformacije iznosi 0,0001% ili 0,000001%. Odavde sledi da do razaranja dela mašine ili konstrukcije dolazi ili kada se prekorači granica popuštanja ili kad se brzina deformacije poveća iznad neke definisane vrednosti.

Lom

(a) Krti lom.

Krti lom se najčešće javlja iznenada kao rezultat brzog rasta postojećih prslina koje predstavljaju koncentratore napona. Lom se u opštem slučaju odigrava u dve faze, stvaranjem i rastom prsline, ali u eksploatacionim uslovima materijal najčešće već sadrži prsline ili greške koje deluju kao prsline. Makroskopski posmatrano svaki brzi lom po definiciji je krti lom. Sposobnost metala da spreči rast prsline odnosno otpor metala prema lomu u prisustvu koncentratora napona se definiše kao žilavost i predstavlja drugi osnovni oblik čvrstoće. Opterećenje pri kome dolazi do loma naziva se prelomna čvrstoća. Međutim, ova veličina ne može da se koristi kao mera žilavosti već se u praktičnom radu najčešće koriste empirijski kriterijumi zasnovani na energiji koju uzorak apsorbuje pri lomu (veća apsorbovana energija ukazuje na veću žilavost), mada se u novije vreme sve više koriste kriterijumi zasnovani na mehanici loma (faktor intenziteta napona K_{IC} , integral J_{IC} itd.) koji predstavljaju konstantu materijala.

(b) Zamorni lom.

Lom usled zamaranja se odvija postepeno, pod uticajem promenljivog opterećenja postojeće prsline koja polako raste dok ne dostigne kritičnu veličinu. U tom momentu dolazi do brzog loma koji predstavlja završnu fazu zamornog loma. Kao mera sposobnosti materijala da spreči ili oteža rast zamorne prsline obično se definiše opterećenje pri kome dolazi do loma posle 10^7 ciklusa, ili opterećenje ispod koga ne dolazi do zamornog loma ni pri beskonačno velikom broju ciklusa (dinamička čvrstoća). U novije vreme sve više se koriste kriterijumi zasnovani na mehanici loma kao što su kritični opseg intenziteta napona za rast zamorne prsline (ΔK_{th}) ili brzina rasta zamorne prsline (da/dN).

(c) Statički lom.

Lom na povišenim temperaturama koji se javlja pod uticajem konstantnog opterećenja se definiše kao statički lom. U zavisnosti od opterećenja i temperature statički lom može da se javi bez prethodne plastične deformacije. Kao mera sposobnosti metala da spreči ili oteža statički lom definiše se konstantno opterećenje koje na toj temperaturi izaziva lom posle tačno određenog vremena (100, 1000 ili 10000 sati). Ovo opterećenje se naziva statička prelomna čvrstoća.

(d) Naponska korozija.

Naponska korozija, vodonična krtost ili neki drugi oblik loma koji se javlja pod istovremenim uticajem opterećenja i agresivne radne sredine se, slično statičkom lomu, javlja posle izvesnog vremena bez prethodne plastične deformacije koja bi ukazala na pojavu loma. Kao mera sposobnosti metala da spreči ili oteža lom usled naponske korozije definiše se ili kritično opterećenje ili kritični intenzitet napona za rast prsline usled naponske korozije (K_{ISCC}). [2.12]

2.2. Mehanika loma čelika

Uzroci lomova kod velikog broja konstrukcija je nastanak i rast prslina, koje su nastale delovanjem statičkog i dinamičkog opterećenja, kao i uticajem okruženja, temperature, vlažnosti, korozivne sredine. Kod najvećeg broja konstrukcija postoji prisustvo greške nehomogenosti materijala, koje nastaju u procesu izrade, prerade ili kao posledica transporta, greške zavarivanja, eksploatacije materijala, itd.

Greške tipa prsline dostižu kritičnu veličinu posle određenog vremenskog perioda. Nakon tog vremena može doći do otkaza, odnosno do loma konstrukcije jer nosivost dela postaje manje od projektovanog opterećenja.

U procesu loma uočavaju se dve faze:

- Prelaz početne greške nehomogenosti materijala u prsline i šupljine, i njihov stabilan rast.
- Nastajanje kritične vrednosti dužine prsline i brz razvoj prsline do potpunog loma.

Mehanika loma kao inženjerska disciplina, bavi se proučavanjem razvoja prsline u krtnim i kvazikrtnim telima. Mehanika loma se bavi istraživanjem uslova razvoja prsline, ali obuhvata i deo otpornosti materijala, koji se odnosi na završnu fazu procesa deformisanja pod delovanjem opterećenja.

Osnovni cilj pri projektovanju posuda pod pritiskom, brodova, letelica, vozila i mostova je da se njihove performanse optimizuju sa stanovišta cene, materijala, konstruisanja, izrade, eksploatacije i održavanja. Da bi se to postiglo, projektant izračunava napone u raznim elementima konstrukcije, polazeći od predpostavljenih radnih opterećenja i eksploatacionih uslova, i upoređuje ih sa kritičnim naponima za odbovajajući oblik oštećenja koji bi mogao da se pojavi. Mogući uzroci otkaza su:

- prekomerna elastična deformacija;
- prekomerna plastična deformacija, i
- lom.

Inženjeri se u praksi najčešće koncentrišu na prva dva moguća oblika oštećenja polazeći od pretpostavke da će pravilnim izborom materijala i ograničavanjem nivoa napona u njima sprečiti pojavu loma. Ispitivanja su međutim potvrdila da u konstrukcijama uvek postoji neki oblik diskontinuiteta u materijalu, koji mogu biti mikronske veličine ali nekad mogu postojati i veće greške, prsline od nekoliko centimetara, radi čega može doći do otkaza i loma konstrukcije i pri naponima nižim od napona tečenja, pa ovakvo razmišljanje inženjera nije uvek ispravno. Kontrolom kvaliteta možemo uticati da se otklone ili smanje neke greške u materijalu, koristeći ispitivanja bez razaranja za utvrđivanje grešaka kao što su ultrazvuk i radiografsko ispitivanje, ali greške se i pored toga ne mogu nažalost skroz izbeći [2.13].

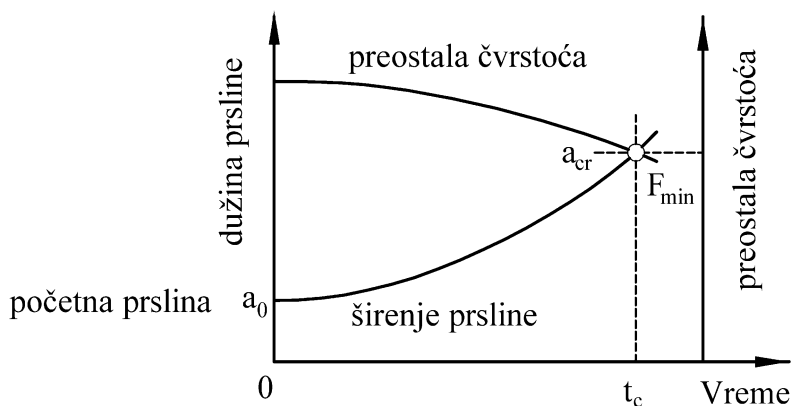
Mehanika loma se bavi problemima stabilnog ili nestabilnog rasta neke već postojeće ili tokom eksploatacije inicirane prsline, kao i analizom oštećenja i lomova nastalih rastom prsline.

Tradicionalni pristup konstruisanja koji se bazira na stepenu sigurnosti, tj dimenzionisanjem delova na osnovu dopuštenih napona, nije dovoljno pouzdan jer i pored ispunjenih zahteva u pogledu sigurnosti od plastičnog tečenja havarije i otkazi se dešavaju. To možemo videti iz primera mnogobrojnih lomova raznih tipova konstrukcija kao što su čelični mostovi, brodovi, letelice, posude i cevovodi pod pritiskom i mašinskih elemenata [2.14].

Projektant koji želi da realizuje pouzdanu konstrukciju primeniće postavke mehanike loma pri:

- proceni veka konstrukcije, pre puštanja u rad i u toku eksploatacije;
- određivanju zaostalih napona;
- izboru materijala, i
- optimizaciji konstrukcije.

Vreme potrebno za nastanak prsline relativno je kratko u odnosu na vreme potrebno za širenje prsline do loma. Iz tog razloga se i preostali vek konstrukcije procenjuje na osnovu vremena potrebnog za širenje prsline koje iznosi oko 95% veka [2.15]. Vek konstrukcije ili dela konstrukcije zavisi od brzine širenja prsline tj. brzine smanjenja nosivosti kao posledice do kritičnog razvoja prsline. Šematski prikaz razvoja greške u zavisnosti od vremena i smanjenja preostale čvrstoće dat je na sl. 2.1.

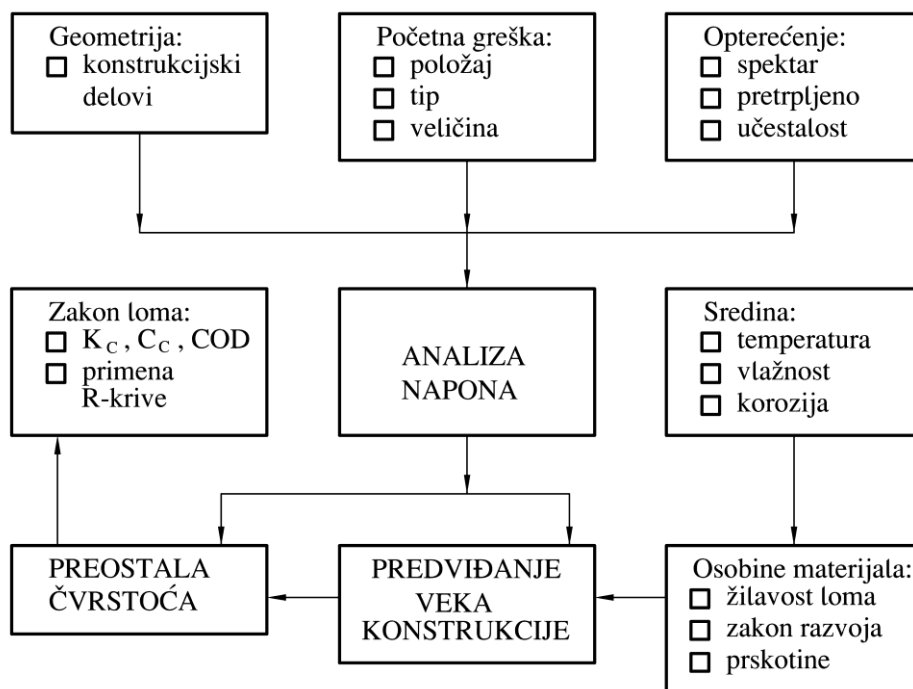


Slika 2.1. Šematski prikaz razvoja prsline pri povećanju oštećenja i smanjenju preostale čvrstoće [2.13]

Posle određenog kritičnog vremenskog perioda, greška dostiže kritičnu veličinu, a_{cr} , i nakon toga nosivost dela konstrukcije postaje manja od projektovanog opterećenja, i dolazi do iznenadnog i prevremenog otkaza konstrukcije tj. do katastrofalnog loma. Da bi se obezbedila sigurnost konstrukcije, projektovanje je potrebno izvršiti prema specifičnim zahtevima u pogledu greške tako da se nikad ne dozvoljava razvoj početne greške do njene kritične veličine, jer bi se u tom slučaju smanjilo projektno granično opterećenje ispod propisanog nivoa (F_{min}) u toku radnog veka konstrukcije. Niz različitih faktora kao što su maksimalno i radno opterećenje, učestalost opterećenja, čvrstoća materijala, zaostali naponi, veličina i oblik prsline, brzina razvoja prsline, uticaj radne sredine utiču na vek konstrukcije.

Da bismo predvideli preostali vek konstrukcije polazimo od pretpostavke da prslina već postoji u njoj ili da je nastala u početnom periodu rada konstrukcije. Na sl. 2.2 prikazan je postupak predviđanja veka konstrukcije i obuhvata sledeće faze:

- **Geometrija** – Određuje se geometrija konstrukcije koja se istražuje ili projektuje i to je ulazni podatak za analizu napona.
- **Utvrdjivanje grešaka** - Primenom ispitivanja bez razaranja utvrđuje se da li postoji prisustvo greške i ukoliko postoji utvrđuje se njena veličina i oblik.
- **Opterećenje** - Potrebno je odrediti tačnu vrednost radnih opterećenja kao i sve promene radnog opterećenja. Radno opterećenje se preračunava iz drugih parametara, npr. preko deformacije.
- **Okolna sredina** – Potrebno je tačno definisanje uticaja radne sredine na konstrukciju kao što su temperatura, vlažnost, koroziona dejstva.
- **Osobine materijala** - Određivanje žilavosti loma i razvoja prsline u uslovima radne sredine i radnog opterećenja.
- **Predviđanje radnog veka konstrukcije** - Radni vek se može predvideti na osnovu analize napona i zakona razvoja prsline, a time se dobijaju podaci o veku pri uticaju zamora i intervalima inspekcije u preostalom veku.



Slika 2.2. Predviđanje veka konstrukcije i preostale čvrstoće [2.14]

Različiti istraživači su predložili više kriterijuma za opisivanje pojave loma [2.16]. Najčešće se primenjuju kriterijumi koji se zasnivaju na određivanju žilavosti loma pri ravnom stanju deformacije (RSD), K_c , veličini otvaranja vrha prsline, $CTOD$ ili δ , veličini otvaranja prsline, COD , gustini energije deformacije W ili analizi J -integrala [2.16-2.19].

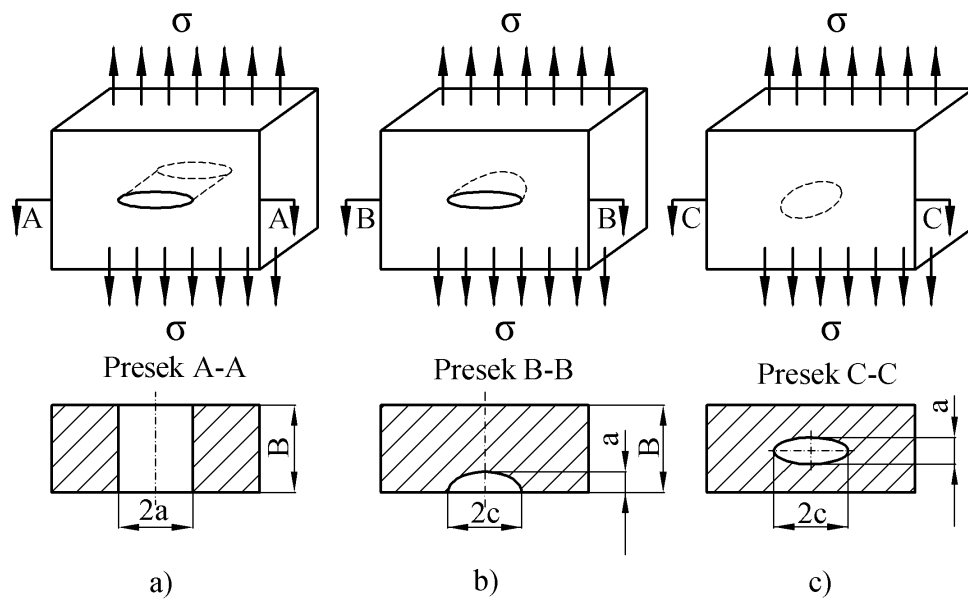
Mehanika loma omogućava da se dobije kvantitativni odgovor na specifične probleme sigurnosti konstrukcija sa prslinom. Brzina rasta prsline tokom eksploatacije zavisi od mnogih faktora kao što su veličina i tip opterećenja, veličina i oblika tela sa prslinom, zatim od kombinacije materijal-okruženje. Povećanjem prsline, povećava se i intezitet napona na njenom vrhu što uzrokuje njen još brži rast. Preostala čvrstoća konstrukcije, σ_c , koja je prikazana zavisnošću napona loma od dužine prsline, progresivno opada sa rastom prsline, slika 2.1.

Mehanika loma poseduju metode koje mogu dati kvantitativne i koje daju precizne odgovore na postavljena pitanja. Zahvaljujući mehanici loma, dozvoljava se da se strukture sa greškama puste u eksploataciju, nakon procene opasnosti i uz određena ograničenja.

2.2.1. Faktor inteziteta napona

U okviru linearno-elastične mehanike loma sila razvoja prsline iskazuje se faktorom intenziteta napona (FIN), K_I , a otpornost materijala prema stvaranju prsline se iskazuje kritičnom vrednošću FIN, K_{Ic} , nazvanom još i *žilavošću loma pri ravnoj deformaciji*.

Prslina podrazumeva šupljinu u telu obrazovanu bez uklanjanja materijala i ograničena sa dve naspramne površine čije je rastojanje neuporedivo manje od **dimenzija** njene površine [2.20]. Zajednička konturna linija površine prsline naziva se front prsline, sl. 2.3. Na sl. 2.3 su dati karakteristični oblici ravanske prsline idealizovanog čela koji se usvajaju pri teorijskim razmatranjima. Čelo središnje prolazne prsline (sl. 2.3a) idealizuje se kao prava linija, površinske prsline kao poluelipsa (sl. 2.3b), a čelo skrivene tj. unutrašnje prsline kao elipsa (sl. 2.3c).



Slika 2.3. Osnovni pojavni oblici ravanske prsline [2.20]

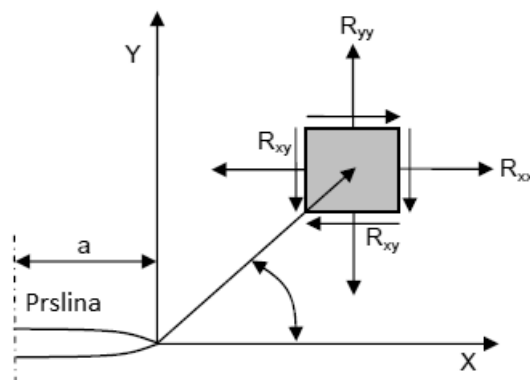
a) prolazna, b) polueliptična, c) eliptična

U slučaju materijala male duktilnosti, prsline se razvijaju relativno brzo sa malom plastičnom deformacijom na vrhu prsline i rezultiraju krtnim lomom, koji karakteriše brzi, nestabilan rast prsline. Linearno-elastična mehanika loma kvantifikuje meru otpornosti krtnih materijala prema nestabilnom širenju prsline.

Linearna elastičnost nam definiše napone u okolini vrha prsline, jednačina (2.1):

$$R_{r\theta} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad (2.1)$$

Gde je R -napon, K - FIN, r i θ polarne komponente, a f bezdimenziona funkcija, sl. 2.4.



Slika 2.4. Kordinatne ose oko vrha prsline

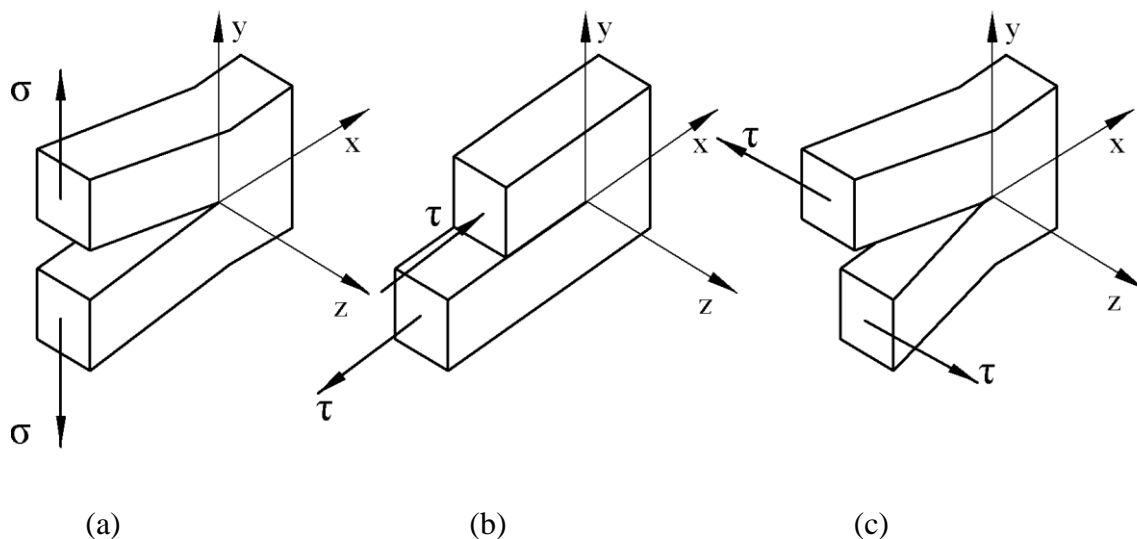
Rast prsline koji vodi do loma se predviđa na osnovu napona koji deluje pri vrhu prsline. Naponsko stanje na vrhu prsline je opisano vrednošću FIN. Iz teorije elastičnosti može se K izraziti kao u jednačini (2.2):

$$K = Y \cdot R \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

U jednačini (2.2) je R primenjeni napon, a - polovina dužine prsline, a Y - konstanta koja zavisi od načina otvaranja prsline i geometrije uzorka.

Oblici pomeranja vrha prsline, koja leži u $(x-z)$ ravni, mogu se opisati na sledeći način [2.20]:

- oblik *I* – razvoj prsline cepanjem (sl. 2.5a) određen je pomeranjem površina prsline tako da se one otvaraju simetrično u odnosu na prvobitnu ravan prsline.
- oblik *II* – razvoj prsline klizanjem (sl. 2.5b) se odnosi na lokalnu deformaciju pri kojoj jedna površina klizi po drugoj u istoj ravni, ali u suprotnim smerovima.
- oblik *III* – razvoj prsline smicanjem (sl. 2.5c) predstavlja slučaj lokalne deformacije, pri kojoj se površine smiču jedna po drugoj duž čela prsline tako da tačke materijala, koje su pre razvoja prsline bile u istoj vertikalnoj ravni, posle razvoja prsline se raspoređuju po različitim vertikalnim ravnima.



Slika 2.5. Tri osnovna oblika pomeranja površine prsline [2.20]
(a) Oblik I – cepanje, (b) Oblik II – klizanje, (c) Oblik III – smicanje

Treba napomenuti da su najopasniji lomovi koji nastaju cepanjem, oblik I, odnosno otvaranjem prsline pod delovanjem napona zatezanja, zato što se odvijaju brzo tako da ih po pravilu nije moguće otkriti u početnoj fazi nastanka prsline.

Odgovarajući FIN se prema obliku opterećenja obeležava sa K_I , K_{II} i K_{III} . FIN je kvantitativna veličina koja zavisi od konfiguracije sistema, na primer od geometrije prsline i od načina primenjivanja spoljnog opterećenja, i analitički izraz za FIN, K , takođe zavisi od posmatranog sistema. Kada FIN dostigne svoju kritičnu vrednost K_{IC} , pri RSD za dati sistem i materijal, on postaje konstanta tog materijala.

Razlika između ravnog stanja napona (RSN) i RSD je od ključnog značaja za primenu linearno-elastične mehanike loma, jer samo u uslovima RSD može da se zanemari uticaj plastične deformacije. Uzimajući u obzir analizu kvazikrtog loma i tumačenje FIN kao sile rasta prsline, jednačinom (2.3) može se uspostaviti uslov za početak nestabilnog rasta prsline:

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2.3)$$

Ovde je K_I FIN pri lomu oblika I, a K_{IC} njegova kritična vrednost koja predstavlja svojstvo materijala određeno pri RSD. Međutim, na povišenim temperaturama vremenski zavisani rast prsline se može dogoditi i pri vrednostima FIN koji je manji od kritičnog. Ključni uslov za uspostavljanje RSD je dovoljna debljina materijala propisana standardom. Treba primetiti i da sa približavanjem vrhu prsline rastu komponente napona, pa bi za $r \rightarrow 0$ iz jednačine (2.1) napon težio beskonačno velikoj vrednosti što bi dovelo do loma bilo kog materijala. Pošto takva situacija nije moguća materijal će se na vrhu prsline plastično deformisati. Sledi da izrazi za komponente napona zasnovane na teoriji linearne

elastičnosti nisu validne u plastičnoj zoni na vrhu prsline. Zanemarujući stvarnu prirodu plastične zone, linearno elastična mehanika loma (LEML) pruža prihvatljive rezultate za dovoljno male vrednosti napona, kada je veličina plastične zone dovoljno mala u odnosu na dužinu prsline i dimenzije uzorka.

2.2.2. Konturni J -integral

LEML se može uspešno primeniti sve dok je veličina plastične zone na vrhu prsline mala u poređenju sa dužinom prsline. Ovo je obično slučaj kod materijala kod kojih se lom pojavljuje pri naponima koji su znatno ispod napona tečenja i u uslovima RSD. Pri RSN, veličina plastične zone je veća, ali i dalje znatno manja od dužine prsline. U tim uslovima se primenjuje modifikovana LEML (R -krive). [2.21 2.22]. Ukoliko je veličina plastične zone velika u odnosu na dužinu prsline tada LEML više ne važi, već se moraju primeniti metode elasto-plastične mehanike loma (EPML) [2.21].

Za opisivanje lokalnog naponsko-deformacionog polja na vrhu prsline kako u linearno-elastičnom tako i u elastično-plastičnom domenu, Rajs [2.23] je definisao linijski integral za dvodimenzionalni problem u obliku:

$$J = \oint_S W dy - \vec{T}_i \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x} ds \quad (2.4)$$

gde je:

S - proizvoljna zatvorena linija integracije

$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ - gustina energije deformacije gde su σ_{ij} i ε_{ij} tenzori napona i deformacije, sledstveno;

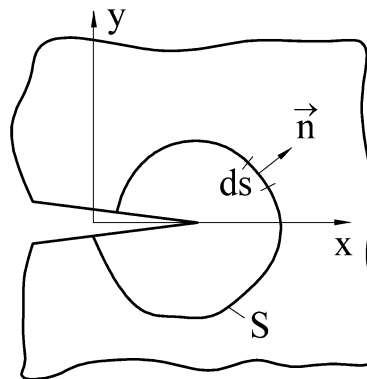
$\vec{T}_i = \sigma_{ij} \vec{n}_j$ - vektor zatezanja na krivoj S ;

\vec{u}_i - vektor pomeranja;

\vec{n}_j - jedinični vektor normalan na krivu S , i

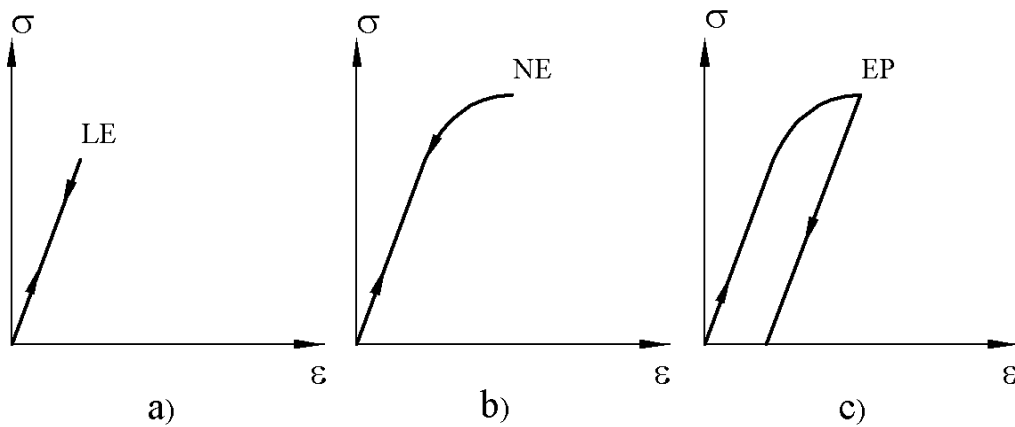
ds - element dužine luka po krivoj S .

S je kontura koja obuhvata vrh prsline i ima početnu i krajnju tačku koje leže na dve površine prsline, sl. 2.6 [2.23]. Integracija po ovoj konturi se vrši u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu. Rajs je takođe pokazao da je vrednost J -integrala nezavisna od izbora konture integracije [2.23]. Vektor zatezanja \vec{T}_i predstavlja napon normalan na krivu integracije S . To znači da kada bi putanja integracije bila postavljena po konturi tela, \vec{T}_i bi predstavljao normalne napone koji deluju na toj istoj konturi [2.23].



Slika 2.6. Kontura integracije konturnog J -integrala [2.24]

Vrednost J -integrala ekvivalentna je brzini oslobađanja energije kroz konturu oko vrha prsline koja napreduje kroz linearno ili nelinearno-elastičan materijal. Zavisnosti napon-relativno izduženje pri jednoosnom zatezanju za linearno-elastično, nelinearno-elastično i elastično-plastično ponašanje materijala, date su na sl. 2.7 [2.23].



Slika 2.7. Zavisnosti σ - ϵ pri jednoosnom zatezanju

a) za linearno-elastično, b) nelinearno-elastično i c) elastično-plastično ponašanje materijala [2.23]

U slučaju linearno-elastičnog materijal brzina oslobađanja energije definisana je izrazom $G = -\frac{d\Pi}{dA}$. I za nelinearno-elastično ponašanje može se koristiti uopšteni izraz (2.5) [2.25]:

$$J(\equiv G) = -\frac{d\Pi}{dA} = -\frac{d(U_a - W_p)}{dA} \quad (2.5)$$

gde je:

Π - potencijalna energija sistema,

U_a - deformaciona energija tela sa prslinom,

W_p - rad spoljašnjih sila,

A - površina prsline.

Grafička interpretacija J -integrala za nelinearno-elastično telo sa prslinom je data na sl. 2.8 [2.23]. U cilju pojednostavljenja, razmatra se ploča konstantne debljine B sa prslinom dužine, a , pri čemu je zavisnost sila-pomeranje na mestu dejstva sile (P - V_p) prikazana na sl. 2.8b. Za slučaj kontrole sile pri rastu prsline je:

$$\Pi = U_a - PV_p = -U_a^* \quad (2.6)$$

U jednačini (2.6) je $U_a^* = \int_0^P V_p dP$ komplementarna deformaciona energija.

Na osnovu jednačine 2.5 dobija se da je [2.22]:

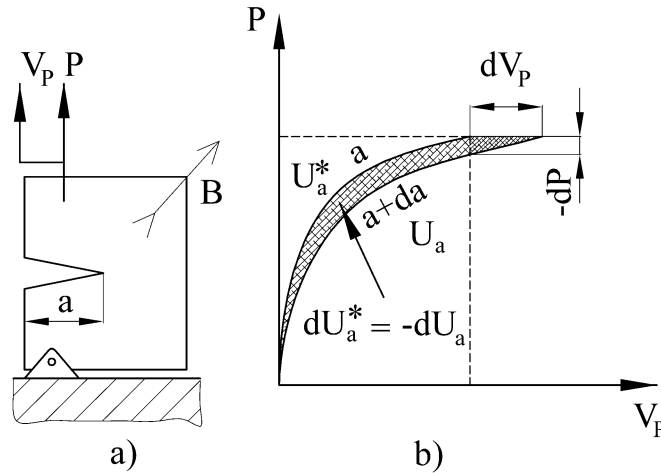
$$J = -\frac{d\Pi}{dA} = -\left(\frac{dU_a^*}{Bda}\right)_P \quad (2.7)$$

Za slučaj fiksiranog pomeranja pri rastu prsline je $W_p = 0$ pa je [2.23]:

$$J = -\frac{d\Pi}{dA} = -\left(\frac{dU_a^*}{Bda}\right)_{V_p} \quad (2.8)$$

Sa sl. 2.8 se vidi da se dU_a^* razlikuje od $-dU_a$ za iznos $\frac{1}{2}dPdV_p$ što je zanemarljivo malo u odnosu na dU_a . Zbog toga je vrednost J -integrala ista za oba razmatrana slučaja.

Kod elastično-plastičnih materijala, pri opterećivanju i rastu prsline, veći deo deformedione energije se apsorbuje u telu. Zbog toga, umesto što definiše energiju koja se oslobađa iz tela pri rastu prsline, J -integral opisuje razliku između apsorbiranih energija tela koja sadrže prsline veoma bliskih dužina.

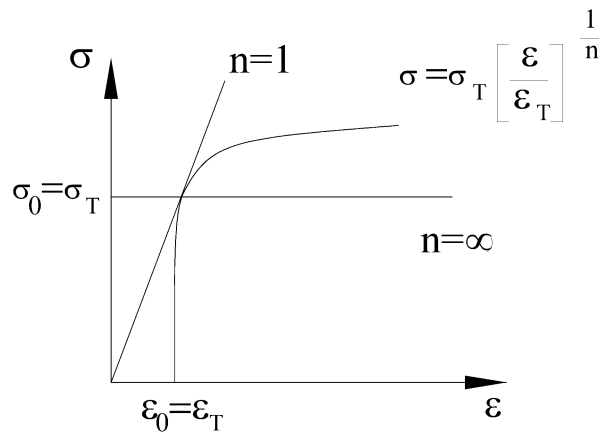


Slika 2.8. Grafička interpretacija J -integrala kao brzine oslobađanja elastične energije za nelinearno-elastično ponašanje tela sa prslinom [2.23]

J -integral osim što predstavlja energetski, predstavlja i parametar intenziteta napona, koji jednoznačno karakteriše polje napona i deformacija u okolini vrha prsline. Hačinson, Rajs i Rozengrin su pretpostavili da pri jednoosnom zatezanju materijal pokazuje stepenu zavisnost između napona i plastične deformacije. Ako se uključe i elastične deformacije, dobija se Ramberg-Osgudov izraz za jednoosnu deformaciju, sl. 2.9 [2.23]:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.9)$$

gde su σ_0 i $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$ vrednosti referentnog napona i deformacije, α je bezdimenziona konstanta, n je eksponent deformacionog ojačavanja.



Slika 2.9. Ramberg-Osgudov model ponašanja materijala koji deformaciono ojačava i za $\sigma_0 = \sigma_T$ [2.22]

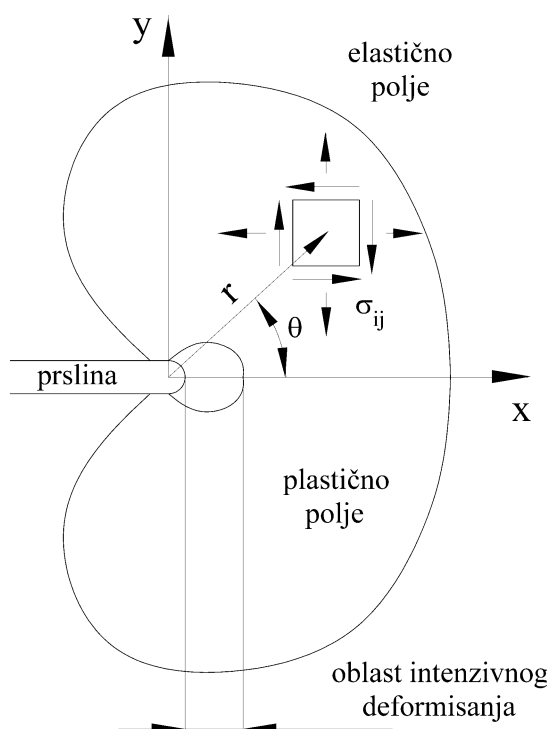
Vrednost referentnog napona može biti proizvoljno odabrana, ali se najčešće usvaja da je to napon na granici tečenja ($\sigma_0 = \sigma_T$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_T = \sigma_T/E$). Nezavisnost J -integrala od putanje integracije je očuvana samo u slučaju da proizvod σ i ε u blizini vrha prsline varira sa $1/r$, tj. ako je [2.23]:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{f(\theta)}{r} \quad (2.10)$$

Na rastojanju veoma bliskom vrhu prsline, znatno unutar plastične zone, elastične deformacije su male u poređenju sa ukupnom deformacijom. Polja napona i deformacija ispred vrha prsline mogu se dati jednačinom (2.11) [2.23]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(r, \theta, n) &= k_1 \left(\frac{J}{r}\right)^{\frac{1}{n+1}} \\ \varepsilon_{ij}(r, \theta, n) &= k_2 \left(\frac{J}{r}\right)^{\frac{1}{n+1}} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

gde su k_1 i k_2 konstante proporcionalnosti koje zavise od karakteristika materijala i naponskog stanja. Za linearno-elastičan materijal je $n = 1$, pa prethodni izraz predviđa singularitet polja napona i deformacija tipa $\frac{1}{\sqrt{r}}$, što je u saglasnosti sa LEML. Raspodela napona i deformacija u okolini vrha prsline, definisana jednačinom (2.11) i šematski prikazana na sl. 2.10, za oblik I opterećenja i za odgovarajuće konturne uslove se u literaturi naziva Hačinson-Rajs-Rozengrinov (HRR) singularitet [2.23].



Slika 2.10. Elastično-plastično polje napona u okolini vrha prsline definisano J -integralom [2.23]

J -integral potpuno opisuje uslove koji vladaju unutar plastične zone na vrhu prsline. Telo oslabljeno prslinom i od materijala koji deformaciono ojačava pri ograničenom, malom, tečenju ima dve singularno-dominantne zone, jednu u elastičnoj oblasti, gde naponi variraju sa $\frac{1}{\sqrt{r}}$, i drugu u plastičnoj oblasti, gde naponi variraju sa $\frac{1}{r^{\frac{1}{n+1}}}$.

2.2.3. Otvaranje vrha prsline (CTOD)

Otvaranje vrha prsline se primenjuje kod materijala niske čvrstoće odnosno niske čvrstoće popuštanja, kod kojih je plastično deformisano područje veliko u poređenju sa veličinom prsline pa se LEML ne može koristiti. [2.26] Na sl. 2.11 je prikazano fizičko značenje otvaranje vrha prsline, δ . Za prolaznu prslinu u neograničenoj ravnomerno zategnutoj ploči i pri RSN je [2.23]:

$$\delta (= \delta_t) = (\delta_a)_{x=a} = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_T} = \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sigma_T} \quad (2.12)$$

pri čemu je usvojen kružni oblik plastične zone veličine r_{1p}^* . Ukoliko se pretpostavi Dagdejllov model plastičnog tečenja, otvaranje vrha prsline se može izraziti jednačinom (2.13) [2.23]:

$$\delta (= \delta_t) = \frac{K^2}{E\sigma_T} = \frac{G}{\sigma_T} \quad (2.13)$$

što je neznatno manje od vrednosti određene jednačinom (2.12).

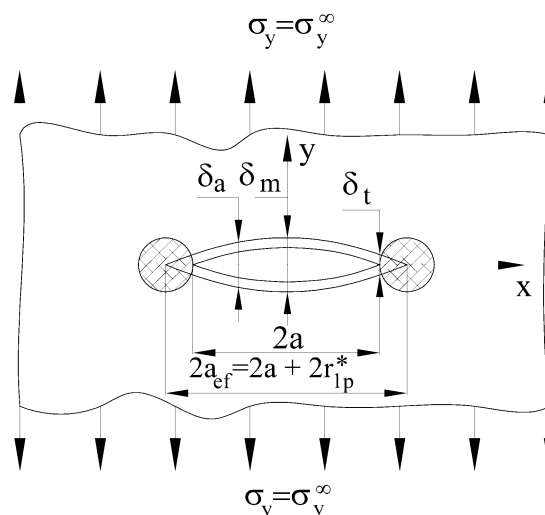
Veza između δ i G odnosno K u oblasti važenja linearno elastične mehanike loma može se napisati u obliku [2.20]:

$$\delta = \frac{K^2}{mE\sigma_T} = \frac{G}{m\sigma_T} \quad (2.14)$$

gde je m bezdimenzioni faktor u funkciji stanja napona i ponašanja materijala i ima vrednosti između 1,15 za RSN i 2,95 za RSD [2.23].

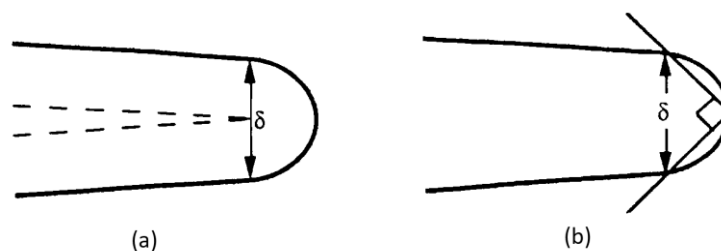
Na veoma žilave materijale se ne može primeniti LEML. Kod njih, pojavi rasta prsline prethodi znatna plastična deformacija. U ovakvim slučajevima postoji veza J i δ u obliku datom jednačinom (2.15):

$$J = \sigma_T \delta \quad (2.15)$$



Slika 2.11. Efektivno otvaranje prsline δ_a i otvaranje vrha prsline δ_t za ravnomerno zategnutu ploču sa središnjom prolaznom prslinom [2.23]

Pomeranje otvora vrha prsline, *CTOD*, odnosno δ , uveo je Wells kao iskustveni parametar koji može da se primeniti u elasto-plastičnoj oblasti ponašanja materijala, ali je posebno značajan za oblast velikih deformacija i pojavu globalnog plastičnog tečenja. *CTOD* ima geometrijski karakter i uzima u obzir zaobljavanje samog vrha prsline, sl. 2.12. Zaobljavanjem oštrog vrha prsline singularitet napona se ublažava. Najefikasnija primena parametra *CTOD* se postiže u proračunima koji se baziraju na metodi konačnih elemenata (MKE).



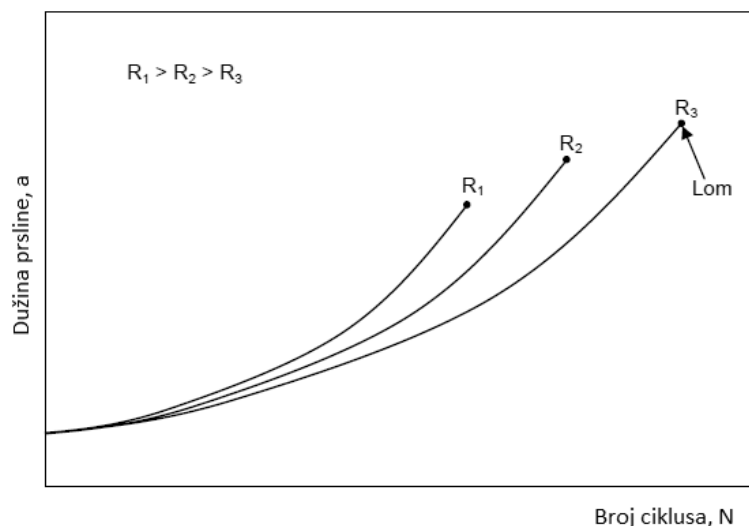
Slika 2.12. Otvaranje vrha prsline

Osnovni problem pri određivanju *CTOD* je nedostatak jedinstvene definicije ovog parametra. Praksa je pokazala da je najpogodnija definicija, osim geometrijskih tumačenja datih na sl. 2.11, ona koju su dali Švalbe i saradnici, po kojoj se *CTOD* određuje kao pomeranje tačke udaljene 5 mm od vrha prsline u pravcu normalnom na ravan prsline. Ova definicija je posebno pogodna za eksperimentalno određivanje *CTOD*, pa je poznata i kao parametar δ_s , ali nema nikakvih prepreka da se na osnovu vrednosti pomeranja izračunatih MKE odredi *CTOD*. Druge dve često i uspešno korišćene definicije *CTOD* su prikazane na sl. 2.12. Prva definiše *CTOD* kao rastojanje između dve tačke koje leže na vertikali povučenoj kroz početni položaj vrha prsline, sl. 2.12a, a druga kao rastojanje tačaka dobijenih u preseku linija pod uglom od 45° od tačke fiktivnog vrha zaobljene prsline, sl. 2.12b. U oba slučaja tačke koje definišu *CTOD* leže na deformisanoj konturi prsline.

2.2.4. Brzina rasta zamorne prsline da/dN

Zamor je strukturna promena koja se dešava u materijalima izloženim ponovljenim ili periodično promenljivim deformacijama pri delovanju nominalnih napona čije su maksimalne vrednosti manje od napona tečenja materijala pri statičkom opterećenju. Kao posledica zamora materijala mogu se javiti prsline, i posle dovoljnog broja promene opterećenja, može da nastupi lom konstrukcije [2.27].

Na sl. 2.13 prikazana je promena dužine prsline, a , sa promenom broja ciklusa, N , sa tri nivoa gornjeg napona R_g ($R_1 > R_2 > R_3$) pri donjem naponu $R_d = 0$, pri čemu je svaka epruveta imala istu početnu dužinu prsline, a_0 .

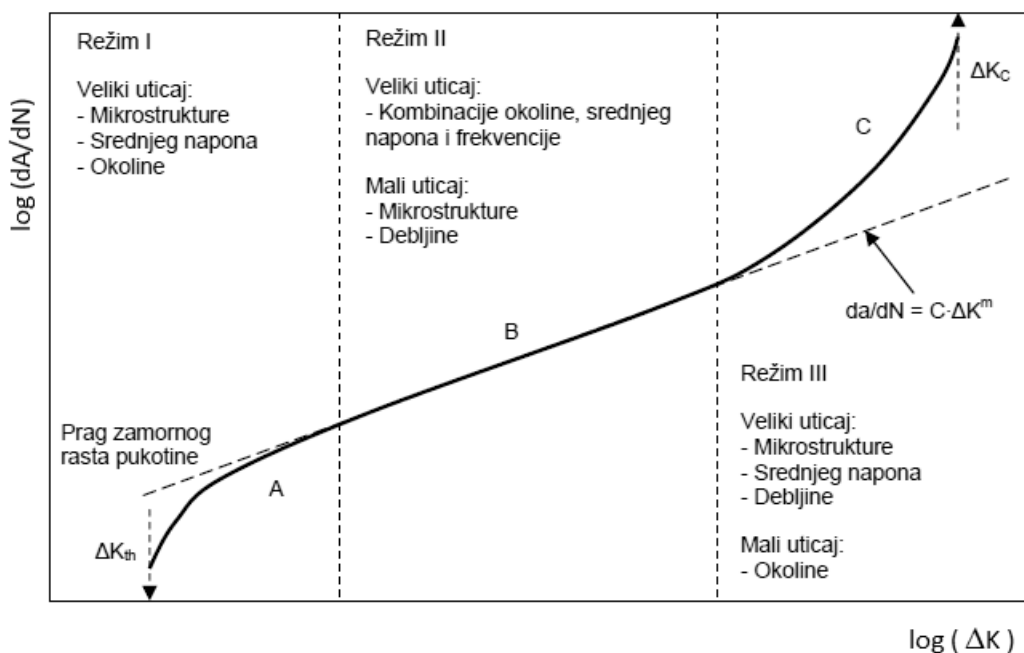


Slika 2.13. Zavisnost dužine zamorne prsline od broja ciklusa [2.27]

Sa sl. 2.13 se vidi da prslina brže raste pri naponu višeg nivoa i da pri tom dolazi do loma pri manjem broju ciklusa. Na osnovu toga možemo zaključiti da vek konstrukcije zavisi od toga da li material ima početnu prslinu ili je nema, od veličine napona i otpornosti materijala prema lomu.

Mehanika loma povezuje dužinu prsline, a , intezitet nazivnog napona, R , i otpornost materijala iskazanu veličinom FIN , K , pa se može proceniti brzina rasta prsline u vidu prireštaja prsline po ciklusu opterećenja, da/dN .

Ispitivanja rasta prsline se pretežno izvode na pljosnatim epruvetama. Na epruveti se mašinski izrađuje zarez da bi se prslina inicirala dobila na željenom mestu. Pri ispitivanju, dužina prsline, a , se posmatra u funkciji od broja ciklusa, N , i određuje se brzina rasta prsline, da/dN , diferenciranjem $a-N$ krive tačku po tačku. Ta veličina se poredi sa definisanim opsegom FIN , ΔK , zbog toga što je rast zamornih prsline uglavnom određen plastičnom deformacijom oko vrha prsline pri promenljivom opterećenju, koje zavisi od opsega FIN , sl. 2.14.



Slika 2.14. Brzina rasta zamorne prsline u zavisnosti od ΔK [2.28]

Analiza stanja napona i deformacija na vrhu rastuće prsline postupcima LEML je dovela do formulisanja Parisove jednačine za sve metale i legure, koja dovodi u vezu brzinu rasta zamorne prsline da/dN sa opsegom FIN ΔK na vrhu prsline [2.29-2.31].

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2.16)$$

U jednačini (2.16) su:

ΔK - opseg vrednosti FIN i

C i m – konstante koje zavise od uslova sredine, materijala i uslova ispitivanja.

Zavisnost da/dN od ΔK u (\log - \log) koordinatnom sistemu se iskazuje krivom S oblika, sl. 2.14 [2.27, 2.28]. Kriva se asimptotski približava granicama rasta prsline ΔK_{th} i ΔK_c . U srednjem području krive, režim II, važi Parisova zavisnost. Prag opsega inteziteta napona, odnosno prag zamora, ΔK_{th} , je granična vrednost ispod koje zamorna prslina nema uslova za rast, režim I, a ΔK_c je kritični intezitet napona pri kojem dolazi do loma $K = K_c$, režim III.

Parisova jednačina ne važi u čitavom području, ali veliki linearni srednji deo krive koji je pokriven Parisovom jednačinom se pokazao daleko najvažnijim jer se istovremeno dopušta da se napravi razlika između nastanka i rasta zamorne prsline.

Iz oštih koncentratora napona će, u uslovima promenljivog opterećenja, posle određenog broja ciklusa početi da se stvara prslina, a ukoliko se prekorači prag zamora ΔK_{th} , prslina će da napreduje. Teorijski, konstrukcija pod određenim uslovima neće biti ugrožena dok prslina ne dostigne svoju kritičnu veličinu, tako da se može, uz prethodne analize, dopustiti eksploatacija konstrukcije sa prslinom čak i u periodu njenog rasta.

Poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od delujućeg opterećenja je jako bitno pri donošenju odluke o daljoj eksploataciji. Standard ASTM E647, [2.33], propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline, da/dN , koja se razvija iz postojeće prsline i proračunatog opsega faktora inteziteta napona, ΔK .

2.3. Primena MKE u mehanici loma i oštećenja

Analiza konačnim elementima je numerička metoda koja omogućava da se dođe do rešenja matematički zahtevnih problema. Ova metoda koristi fizičku diskretizaciju domena, što znači da se složene prostorne konstrukcije u proračunima posmatraju kao diskretni sistemi. Razvoj savremenih inženjerskih konstrukcija zahteva vrlo precizne proračune kojima će se omogućiti smanjenje težine konstrukcije uz nepromenjenu ili čak povećanu nosivost i obezbeđenu sigurnost.

Konačni element je definisan svojim oblikom, brojem i položajem pripadajućih čvorova. Model sačinjen od međusobno povezanih elemenata konačnih dimenzija se definiše sistemom diferencijalnih jednačina i odgovarajućim konturnim uslovima. Konačni elementi su međusobno povezani spoljašnjim čvornim tačkama i na taj način se obezbeđuje neprekidnost polja pomeranja. Proračun MKE počinje diskretizacijom koja se sastoji od izbora funkcija oblika elemenata i izbora usitnjenosti mreže konačnih elemenata, tzv. finoće mreže.

Primena metode konačnih elemenata-MKE je od posebne važnosti u oblasti mehanike loma. Ova metoda je dala značajan doprinos kod projektovanja nosećih elemenata složenih geometrijskih formi. Moguće je odrediti radni vek konstrukcije na osnovu unapred definisane geometrije konstrukcije, mehaničkih karakteristika primenjenog materijala, položaja, geometrije i dimenzije inicijalne prsline. Modeliranje prsline korišćenjem metode konačnih elemenata je efikasno i jeftino, ali i problematično sa aspekta potrebnih resursa (procesorske snage) i tačnosti rezultata koja zavisi od mreže elemenata koja je formirana. Svaki novi front prsline iziskuje generisanje nove mreže konačnih elemenata, što komplikuje već poprilično složenu postojeću strukturu mreže. Potrebno je dakle ponovno generisanje mreže u okolini vrha prsline, kao i njeno usitnjavanje da bi dobili što preciznije rezultate. Redefinisanje mreže se vrši od strane korisnika softvera, što znači da je potreban visok nivo znanja i profesionalizma onog koji mrežu elemenata formira. [2.34, 2.35].

MKE se često koristi za proračun konstrukcija u prisustvu prsline. U EPML, usled nelinearnog ponašanja materijala, ne može se doći do rešenja u zatvorenom obliku, pa se pored eksperimentalnih istraživanja korišćenje MKE u ovoj oblasti smatra veoma bitnim delom procedure [2.36].

2.3.1. ANSYS - Komercijalni softverski alat za MKE

ANSYS je jedan od najpoznatijih komercijalnih softvera za analizu konstrukcija korišćenjem MKE. Koristi se u rešavanju mašinskih i građevinskih problema, pa čak i kod složenih biomedicinskih analiza kod kojih se koriste inženjerske metode. Pored toga što korisnicima nudi veliki broj tipova analiza, ANSYS poseduje i moćne alatke za trodimenzionalno (3D) modeliranje konstrukcija.

Nakon što se definiše geometrija modela, ona se dalje deli na konačne elemente koji čine mrežu konačnih elemenata. Kvalitet i gustina mreže konačnih elemenata utiče na tačnost rezultata metode: što je veći broj čvorova i elemenata to se mogu očekivati tačnija rešenja.

Kada je numerički model definisan i kada je generisana mreža konačnih elemenata, sledeći korak je definisanje osobina materijala, tj. numeričkom modelu treba dodeliti iste one osobine materijala od koga je napravljen njegov realni fizički ekvivalent.

Nakon toga je potrebno definisati opterećenje i granične uslove. Svaka primena opterećenja u MKE podrazumeva definisanje sledećih komponenti: intenziteta, pravca i smera dejstva, raspodele i vremenske promene opterećenja. Zatim je neophodno definisati stepen slobode kretanja čvornih tačaka na graničnim linijama/površinama modela. Potrebno je definisati i kako je model oslonjen. Najčešće se koriste sledeći tipovi oslonaca:

- uklještenja (onemogućene su i translacija i rotacija),
- nepokretni oslonci (onemogućena je translacija, rotacije je moguća),
- pokretni oslonci (onemogućena translacija samo u jednom pravcu, rotacija moguća) i

- oslonci sa ograničenim translatorskim pomeranjem (tzv. elastični oslonci) [2.37].

Ceo postupak metode konačnih elemenata se, dakle, može podeliti u sedam faza:

- ✓ Modeliranje
- ✓ Izbor interpolacionih 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

Modeliranje ili diskretizacija - vrši se izbor broja, dimenzije, vrste i veličine konačnih elemenata, i za svaki element je potrebno definisati granične uslove kao što je stepen slobode, tj. pravci u kojima je kretanje dozvoljeno ili onemogućeno. Finija mreža treba da bude na mestima gde se očekuju najveće koncentracije naprezanja da bi se što preciznije pokazalo ponašanje pri maksimalnim opterećenjima. Elementi većih dimenzija se biraju na mestima koja nisu od velikog značaja pri analizi i time se smanjuje ukupan broj elemenata i samim tim i pojednostavljuje proračun. Među susednim elementima ne sme biti prevelike razlike u veličini, i to je nešto o čemu treba voditi računa. Oblik elemenata zavisi od geometrije modela. Kod složenijih modela primenjuju se konačni elementi sa većim brojem čvorova. Granični uslovi se definišu po pomeranju i po naponu. Oni definišu stepene slobode svakog čvora tj. ograničavaju njegova pomeranja po odgovarajućim osama.

Interpolacioni modeli - definišu se interpolacijske funkcije kojima će biti opisano ponašanje numeričkog modela. Polinomske funkcije mogu biti različitog stepena; međutim, primena funkcija sa stepenom većim od 2 nije praktična zbog dugotrajnog i komplikovanog proračuna.

Matrica krutosti i vektor opterećenja - definišu se prvo na lokalnom nivou, zasebno za svaki element, pa zatim globalno za ceo model. Matrica krutosti je simetrična, pozitivno definisana i singularna, i njeni elementi predstavljaju opterećenja u svakom čvoru prouzrokovano pomeranjem. Vektor opterećenja se definiše u čvorovima elementa kao koncentrisano, površinsko ili zapreminsko opterećenje. Može se odrediti primenom direktnih metoda, preko definisanja sila u čvoru na osnovu jediničnog pomeranja, pomoću varijacionih metoda koje su zasnovane na određivanju energije deformacije i preko diferencijalnih jednačina.

Određivanje nepoznatih pomeranja – određuje se pomeranje u čvorovima, na osnovu kojih se formira polje pomeranja za ceo model. Nakon definisanja opterećenja i graničnih uslova, pomeranja se proračunavaju rešavanjem sistema jednačina. Na osnovu dobijenog polja pomeranja se određuju deformacije i naponi, takođe prvo na lokalnom nivou pa na globalnom.

Određivanje polja deformacija i napona – obuhvata određivanje napona i deformacija za sve čvorove i formiranje odgovarajućih polja na globalnom nivou, čime se dobijaju konačni rezultati. U zavisnosti od tačnosti proračuna, rezultati se usvajaju kao merodavni ili se postupak ponavlja sa izmenama pri određenim koracima.

Za potrebe istraživanja predstavljenog u ovoj disertaciji, modeli epruveta su kreirani u CATIA v5 softveru i zatim uvezeni u ANSYS u kome je računata vrednost J -integrala i simuliran rast zamorne prsline. Radovi [2.38-2.42] su bili osnova za ono što je u ovoj disertaciji urađeno vezano za numeričke simulacije MKE.

2.3.2. Numeričko određivanje J -integrala

MKE se može primeniti na određivanje FIN koji se naziva i *integral interakcije*. Integral interakcije suštinski predstavlja proširen J -integral koji je preveden u površinski integral i to ga čini pogodnijim za simulaciju konačnim elementima. [2.43-2.52].

U slučaju dvodimenzionalnih problema primenjuje se integracija površine dok se za trodimenzionalne probleme koristi integracija zapremine. Integrali površine i zapremine nude mnogo bolju tačnost od konturnog/površinskog integrala i mnogo su lakši za primenu.

Za dvodimenzionalni problem, izraz domena za brzinu oslobađanja energije je dat izrazom (2.17) [2.53]:

$$J = \int_A \left[\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right] \frac{\partial q_1}{\partial x_i} dA + \int_A \alpha \sigma_{ii} \frac{\partial \theta}{\partial x_1} q_1 dA - \int_A \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}^0}{\partial x_1} q_1 dA - \int_C t_i u_{i,1} q_1 dC \quad (2.17)$$

Veličine u izrazu (2.17) su:

σ_{ij} – tenzor napona,

u_j – vektor pomeranja,

W – gustina energije deformacije,

δ_{ii} – Kronecker delta,

x_i – lokalna koordinatna osa,

q – vektor povećanja dužine prsline,

α – koeficijent termičkog širenja,

θ – temperatura,

ε_{ij}^0 – početni tenzor deformacije,

t_i – zatezna sila na površi prsline,

A – domen integracije, i

C – površina prsline na koju deluje zatezna sila.

U slučaju odsustva termičkih deformacija i zatezne sile na površini prsline, jednačina (2.17) se pojednostavljuje i svodi na oblik (2.18):

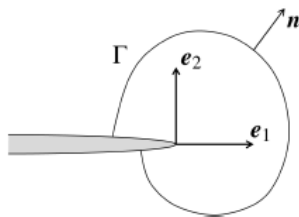
$$J = \int_A \left\{ \left[\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right] \frac{\partial q_1}{\partial x_i} - \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}^0}{\partial x_1} q_1 \right\} dA \quad (2.18)$$

U odsustvu početnog tenzora deformacije jednačina (2.18) se svodi na izraz (2.19):

$$J = \int_A \left\{ \left[\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right] \frac{\partial q_1}{\partial x_i} \right\} dA \quad (2.19)$$

Slično nezavisnosti J -integrala od putanje, jednačina (2.19) pokazuje nezavisnost i od domena, tj. nezavisnost procene vrednosti J -integrala od izbora domena koji obično diktira generisana mreža konačnih elemenata. U slučaju kada su sva potencijalna opterećenja prisutna (sile koje deluju na telo, termička deformacija i zatezanje površine prsline), a da bi se mogla koristiti jednačina (2.19), domen mora uključiti samo usku oblast oko vrha prsline.

Pravac vektora proširenja prsline \vec{q} definisan je x -osom lokalnog koordinatnog sistema u vrhu prsline (vektor \vec{e}_1 na sl. 2.15). Vektor \vec{q} je nula vektor u svim čvorovima duž konture Γ , dok je njegova vrednost jednaka 1 u svim čvorovima unutar konture Γ izuzev središnjih čvorova direktno povezanih sa Γ . U Ansys Workbench-u se čvorovi sa jediničnim \vec{q} vektorom nazivaju *VCE čvorovi*. Oni su najvažniji ulaz potreban za uspešnu evaluaciju J -integrala.



Slika 2.15. Kontura Γ i koordinatni sistem u vrhu prsline

Za dvodimenzionalni problem prsline, komponenta čvora vrha prsline obično sadrži jedan čvor i prva kontura za oblast integracije se procenjuje preko elemenata povezanih sa komponentom čvora vrha prsline. U sledećem koraku, nova oblast integracije se formira preko konačnih elemenata koji su susedni elementima u prvoj konturi, i tako redom. Važno je, zbog tačnosti, da elementi unutar konture integracije nikada ne dođu do spoljne granice FE modela. Štaviše, proračuni loma se oslanjaju na redosled povezivanja čvorova elemenata; stoga je važno u Ansys Workbench-u zadržati srednje čvorove u čvornoj povezanosti elemenata za elemente višeg reda.

2.3.3. Rast zamorne prsline da/dN

Najčešće primenjivan model rasta zamorne prsline da/dN je definisan Paris-ovom jednačinom koja predstavlja eksponencijalnu funkciju oblika:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.20)$$

U dvostrukim logaritamskim koordinatama jednačina (2.20) postaje linearna funkcija (2.21):

$$\log(da/dN) = \log C + n \log \Delta K \quad (2.21)$$

gde je n nagib funkcije.

Predviđanje rasta zamorne prsline je moguće uz dva tipa informacija:

1. Podatka o rastu prsline $da/dN = f_R(K)$, koji predstavlja otpornost materijala na rast prsline, i
2. Vrednostima FIN-a u funkciji dužine prsline u konstrukciji $K(a)$.

Broj ciklusa potreban za inkrementalno širenje prsline Δa_i pri dužini prsline a_i se može dobiti pomoću izraza (2.22):

$$\Delta Ni = \frac{\Delta a_i}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{a=a_i}} \quad (2.22)$$

dok se broj ciklusa potreban za proširenje prsline od početne a_0 do krajnje a_f dobija integracijom jednačine (2.22):

$$N_{a_0 \rightarrow a_f} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f_R(\Delta K)} \quad (2.23)$$

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.1. Uvod

Praktičnoj primeni konstrukcija izrađenih od legiranih čelika za rad na povišenim temperaturama kao što su parovodi, kotlovi, posude pod pritiskom, i sl., prethodi detaljno proučavanje njihovih mehaničkih i eksploatacijskih osobina. Kao polazni podatak o kvalitetu i primenljivosti ovih čelika služe osobine koje se dobijaju na osnovu mikrostrukturnih i mehaničkih ispitivanja. Ove osobine opisuju globalno ponašanje svih metalnih materijala pa tako i legiranih čelika. Dopunski podaci o ponašanju ovih čelika se dobijaju udarnim ispitivanjem (energija loma epruvete sa zarezom), ali se ta osobina koristi samo kao uporedna veličina pri izboru materijala i ne može se direktno koristiti za proračun napona. Ona opisuje lokalno ponašanje materijala na koje utiče koncentracija napona u vidu zareza.

Identifikacije kvaliteta i pouzdanosti materijala izloženog delovanju povišenih temperatura u termoenergetskim postrojenjima, dobijena je ispitivanjem mikrostrukture i mehaničkih i eksploatacijskih osobina legiranog čelika za rad na povišenim temperaturama namenjenog za izradu parovoda termoenergetskih postrojenja Elektroprivrede Srbije. Ovaj i njemu slični čelici različitih proizvođača su u značajnom udelu ugrađeni u parovode termoelektrana Elektroprivrede Srbije. Da bi stekli kompletnu sliku o ponašanju materijala pri delovanju visokog pritiska i povišene temperature konkretne komponente jednog termoenergetskog postrojenja, neophodno je raspolagati osobinama materijala u trenutku ugradnje kao i sledećim podacima koji se prikupljaju tokom radnog veka i to o:

- geometrijskim osobinama komponente (dimenzije parovoda – podaci o prečniku cevi, debljini zida i ovalnosti);
- radnim parametrima pare koje treba automatski prikupljati (pritisak, temperatura, temperturne razlike, broj startovanja/isključivanja itd.);
- pogonskim uslovima (osnovno opterećenje, najveće opterećenje) i
- položaju komponente u konkretnom postrojenju s obzirom na lokalni karakter procesa puzanja.

U ispitivanja sa razaranjem pored određivanja mikrostrukture i mehaničkih osobina i energije udara, spada i određivanje parametara mehanike loma. Metode ispitivanja sa razaranjem se koriste za direktnu procenu osobina materijala posle određenog perioda eksploatacije, što je preduslov za određivanje preostalog radnog veka komponente.

Uticaj radne temperature na mikrostrukturu, mehaničke osobine i parametre mehanike loma ispitivanog materijala za rad na povišenim temperaturama, analiziran je ispitivanjem novog materijala koji tek treba da se ugradi. Ispitivanja materijala od koga je izrađena cev su obuhvatila:

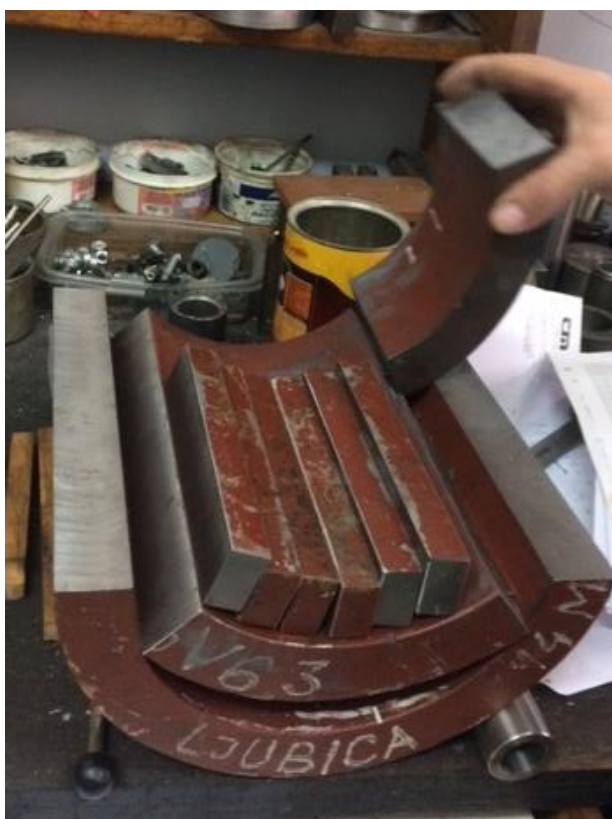
- određivanje hemijskog sastava;
- merenje tvrdoće;
- metalografska ispitivanja;
- određivanje zateznih osobina na sobnoj i na radnoj temperaturi;
- određivanje udarnih osobina na sobnoj i na radnoj temperaturi na instrumentiranom Šarpijevom klatnu;
- određivanje parametara elasto-plastične mehanike loma, odnosno određivanje kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} , na sobnoj i na radnoj temperaturi i
- određivanje parametara rasta zamorne prsline na sobnoj i na radnoj temperaturi.

3.2. Materijal

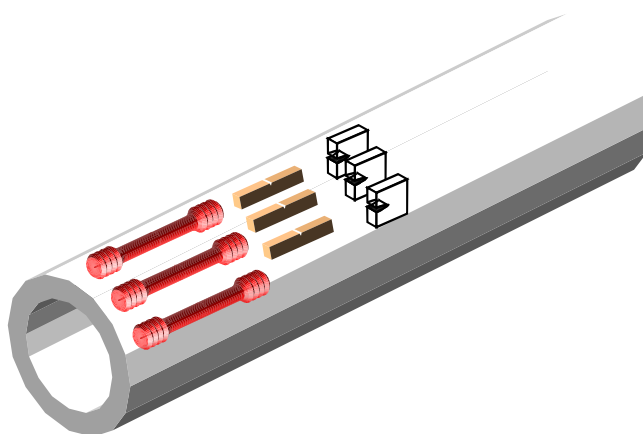
Istraživanja koja su predmet analize ove doktorske teze urađena su na novoj cevi spoljašnjeg prečnika $\varnothing 270\text{ mm}$ dužine 275 mm i debljine zida $\approx 34\text{ mm}$, dobijenoj iz termoelektrane Nikola Tesla B, sl. 3.1. (a). Na osnovu programa eksperimentalnih ispitivanja definisana je šema vađenja epruveta, sl. 3.1. (b). Epruvete su uzorkovane u uzdužnom (L-) i poprečnom (T-) pravcu u odnosu na pravac valjanja.

Uz cev nije bila dostavljena i atestna dokumentacija o materijalu, samo je rečeno da je reč o čeliku namenjenom za rad na povišenim temperaturama za koji smatraju da je po svojim osobinama najpribližniji legiranom čeliku čija je oznaka 14 MoV6-3 prema DIN 17175 standardu, što odgovara staroj domaćoj oznaci čelika Č 7830 prema standardu SRPS C.B0.002 iz 1986. godine.

Prema podacima iz standarda [3.1, 3.2], propisan hemijski sastav čelika 14 MoV 6-3, prikazan je u tabeli 3.1, propisane mehaničke osobine na sobnoj temperaturi u tabeli 3.2 i minimalne propisane vrednosti konvencionalnog napona tečenja $R_{p0,2}$ na povišenim temperaturama u tabeli 3.3.



(a)



(b)

Slika 3.1. (a) Slika cevi i (b) plan uzorkovanja epruveta iz cevi

Tabela 3.1. Propisan hemijski sastav legiranog čelika 14 MoV 6-3 prema [3.1,3.2], % mase

Standard	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo	Ni	V
SRPSEN 10216	0,10-0,15	0,15-0,35	0,40-0,70	0,025	0,020	0,30-0,60	0,50-0,70	$\leq 0,30$	0,22-0,28
DIN17175	0,10-0,18	0,10-0,35	0,40-0,70	0,035	0,035	0,30-0,60	0,50-0,70		0,22-0,32

Tabela 3.2. Propisane mehaničke osobine čelika 14 MoV 6 3 na sobnoj temperaturi [3.1, 3.2]

Klasa čelika		Standard	Zatezna čvrstoća <i>MPa</i>	Napon tečenja ^{1), 2)} za debljine zida u <i>mm</i> , <i>MPa</i>			Izduženje pri lomu ($L_0=5 \cdot d_0$), % minimalno		Energija udara, <i>J</i> minimalno	
				minimalno						
osnovna oznaka	brojčana oznaka			≤16	>16≤40	>40≤60	u*	p**	u*	p**
14MoV6 3	1.7715	SRPS EN 10216	460-610	320			20	18	40	27
		DIN 17175	460-610	320	320	310	20	18		41

1) za cevi spoljašnjeg prečnika ≤ 30 mm i debljine zida ≤ 3 mm, minimalne vrednosti su za 10 MPa niže.

2) za debljine zida > 60 mm, vrednosti za cevi se usaglašavaju.

u* – uzdužno na pravac valjanja; p** – poprečno na pravac valjanja

Tabela 3.3. Najmanji konvencionalni napon tečenja $R_{p0,2}$ čelika 14 MoV 6 3 na povišenoj temperaturi [3.1, 3.2]

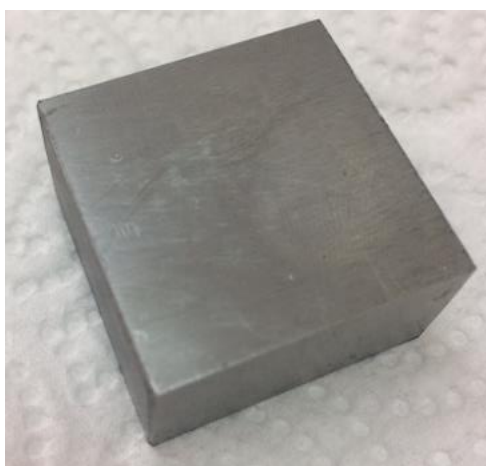
Standard	Debljina zida, <i>mm</i>	Granica tečenja 0,2% u <i>MPa</i> na povišenim radnim temperaturama u $^{\circ}\text{C}$									
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
SRPS EN 10216	≤60	282	276	267	241	225	216	209	203	200	197
DIN 17175	≤40			270	255	230	215	200	185	170	
	$40 < s \leq 60$ ¹⁾			260	245	220	205	190	175	160	

1) Za cevi čija je debljina veća od 60 mm, vrednosti se usaglašavaju.

3.2.1. Ispitivanje hemijskog sastava materijala cevi

Ispitivanje hemijskog sastava materijala urađeno je na uzorcima dimenzija 100 x 100 x 10 mm izvađenom iz cevi, sl. 3.2, u tri referentne akreditovane laboratorije:

1. Železara HBIS GROUP Serbia u Smederevu;
2. Institut za ispitivanje materijala IMS u Beogradu i
3. Vojnotehnički institut u Žarkovu.



Slika 3.2. Uzorak izvađen iz cevi za hemijsku analizu

Rezultati uporednih ispitivanja hemijskog sastava ispitivanog čelika prikazani su u tabeli 3.4.

U laboratoriji smederevske železare hemijski sastav je određen metodom optičke emisione spektrometrije (OES), na uređaju ARL 4460, prema standardu [3.3]. U laboratoriji IMS identifikacija materijala urađena je sa CRM, dok je u laboratoriji VTI takođe metodom OES, ispitivanje urađeno na uređaju BELEC COMBACD BORP.

Tabela 3.4. Rezultai uporednih hemijskih analiza uzoraka cevi, % mase

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	B	Sn	N	Pb
HBIS	0,1215	0,3745	0,6478	0,0055	0,0117	0,0728	0,006	1,042	0,2429	0,280	0,1616	0,002	0,003	0,010	0,0151	0,00	0,0048	0,0057	0,004
IMS	0,120	0,315	0,657	0,004	0,012	0,069	0,013	1,076	0,241	0,295	0,182	0,002	0,008	0,002	0,003	0,0002	0,005	0,000	0,003
VTI	0,104	0,337	0,625	0,008	0,005	0,076	0,004	1,001	0,239	0,278	0,171	0,001	0,010	0,001	0,001	0,000	0,005	0,006	<0,001

Analizirajući dobijene rezultate hemijske analize može se konstatovati da je hemijski sastav ispitivanog čelika najpribližniji legiranom čeliku za rad na povišenim temperaturama oznake 16 CrMo 4. Deklarisani hemijski sastav legiranog čelika za rad na povišenim temperaturama oznake 16 CrMo 4 je dat u tab. 3.5.

Tabela 3.5. Deklarisani hemijski sastav legiranog čelika oznake 16 CrMo 4

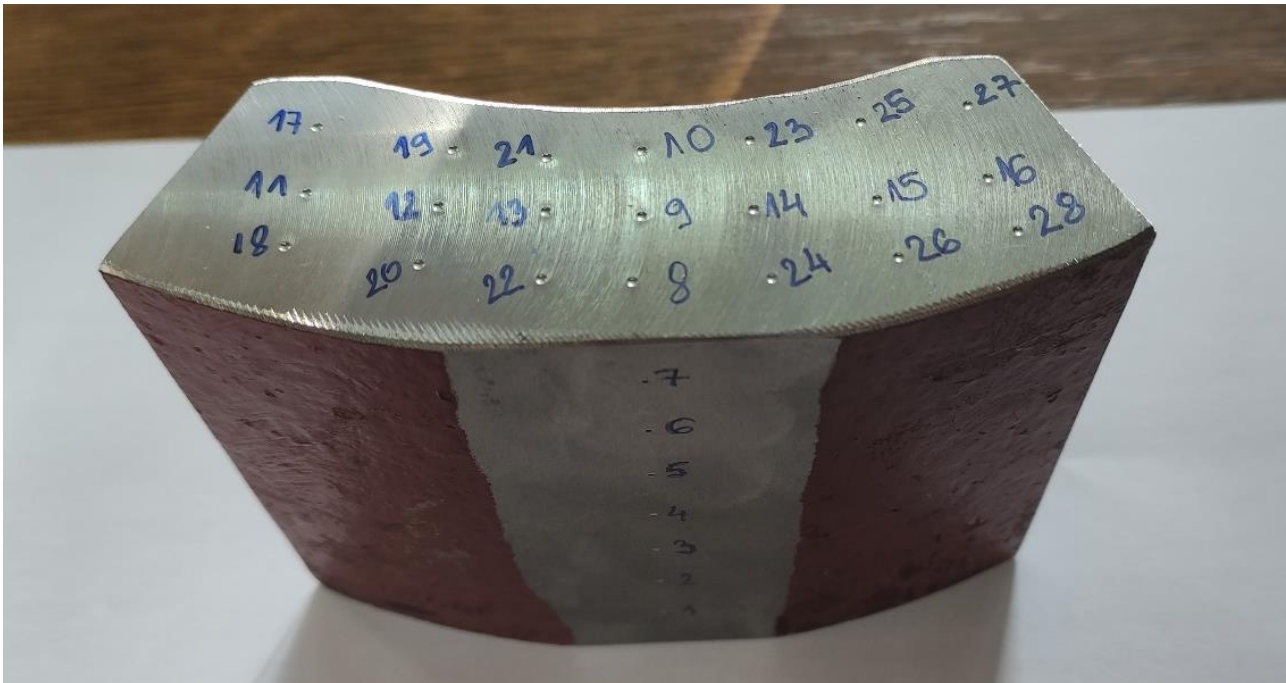
% mas.									
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	
0.13-0.20	0.15-0.35	0.50-0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	0.90-1.20	≤ 0.40	0.20-0.30	-	

Jedino odstupanje se ogleda u prisustvu vanadjijuma, što navodi na konstataciju da se radi o niskolegiranom CrMo čeliku za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranom vanadjijumom [3.4].

3.3 Merenje tvrdoće

Jedna od metoda za procenu integriteta i preostalog veka visokotemperaturnih parovodnih i kotlovskih komponenata izloženih puzanju, zasnovana je na merenju površinske tvrdoće koja pruža indirektnu informaciju o stanju materijala komponenata koje se koriste za rad na povišenim temperaturama. Iako se merenje tvrdoće uobičajeno primenjuje u toku održavanja parovodnih i kotlovskih postrojenja, posebno u kombinaciji sa replikama, većina objavljenih studija je zasnovana na laboratorijskim merenjima obavljenim na ispitnim uzorcima sa standardnim metodama merenja tvrdoće.

Tvrdoća ispitivanog uzorka čelika za rad na povišenim temperaturama je izmerena metodom po Brinelu, silom utiskivanja od 294,2 N (HB30), vreme utiskivanja 10 s. Tvrdoća je merena na spoljašnjoj površini cevi i to 10 mm poprečno ispod spoljašnje površine cevi, zatim u sredini poprečnog preseka cevi, te 10 mm poprečno iznad unutrašnje površine cevi parovoda, sl. 3.3. Korišćena je metoda ispitivanja tvrdoće po Brinelu prema standardu [3.5]. Iz dostavljenog uzorka cevi je isečen uzorak pune debljine cevi, a mesta merenja na dostavljenom uzorku cevi su pokazana na sl. 3.3.



Slika 3.3. Mesta za merenje tvrdoće na uzorku cevi

Univerzalni tvrdomer na kome je merena tvrdoća laboratoriji VTI, prikazan je na sl. 3.4. Rezultati merenja tvrdoće prikazani su u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Rezultati merenja tvrdoće na dostavljenom uzorku cevi

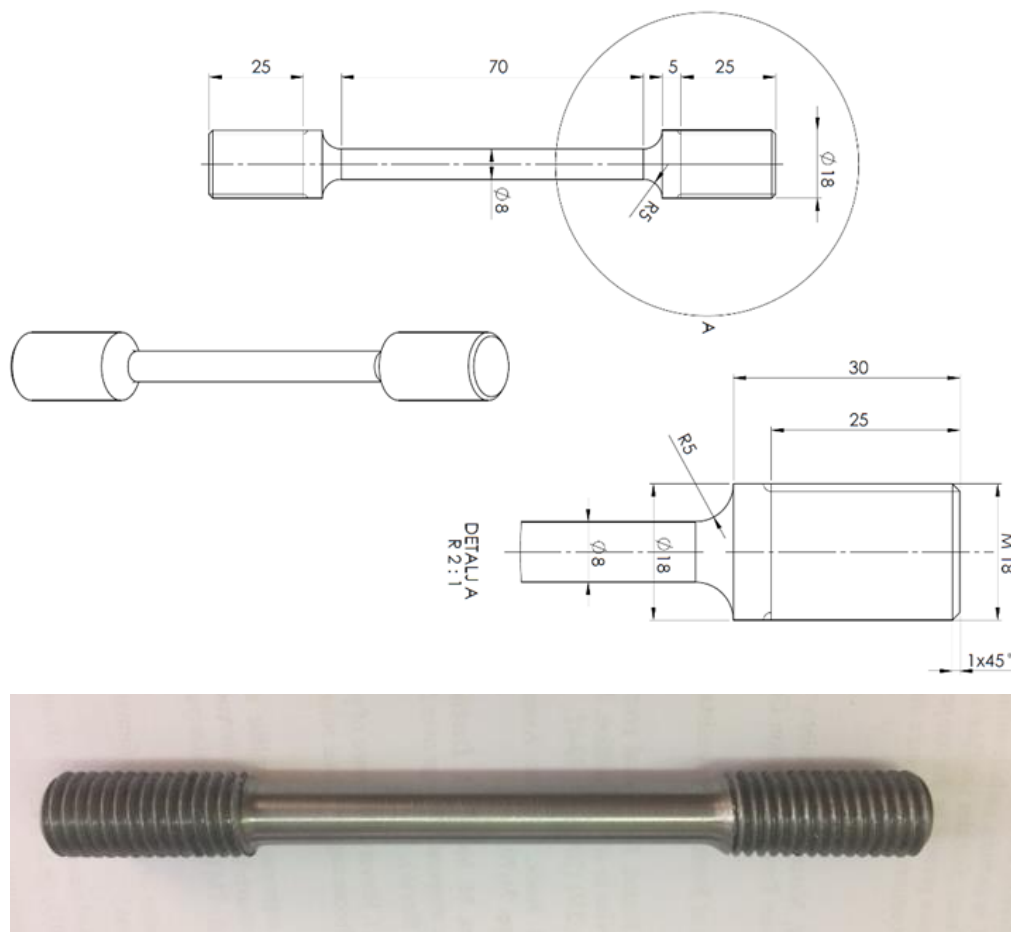
<i>1.1.1. Mesta merenja tvrdoće</i>	Tvrdoća, HB30							Srednja vrednost
	1	2	3	4	5	6	7	
Spoljašnja površina cevi	151	149	150	148	151	151	150	150
10mm - poprečno ispod spoljašnje površine cevi	156	156	158	157	155	157	156	156
Sredina poprečnog preseka cevi	157	157	158	156	157	158	158	157
10mm - poprečno iznad unutrašnje površine cevi	152	154	153	151	152	153	153	152



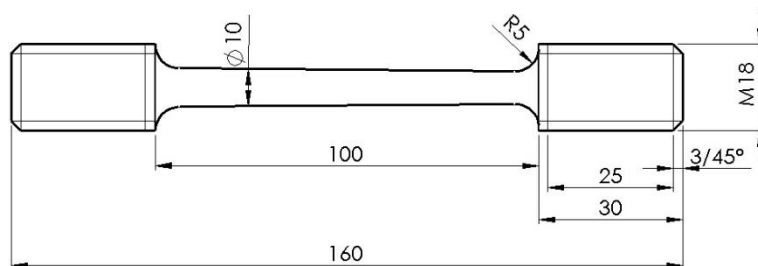
Slika 3.4. Univerzalni uređaj za merenje tvrdoće WOLPERT

3.4. Određivanje zateznih osobina

Zatezna ispitivanja epruveta izvađenih iz dostavljenog uzorka cevi određena su za sobnu (RT) i na radnu temperaturu od 540 °C (HT). Postupak ispitivanja na sobnoj temperaturi definisan je standardom [3.6], a na povišenoj temperaturi definisan je standardom [3.7]. Geometrija i izgled glatke okrugle epruvete za ispitivanje na RT data je na sl. 3.5. dok je za HT data su na sl. 3.6.



Slika 3.5. Epruveta za određivanje zateznih osobina na sobnoj temperaturi



Slika 3.6. Tehnički crtež i izgled epruveta za određivanje zateznih osobina na povišenoj temperaturi

Ispitivanje na RT je izvedeno u Laboratoriji za mehanička ispitivanja i mehaniku loma Tehnološko-metalurškog fakulteta (TMF) Univerziteta u Beogradu, na servohidrauličkoj kidalici INSTRON 1332 od ± 100 kN, u kontroli hoda, sl. 3.7. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5 mm/min.

Rezultati određivanja zateznih osobina za epruvete izvađene iz uzorka cevi ispitanih na sobnoj temperaturi dati su u tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Rezultati zateznih osobina epruveta ispitanih na sobnoj temperaturi (RT)

Oznaka uzorka	Napon tečenja $R_{p0,2}, MPa$	Srednja vrednost $R_{p0,2}, MPa$	Zatezna čvrstoća R_m, MPa	Srednja vrednost R_m, MPa	Izduženje pri lomu $A_5, \%$	Srednja vrednost $A_5, \%$	Modul elastičnosti E, GPa	Srednja vrednost E, GPa
OM-RT1	360	363	454	458	27,2	26,8	196	197
OM-RT2	364		461		26,3		198	
OM-RT3	365		459		26,8		198	

Izgled dijagrama napon - izduženje dobijen ispitivanjem na zatezanje epruvete označene kao OM-RT1 ispitane na sobnoj temperaturi je dat na sl. 3.8. Ostali dijagrami nisu prikazani jer pokazuju gotovo identičan karakter krive i rezultat ispitivanja.

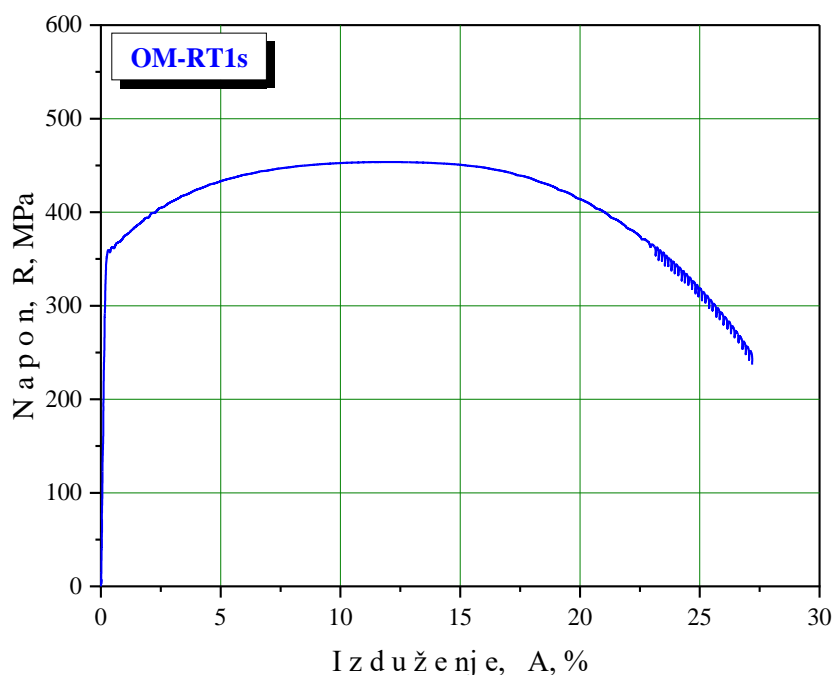


(a)



(b)

Slika 3.7. Servohidraulična kidalica INSTRON 1332 za ispitivanje na sobnoj temperaturi

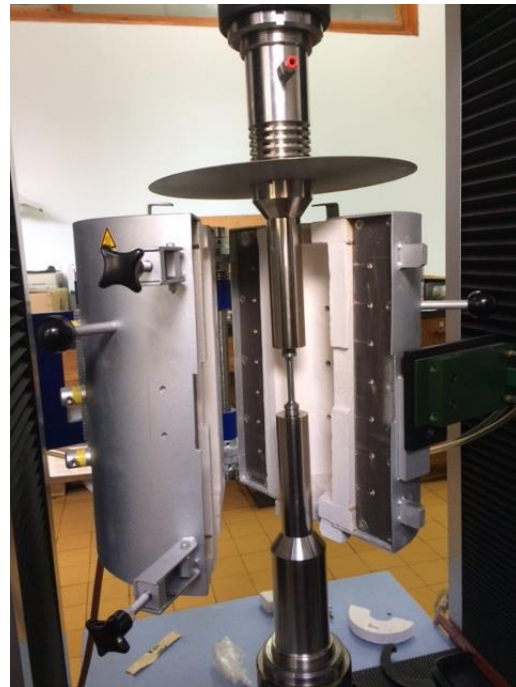


Slika 3.8. Dijagram napon – izduženje epruvete označene kao OM-RT1

U Laboratoriji TMF su urađena ispitivanja zatezanjem u kontroli deformacije, na povišenoj temperaturi od 540 °C. Ispitivano je u komori za povišene temperature koja je montirana na elektromehaničku kraljicu SHIMADZU AG-X+ 250KN, sl. 3.9. Ekstenzometrom za visoke temperature je mereno jedinično izduženje. Brzina uvođenja opterećenja je bila promenljiva, do dostizanja granice tečenja materijala išlo se sa malim brzinama koje su posle povećane do loma. Rezultati zateznih osobina za epruvete izvađene iz uzorka cevi ispitanih na HT dati su u tabeli 3.8.

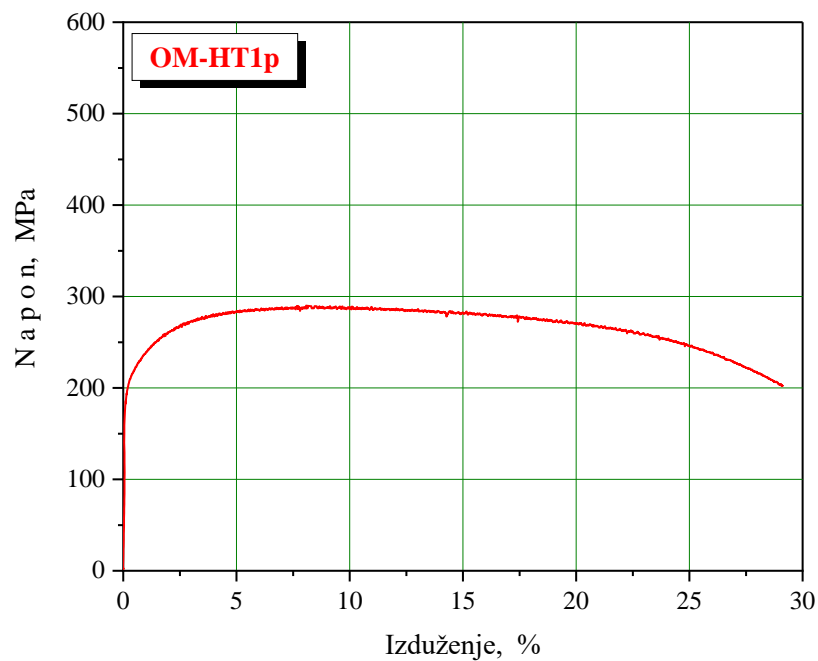
Tabela 3.8. Rezultati zateznih osobina epruveta ispitanih na radnoj temperaturi od 540 °C (HT)

Oznaka uzorka	Napon tečenja $R_{p0,2}, MPa$	Srednja vrednost $R_{p0,2}, MPa$	Zatezna čvrstoća R_m, MPa	Srednja vrednost R_m, MPa	Izduženje pri lomu $A_5, %$	Srednja vrednost $A_5, %$	Modul elastičnosti E, GPa	Srednja vrednost E, GPa
OM-HT1	213	214	295	300	29,1	29,4	140	138
OM-HT2	207		293		28,9		138	
OM-HT3	223		314		30,3		136	



Slika 3.9. Elektromehanička kidalica SHIMADZU sa komorom za ispitivanje na povišenim temperaturama

Izgled dijagrama napon - izduženje dobijen ispitivanjem na zatezanje epruvete OM-HT1 ispitane na radnoj temperaturi od 540 °C je dat na sl. 3.10. Ostali dijagrami nisu prikazani jer pokazuju sličan karakter krive, a malo rasipanje rezultata je rezultat preciznosti merno-akvizicionog sistema.

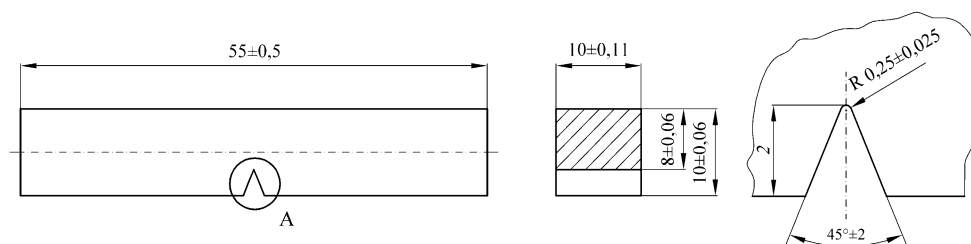


Slika 3.10. Dijagram napon – izduženje epruvete oznake OM-HT1

3.5. Udarne ispitivanja

Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom može da objasni ponašanje materijala pri ometenom deformisanju, tj. pri prostornom naponskom stanju. Kontrola kvaliteta i homogenost materijala kao i njegove obrade, sprovodi se pomoću određivanja rada potrebnog za lom pod određenim uslovima ispitivanja. Ovim postupkom ispitivanja može se utvrditi sklonost novog materijala ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije [3.8, 3.9].

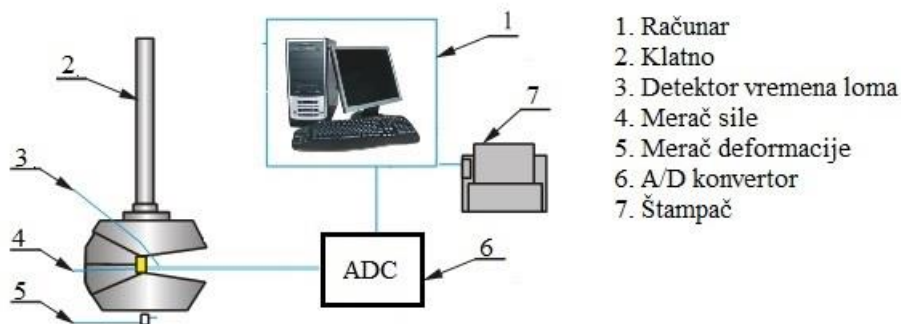
Udarnim ispitivanjem epruveta sa zarezom određuje se ukupna energija udara. Postupak ispitivanja, oblik i dimenzije epruveta i položaj mašinskog zareza definisani su standardom [3.10, 3.11]. Geometrija Šarpi epruveta prikazana je na sl. 3.11.



Slika 3.11. Oblik i dimenzije standardne epruvete za ispitivanje metodom po Šarpiju sa V- zarezom [3.9]

Pri ispitivanju savojnim udarnim opterećenjem energija loma određuje se kao integralna veličina. Na taj način dobijena energija loma se ne može razdvojiti na energiju stvaranja i energiju širenja prsline. Da bi se to postiglo udarna sila i vreme treba da budu kontinualno zapisivani tokom ispitivanja, što je moguće izvesti instrumentiranjem klatna. Instrumentalna metoda ispitivanja je rezultat primene savremenih merno akvizicionih metoda merenja, a što je i sadržano u standardu [3.12].

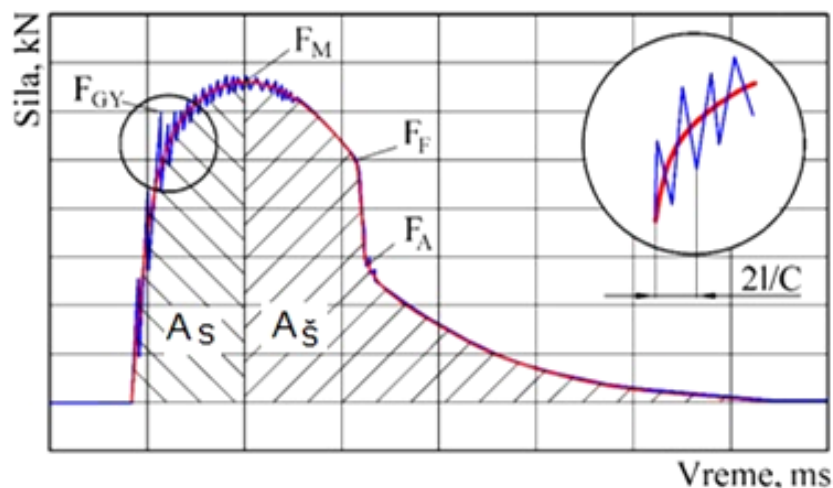
Šema savremenog instrumentiranog klatna je data na sl. 3.12. [3.13]



Slika 3.12. Šematski prikaz savremenog instrumentiranog klatna[3.12]

Iz priložene šeme je vidljivo da instrumentiranje klatna obuhvata povezivanje merača sile, koji je instaliran u čekić klatna (pozicija 5 na sl. 3.12), detektora vremena loma (4) i merača deformacije (6) preko ultra brze AD kartice sa računarem. Lom epruvete izazvan udarom je kratkotrajna pojava koja traje prosečno od 0,1 do 12 ms, i zato je uloga ultra brze AD kartice da registrovane signale učini vidljivim, najvažnija.

Pri oceni ponašanja materijala prati se promena sile sa vremenom razlikujući ponašanje materijala kod koga je utrošeni rad potreban za lom uzorka posledica delovanja male vrednosti sile tokom dužeg vremena, od ponašanja kod koga je kratkotrajno delovanja velike vrednosti sile polomilo uzorak. Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom, odnosno dobijanje dijagrama sila - vreme, sl. 3.13 [3.14].



Slika 3.13. Tipičan dijagram sila-vreme koji pokazuje izraženo plastično ponašanje materijala, dobijen na instrumentiranom klatnu [3.13]

Sa dijagram sila - vreme, sl. 3.13, moguće je očitavanje sledećih podataka:

F_{GY} – dinamička sila napona tečenja koja se određuje na mestu zakrivljenja dijagrama, tj. na prelaznoj tački od linearne ka nelinearnoj zavisnosti sila-vreme. Ona služi u prvoj aproksimaciji kao mera plastičnog popuštanja ligamenta uzorka;

F_M – maksimalna sila na krivoj sila - vreme;

F_F – sila početka nestabilnog rasta prsline koja se određuje kao sila na preseku glatke krive i strmo padajućeg dela krive sila-vreme i

F_A – sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline.

Kada se strmi pad sile podudara sa maksimalnom silom, onda je $F_M = F_F$, sila F_A se određuje kao presek strmog pada krive sila - vreme i glatke krive koja osciluje.

Iz dijagrama sila - vreme, sl. 3.13, moguće je izračunati ukupnu energiju udara E_{uk} potrebnu za lom epruvete:

$$E_{uk} = \int_0^{t_l} F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (3.1)$$

gde su:

$F(t)$ - sila, koja se menja sa vremenom;

$v(t)$ - promena brzine klatna za vreme loma i

t - vreme trajanja loma.

Da bi se prikazala energija udara, ona se mora rastaviti na sastavne komponente, silu i deformaciju (ugib epruvete). Ugib se određuje iz zavisnosti sila-vreme. Veza između sile i vremena je proporcionalna karakteristikama ubrzanja. Pri ispitivanju se koristi kruti teg mase m , početne brzine udara v_0 , a deformacije počinju u trenutku vremena t_0 . Ugib se proračunava dvostrukom integracijom:

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (3.2)$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad (3.3)$$

Potrebno je znati koliki deo energije se troši za stvaranje prsline, a koliki za njeno širenje da bi se mogla dati ocena ponašanja materijala pri udarnom opterećenju. Većina metoda za razdvajanje vrednosti ukupne energije udara, E_{uk} , na energiju potrebnu za stvaranje prsline, E_s , i energiju potrebnu za širenje prsline, $E_{\bar{s}}$, se zasnima na tome da komponenta E_s ne zavisi od radijusa zarez, već da radijus utiče na komponentu $E_{\bar{s}}$.

Najprihvatljiviji postupak određivanja E_s prsline je preko *zamorne prsline*. Suština ovog postupka je u tome da se na epruvetama sa V zarezom pre ispitivanja napravi zamorna prsline, pa se takva epruveta onda polomi na Šarpi klatnu. Energija koja se pri tom utroši za lom epruvete je praktično energija širenja prsline, $E_{\bar{s}}$. Ukoliko je poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala, onda može se E_s izračunava kao:

$$E_s = E_{uk} - E_{\bar{s}} \quad (3.4)$$

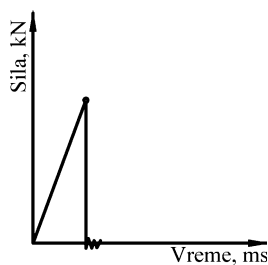
Za razliku od drugih postupaka, određivanje E_s i $E_{\bar{s}}$ po ovoj metodi obavlja se na jednom uzorku čime se dobija veća tačnost. Na dijagramu sila - vreme, sl. 3.13, obeležene su površine A_s i $A_{\bar{s}}$ koje predstavljaju rad potreban za stvaranje/širenje prsline i koje su proporcionalne energijama E_s i $E_{\bar{s}}$.

Dva materijala koja imaju jednake vrednosti E_{uk} , mogu da imaju različite E_s i $E_{\bar{s}}$. S tačke gledišta sigurnosti konstrukcije bolji je onaj materijal koji ima malu E_s , a veliku $E_{\bar{s}}$. U zavisnosti od vrste ispitivanog materijala, temperature ispitivanja, režima termičke obrade, ispitivanjem na instrumentiranom Šarpi klatnu mogu da se dobiju različiti oblici zavisnosti sila - vreme, odnosno sila - ugib. Na osnovu krivih sa sl. 3.14 možemo odrediti kom tipu ponašanja pri lomu pripadaju ispitani uzorci **A** do **F**.

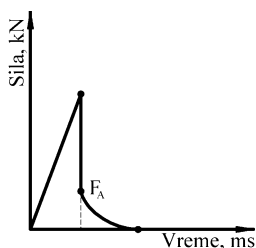
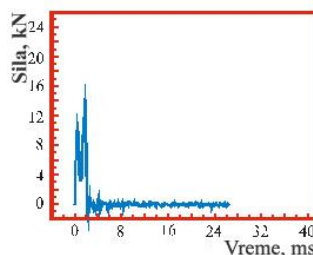
Tipovi **A** i **B** odgovaraju krtom ponašanju materijala. Ako se pojavljuje strmi pad sile, po tipu **C**, **D** i **E**, veličina pada sile u odnosu na druge karakteristične veličine sile omogućava da se približno oceni udeo duktilnog loma (% DL) na prelomnoj površini prema sledećoj formuli:

$$\% DL = \left(1 - \frac{F_F - F_a}{F_M} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

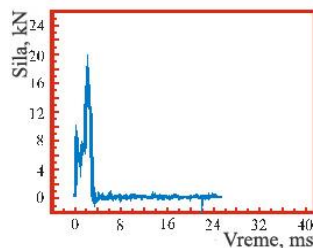
U slučaju da na krivoj nema jako strmog pada, oblik **F**, može da se kaže da je udeo duktilnog loma u prelomnoj površini 100%.

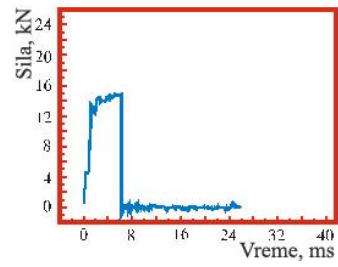
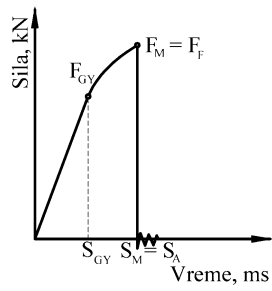


Tip A

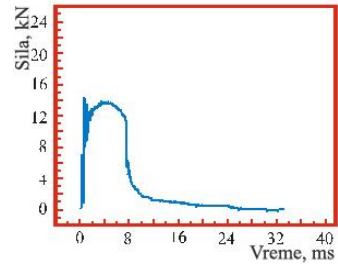
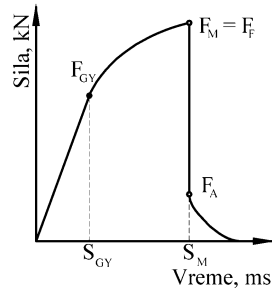


Tip B

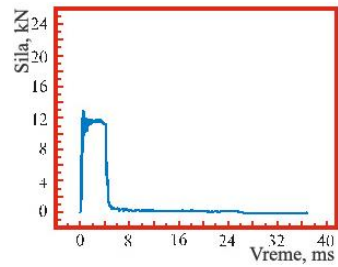
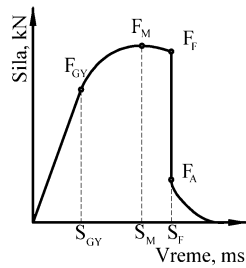




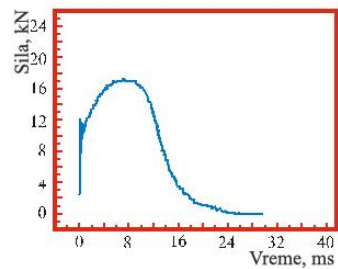
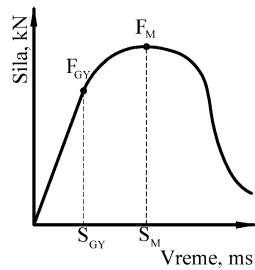
Tip C



Tip D



Tip E



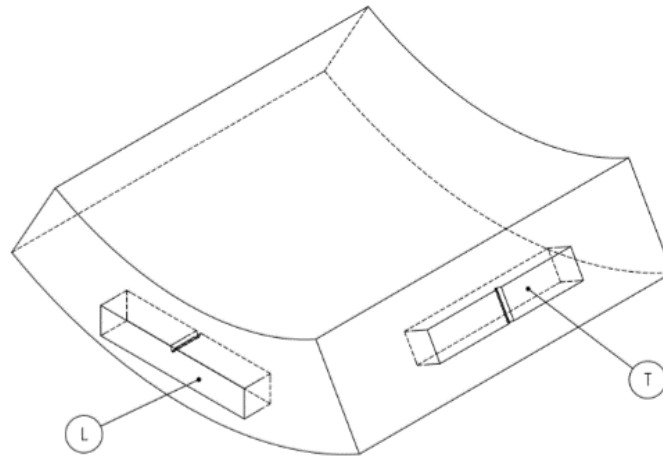
Tip F

Slika 3.14. Tipovi dijagrama dobijeni ispitivanjem na instrumentiranom klatnu [3.13]

Ispitivanjem na instrumentiranom klatnu dobijaju se dijagrami zavisnosti sila - vreme i energija udara- vreme, koji omogućavaju analizu rezultata ispitivanja, pre svega ocenu uticaja temperature ispitivanja na ukupnu eneriju udara E_{uk} , i njene komponente, E_s i $E_{\dot{s}}$ [3.12]. Udarna ispitivanja epruveta izvađenih iz uzorka nove cevi rađena su na sobnoj temperaturi od 20 °C (RT) i na radnoj temperaturi od 540 °C (HT).

Naprevljene su dve grupe epruveta u zavisnosti od položaja V-2 zarez, sl. 3.15, i to:

- I grupa - epruvete sa V-2 zarezom u pravcu valjanja cevi (L-pravac)
- II grupa - epruvete sa V-2 zarezom poprečno na pravac valjanja cevi (T-pravac)



Slika 3.15. Šema vađenja Šarpi V-2 epruveta iz ispitivane cevi

Ispitivanje je izvedeno u VTI, na instrumentiranom Šarpi klatnu opsega 150/300 J, sl. 3.16.



Slika 3.16. Instrumentirano Šarpi klatno 150/300 J

Kako su ispitivanja novog, nekorišćenog materijala, rađena na instrumentiranom Šarpi klatnu 150/300 J, sl. 3.16, bilo je moguće dati ocenu kako temperatura ispitivanja utiče na vrednosti E_s i $E_{\dot{s}}$, kao integralnih komponentata E_{uk} , uzimajući u obzir i način kako smo vadili epruvete iz cevi tj. da li

su ispitivane epruvete uzorkovane u L-pravcu ili uzorkovane u T-pravcu.

Rezultati udarnih ispitivanja epruveta izvađenih iz čelika za rad na povišenim temperaturama, dati su u tabeli 3.9 za epruvete uzorkovane u L-pravcu i u tabeli. 3.10 za epruvete sa uzorkovane u T-pravcu.

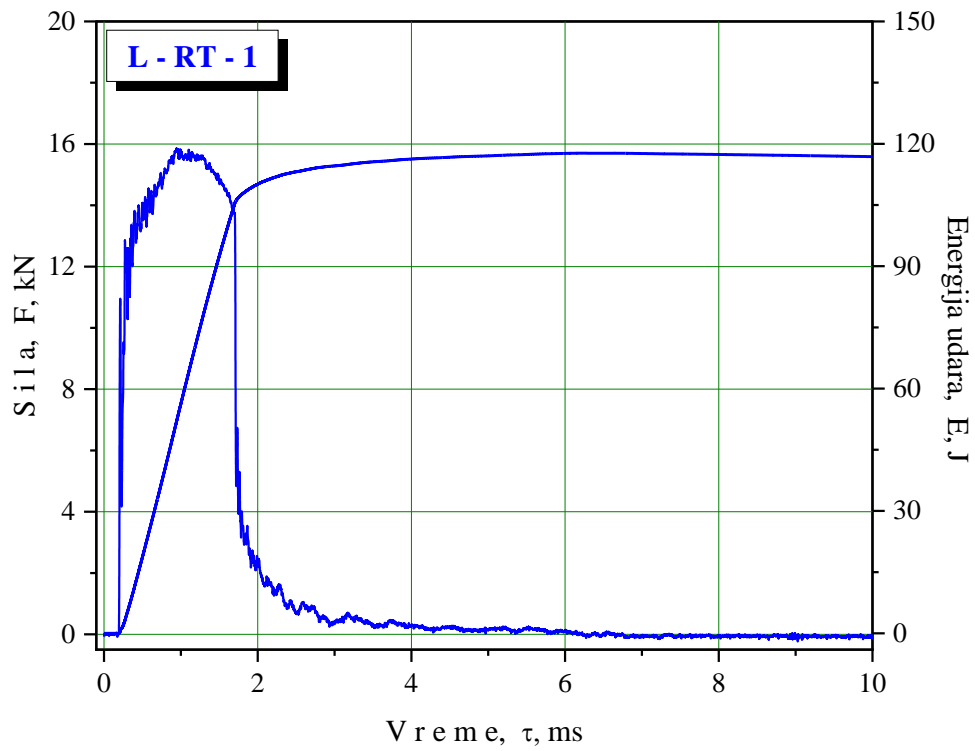
Tabela 3.9. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta uzorkovanih u L-pravcu ispitanih na sobnoj (RT) i radnoj temperaturi od 540 °C (HT)

Oznaka uzorka	E_{uk}, J	Srednja vrednost E_{uk}, J	E_s, J	Srednja vrednost, E_s, J	$E_{\check{s}}, J$	Srednja vrednost $E_{\check{s}}, J$
L - RT - 1	117	103	61	59	56	44
L - RT - 2	98		58		40	
L - RT - 3	94		59		35	
L - HT - 1	91	97	37	38	54	59
L - HT - 2	103		41		62	
L - HT - 3	96		35		61	

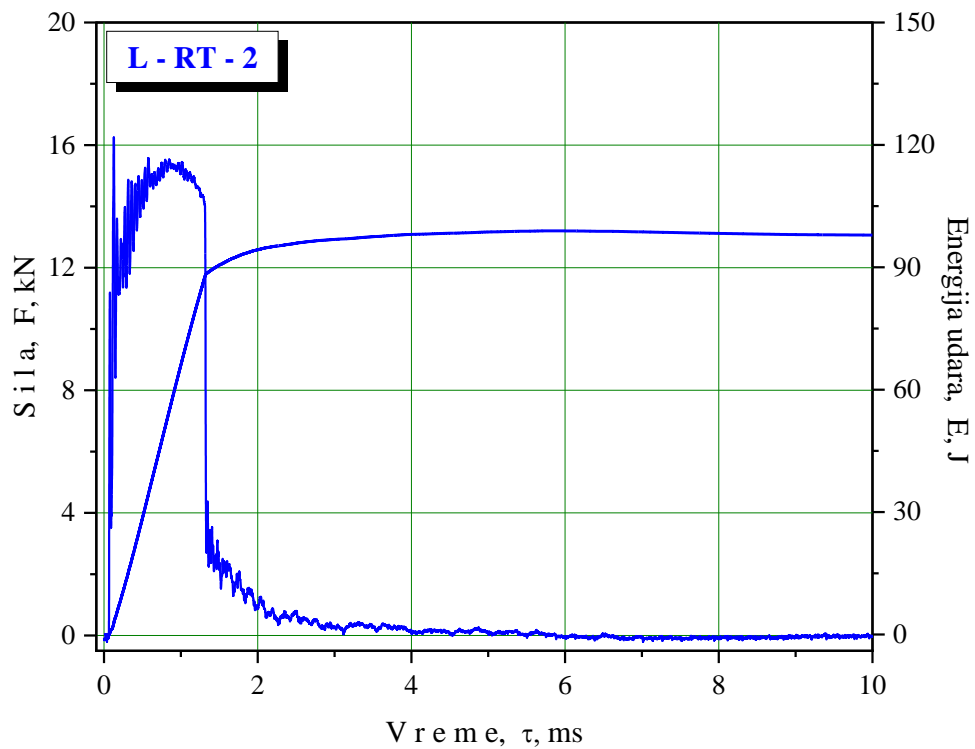
Tabela 3.10. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta uzorkovanih u T-pravcu ispitanih na sobnoj (RT) i radnoj temperaturi od 540 °C (HT)

Oznaka uzorka	E_{uk}, J	Srednja vrednost E_{uk}, J	E_s, J	Srednja vrednost, E_s, J	$E_{\check{s}}, J$	Srednja vrednost $E_{\check{s}}, J$
T - RT - 1	197	217	67	71	130	146
T - RT - 2	241		68		173	
T - RT - 3	213		77		136	
T - HT - 1	142	140	55	59	87	81
T - HT - 2	136		58		78	
T - HT - 3	143		64		79	

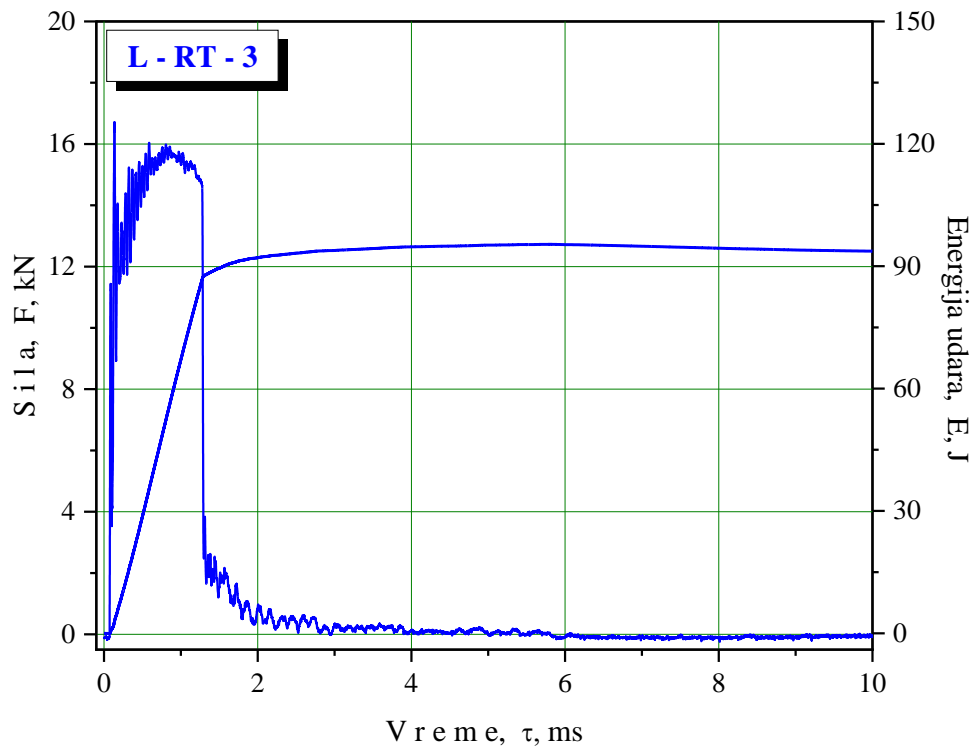
Dijagrami sila – vreme i energija - vreme za epruvete uzorkovane u L-pravcu i ispitane na RT su dati na sl. 3.17 do 3.19, a za epruvete ispitane na HT na sl. 3.20 do 3.22.



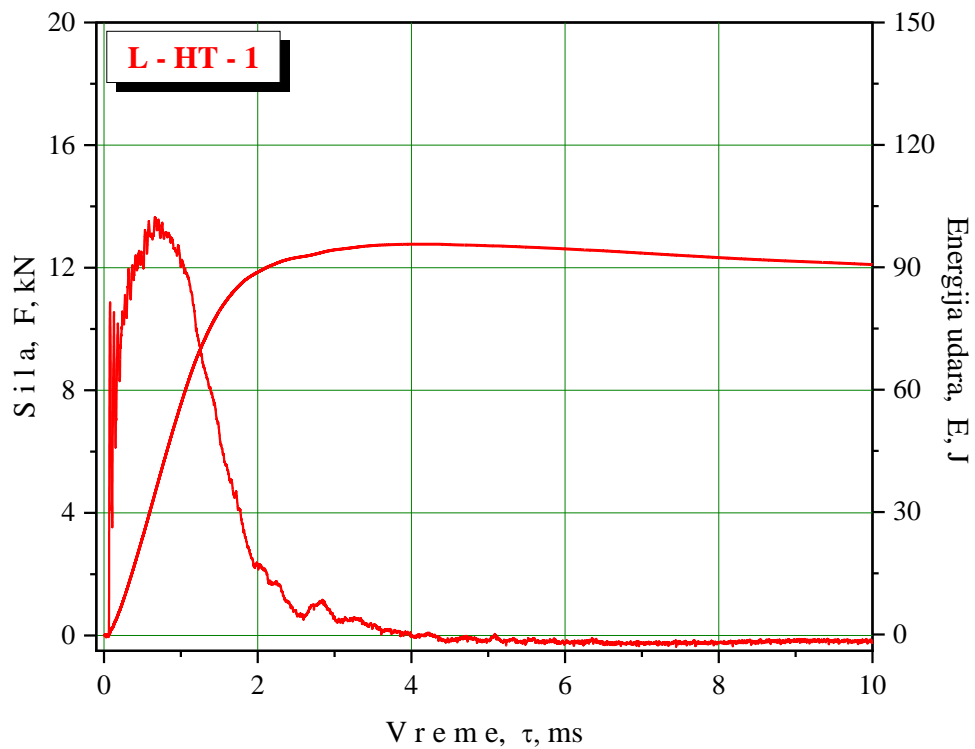
Slika 3.17. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-RT-1



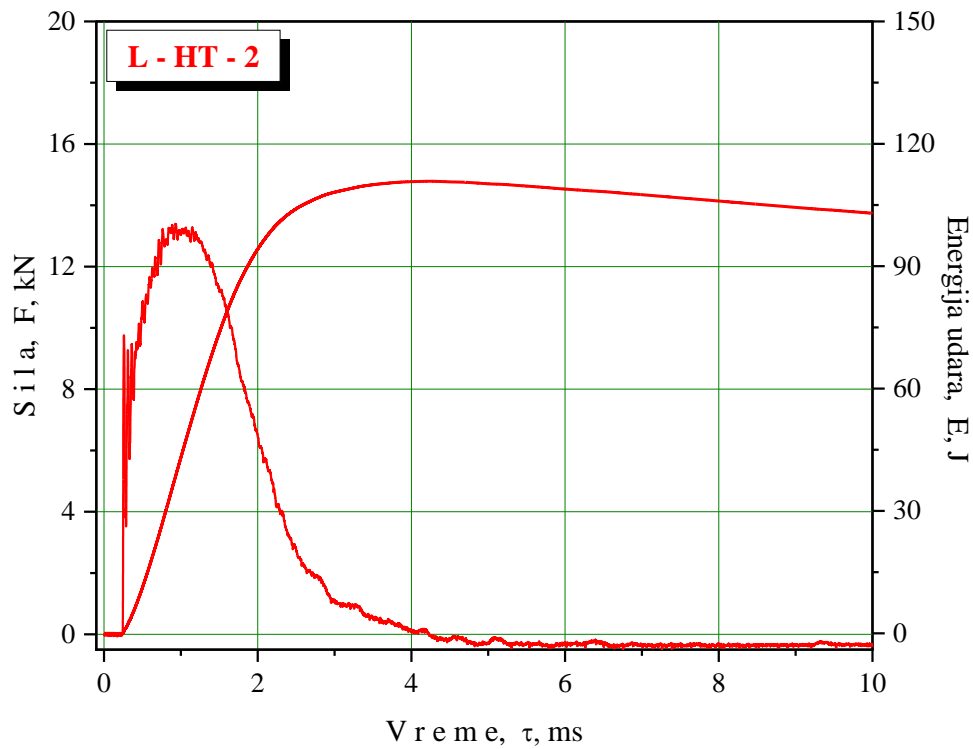
Slika 3.18. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-RT-2



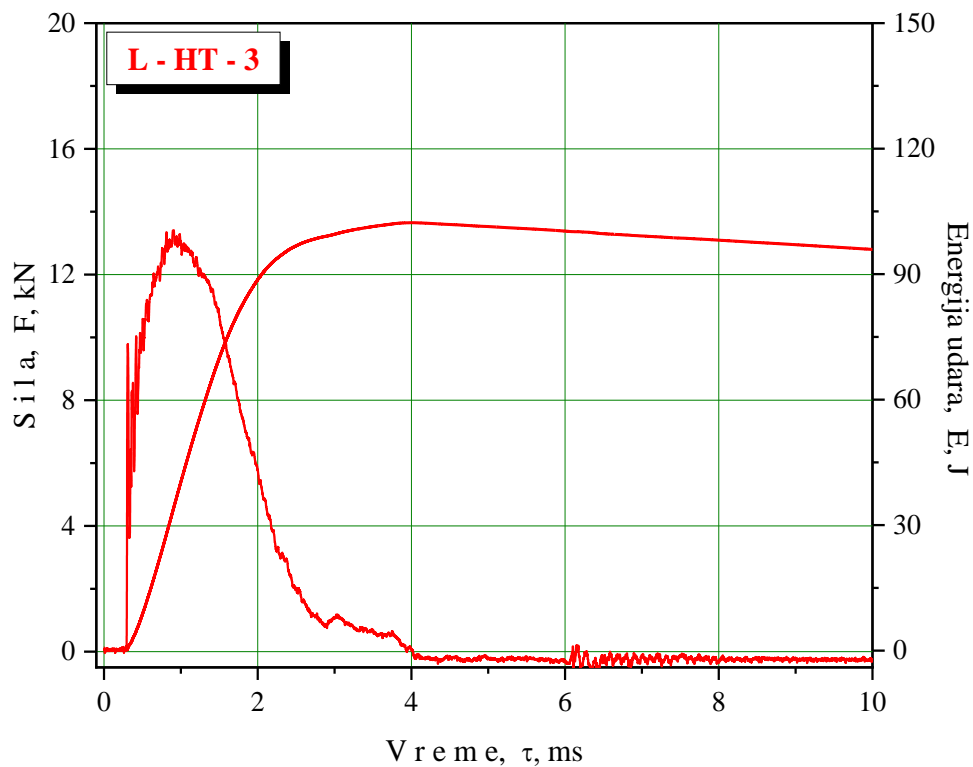
Slika 3.19. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-RT-3



Slika 3.20. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-HT-1

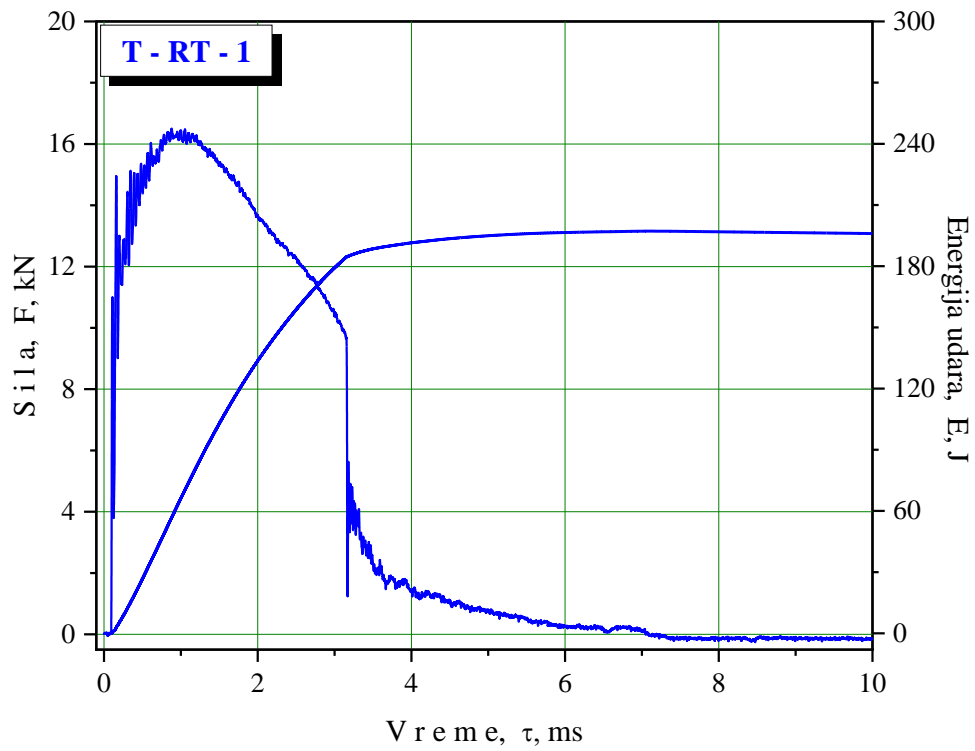


Slika 3.21. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-HT-2

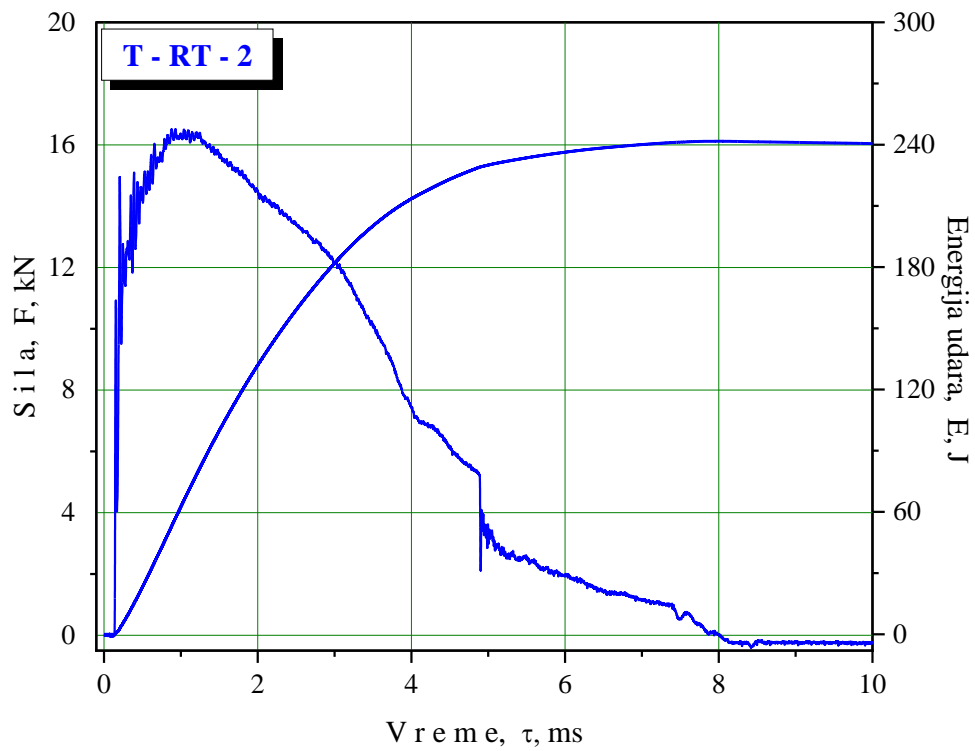


Slika 3.22. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete L-HT-3

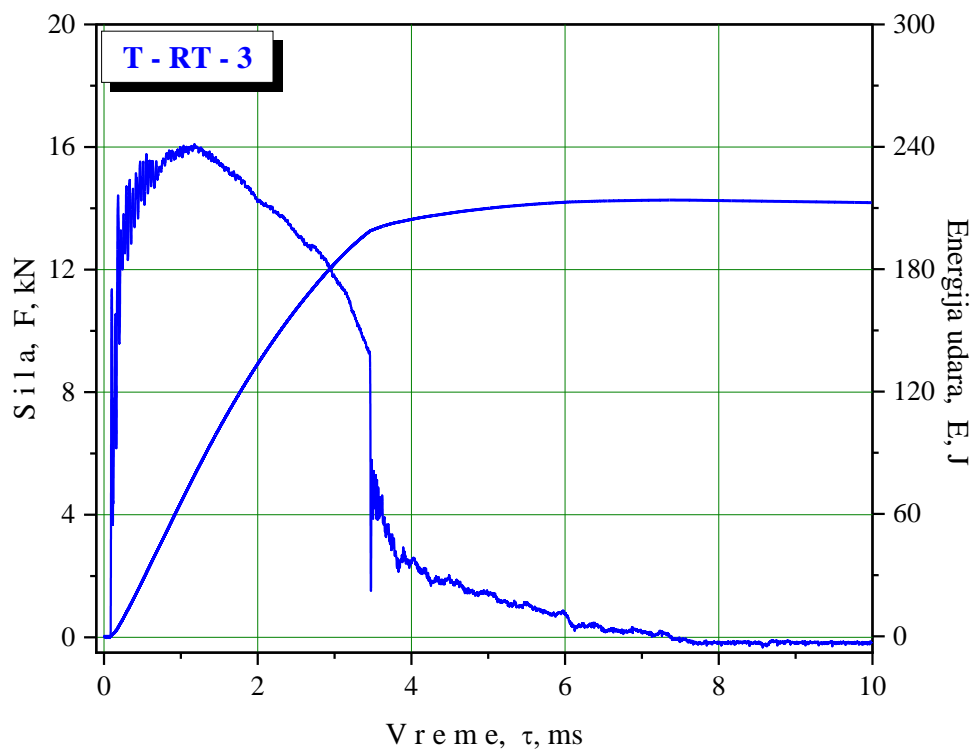
Dijagrami sila – vreme i energija - vreme za epruvete uzorkovane u T-pravcu i ispitane na RT su dati na sl. 3.23 do 3.25, a za epruvete ispitane na HT na sl. 3.26 do 3.28.



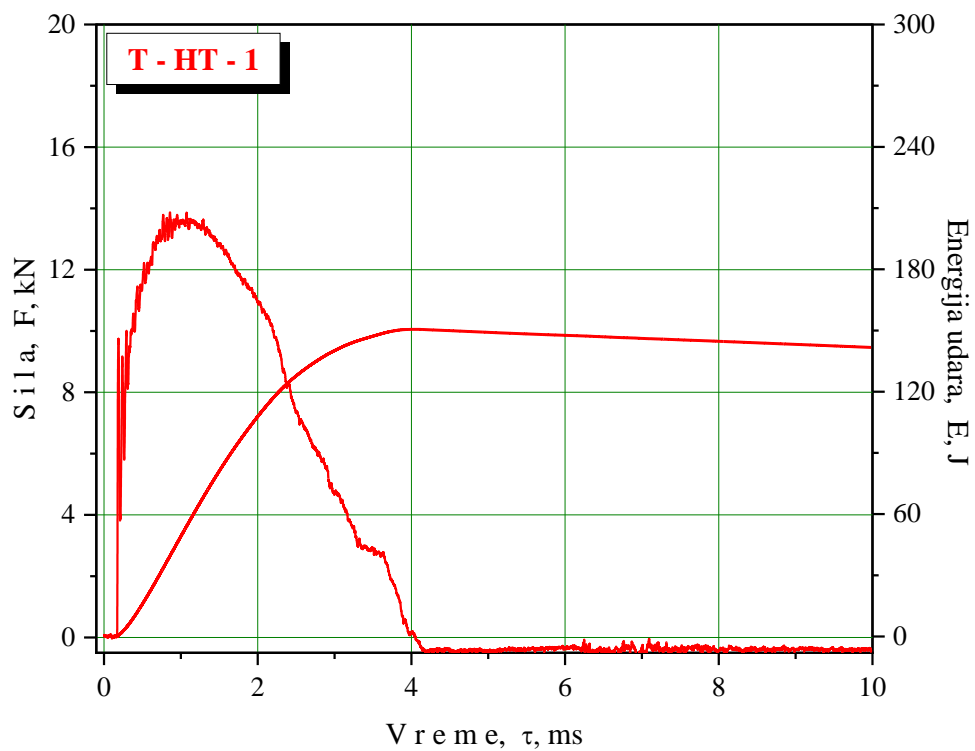
Slika 3.23. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-RT-1



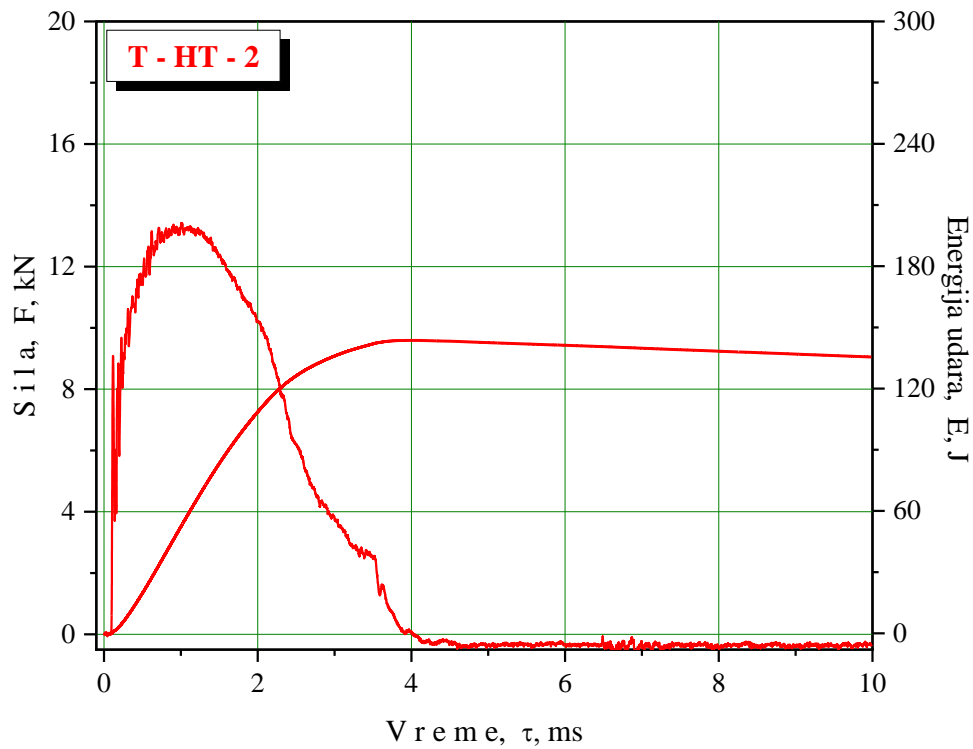
Slika 3.24. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-RT-2



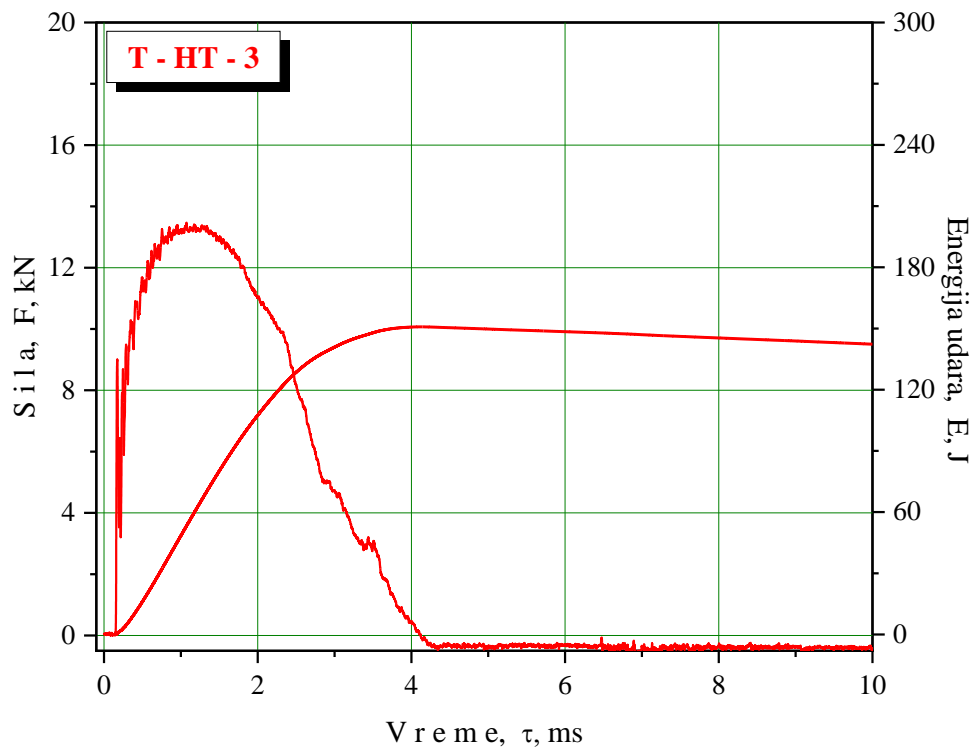
Slika 3.25. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-RT-3



Slika 3.26. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-HT-1

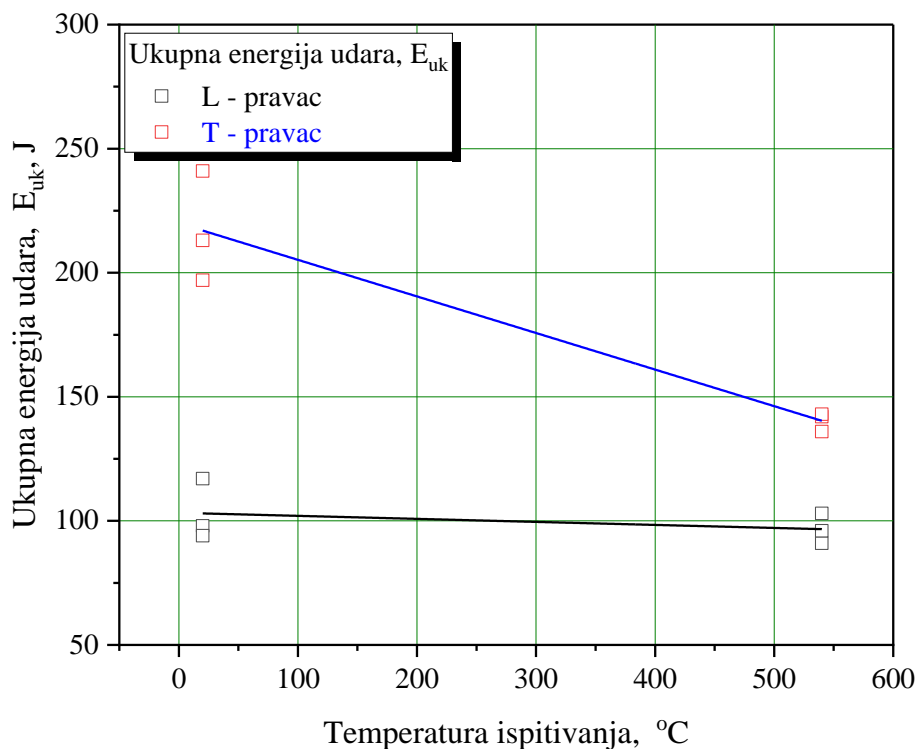


Slika 3.27. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-HT-2



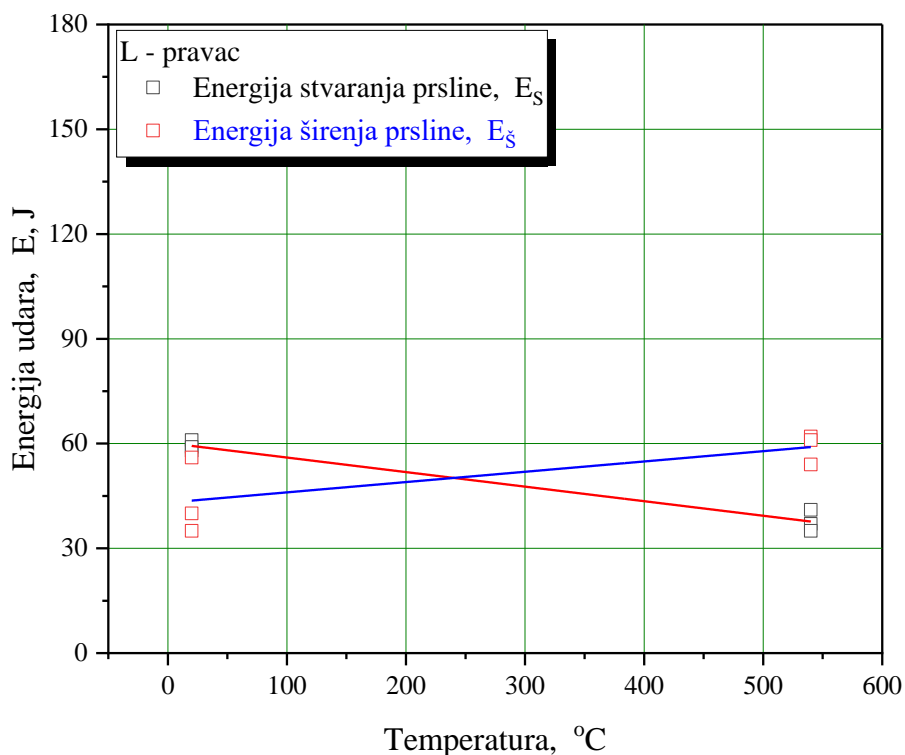
Slika 3.28. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete T-HT-3

Zavisnost E_{uk} , ispitivanog čelika od temperature ispitivanja je data na dijagramu na sl. 3.29 za epruvete uzorkovane iz L- i T-pravca.

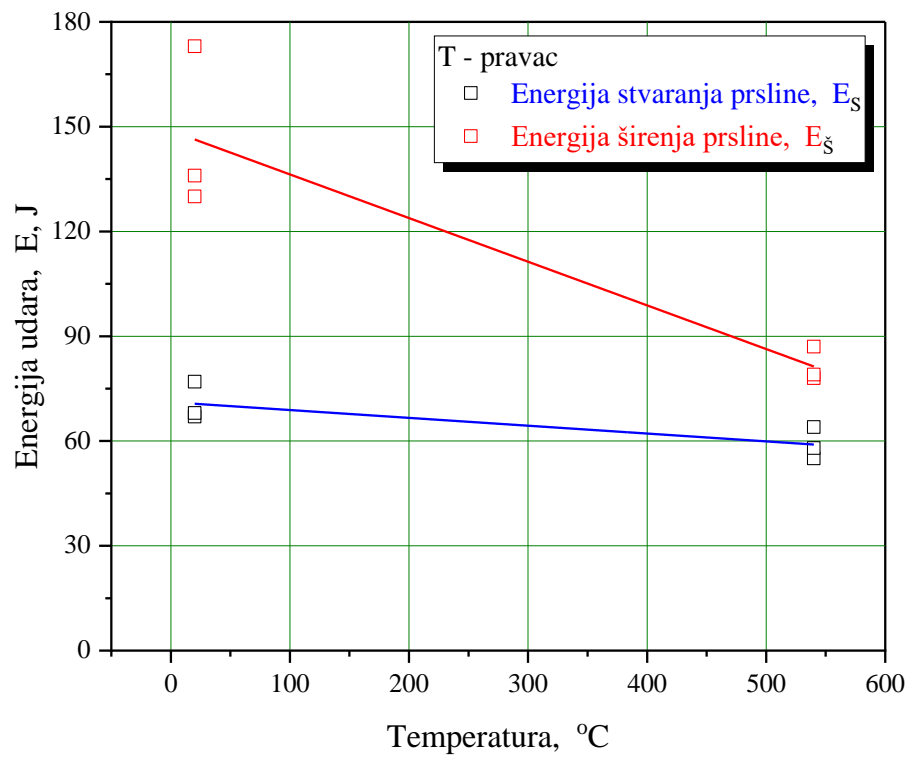


Slika 3.29. Promena E_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja

Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti E_s i E_{δ} prsline je data na dijagramu na sl. 3.30 za L-pravac uzorkovanja i na sl. 3.31 za T-pravac uzorkovanja epruveta iz cevi.



Slika 3.30. Promena E_s i E_{δ} u zavisnosti od temperature ispitivanja epruveta vadenih iz cevi u L-pravcu



Slika 3.31. Promena E_s i $E_š$ u zavisnosti od temperature ispitivanja epruveta vađenih iz cevi u T-pravcu

3.6. Određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic}

Podaci o lokalnom ponašanju materijala u okolini vrha prsline dobijaju se ispitivanjem epruveta sa prslinom. Da bi tako dobijeni rezultati mogli da se primene na celu konstrukciju koja sadrži prsline, usvaja se da je materijal u okolini prsline homogen čime se lokalno ponašanje može tretirati globalno.

Žilavost loma pri RSD K_{Ic} definiše se kao mera otpornosti materijala na širenje prsline kada je stanje napona u okolini vrha prsline prevashodno RSD, plastična deformacija ograničena i kada je primenjen oblik I razvoja prsline cepanjem [3.15]. Osnovni zahtev za ispunjenje uslova RSD određuje debljina epruvete:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}}\right)^2 \quad (3.6.)$$

Žilavost loma K_{Ic} pre ispitivanja nije poznata tako da nije moguće oceniti da li je ispunjen uslov dat jednačinom (3.6), stoga su preporučene debljine za različite količnike $R_{p0,2}/E$. Posle eksperimentalnog određivanja K_{Ic} , uslov dat jednačinom (3.6) pokazuje da se može raditi i sa manjim debljinama od preporučenih količnikom $R_{p0,2}/E$. Na osnovu debljine B određuju se ostale dimenzije epruveta.

Pretpostavljajući postojanje prethodne oštre zamorne prsline, vrednosti žilavosti loma materijala koji su identifikovani ovom metodom ispitivanja karakterišu njegovu otpornost na:

- (1) lom stacionarne prsline ,
- (2) lom posle izvesnog stabilnog cepanja,
- (3) početak stabilnog cepanja i
- (4) kontinualno stabilno cepanje.

U slučaju da uslov dat jednačinom (3.6) nije ispunjen, K_{Ic} se određuje posredno, preko $CTOD_{IC}$ i/ili preko J_{IC} .

Kako je definisao standardom [3.15], pre ispitivanja je potrebno zamoriti prslinu da bi se stvorila tzv. prethodna zamorna prslina kojom bi se uspostavili uslovi RSD. Pokazalo se da je nepraktično napraviti oštar uzak mašinski zarez koji treba dovoljno tačno da simulira prirodnu prslinu i obezbedi zadovoljavajući rezultat ispitivanja žilavosti loma. Najefikasnije je da se takva, relativno kratka prslina, napravi zamaranjem promenljivim opterećenjem iz uskog zareza. U zavisnosti od veličine epruvete, načina izrade početnog zareza i nivoa intenziteta napona, broj ciklusa zamaranja se kreće od 10^4 do 10^6 . Veličina odnosno dužina prethodne prsline (ukupna prosečna dužina zareza plus dužina zamorne prsline) treba da bude između 0,45 i 0,70 od širine epruvete za određivanje J -integrala i $CTOD$, a za određivanje K_{Ic} opseg je ograničen na (0,45 do 0,55) od širine W . Opremom na kojoj će se stvarati zamorna prslina treba da se obezbedi ravnomerna raspodela napona po debljini epruvete, u suprotnom prslina neće da raste ravnomerno sa obe strane debljine epruvete. Takođe raspodela napona treba da bude simetrična u odnosu na ravan potencijalne prsline, jer u suprotnom prslina može da odstupa iz ravni što bi značajno uticalo na rezultate ispitivanja. Prethodno zamaranje može da se obavlja ili u kontroli sile ili u kontroli pomeranja (hoda). Ako se ciklus sile održava konstantnim, maksimalna vrednost faktora intenziteta napona (FIN) K i njegov opseg će da se povećavaju sa porastom dužine prsline; ako se radi u kontroli pomeranja dogodiće se suprotno. Takođe, dužina zamorne prsline merena od mašinskog zareza, ne sme da bude manja od $0,05 \cdot B$ niti da bude manja od 1,3 mm u slučaju širokog zareza, niti da bude manja od $0,025 \cdot B$ ili manja od 0,6 mm, u slučaju uskog zareza.

Princip ispitivanja je sledeći [3.15]: primenom naizmenično promenljive sile u kontrolisanim granicama zamorna prslina se širi kroz epruvetu ili savijanjem, u slučaju epruvete za savijanje (SEN(B)), ili zatezanjem, u slučaju ispitivanja kompaktne epruvete za zatezanje (C(T)). Zatim se epruveta izloži delovanju rastuće monotone sile, u slučaju C(T) epruvete, zateže se konstantnom brzinom do dostizanja sile P_m i to u vremenu ne kraćem od 20 i ne dužem od 180 sekundi. Mere se sila i pomeranje do tačke u kojoj se dogodi ili krti rast prsline ili se dostigne maksimalna sila

ispitivanja. Crta se dijagram zavisnosti primnjene sile i pomeranja (pomeranje otvora prsline δ ili pomeranje linije opterećenja *LLD*) da bi se definisala navedena tačka na krivoj. Dijagram se analizira i kada se ispune specifični kriterijumi važenja, tako dobijena tačka se koristi za određivanje K_{Ic} . Kada kriterijumi važenja nisu ispunjeni, dobijena tačka se koristi za određivanje ili kritične vrednosti $CTOD_{IC}$ ili kritične vrednosti J_{IC} , ili obe. u zavisnosti od izbora tipa epruvete i načina na koji se registruju, pomeranja.

U slučaju ispitivanja C(T) epruveta, početna vrednost maksimalne sile zamaranja P_m treba da bude manja od vrednosti:

$$P_m = 0,4 \cdot \frac{B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_y}{(2W + a_0)} \quad (3.7.)$$

gdje je:

B - debljina C(T) epruvete, *mm*

W - širina C(T) epruvete, *mm*

b_0 - početna dužina preostalog ligamenta, *mm* ($b_0 = W - a_0$)

a_0 - početna dužina prsline, *mm* (fizička dužina prsline na početku ispitivanja)

σ_y - efektivni napon tečenja u *MPa*, računa se kao srednja vrednost između napona tečenja 0,2% i zatezne čvrstoće materijala:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{YS} + \sigma_{TS}}{2} \quad (3.8.)$$

3.6.1. Eksperimentalno određivanje K_{Ic}

Eksperimentalna procena otpornosti materijala na lom igra ključnu ulogu u projektovanju, proizvodnji i predviđanju otkaza posuda pod pritiskom, cevovoda i skladišnih rezervoara, pa je jasno koliko je važno da ona bude što je moguće tačnija. Većina dostupnih metodologija za procenu integriteta konstrukcija (kao što su API 579, BS 7910) se baziraju na teoriji mehanike loma i oslanjaju se da je jedan parametar u stanju da okarakteriše silu razvoja na vrhu prsline i otpornost materijala prema otkazu.

Za ocenu ponašanja homogenog materijala u prisustvu greške tipa prsline koji je predmet analize ove doktorske disertacije, trebalo je odrediti vrednosti kritičnog FIN, K_{Ic} kao mere žilavosti loma ispitivanog čelika u uslovima RSD, na dve temperature ispitivanja, 20 °C i 540 °C.

Geometrijske mere C(T) epruvete za ispitivanje na 20 °C date su na crtežu prikazanom na sl. 3.32. Ovde su:

$B = 25 \text{ mm}$ - debljina

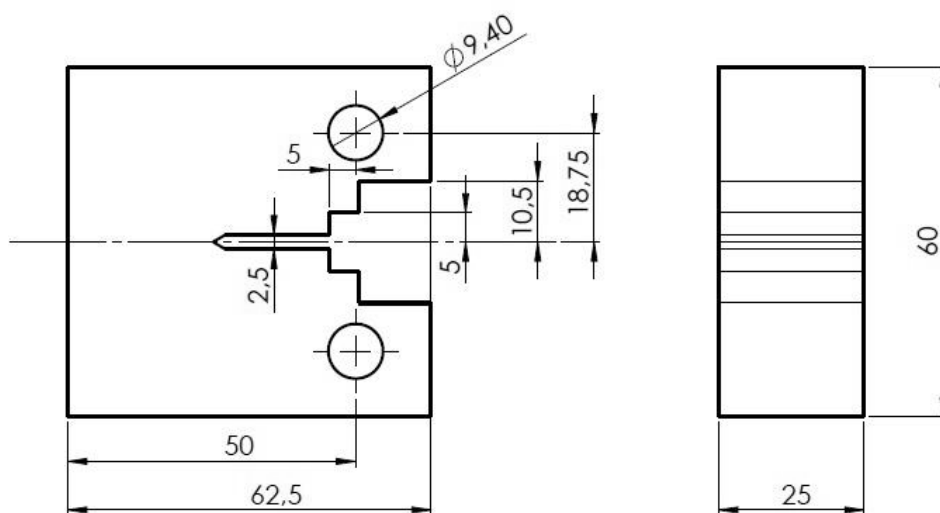
$C = 62,5 \text{ mm}$ - ukupna širina

$W = 2 \cdot B = 50 \text{ mm}$ - efektivna širina

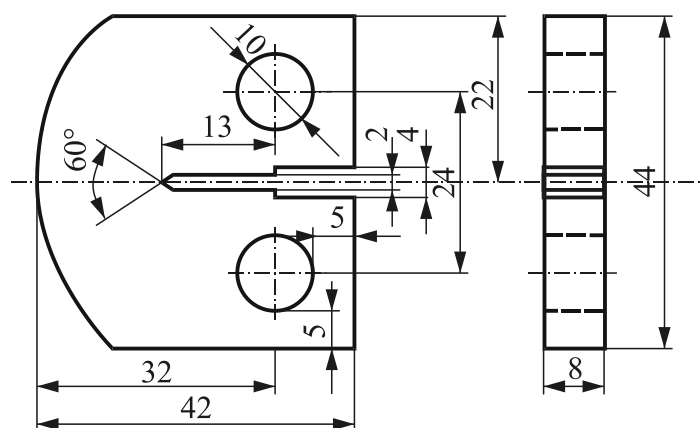
$2H = 60 \text{ mm}$ visina

$d = 9,4 \text{ mm}$ prečnik otvora.

Za određivanje K_{Ic} na radnoj temperaturi od 540°C korišćene su modifikovane C(T) epruvete čija geometrija je u saglasnosti sa standardom [3.16], i data je na sl. 3.33. Zaobljeni oblik ove epruvete je prilagođen ograničenom prostoru u komori za povišene temperature, a sve potrebne geometrijske proporcije zahtevane u [3.16] su zadržane.

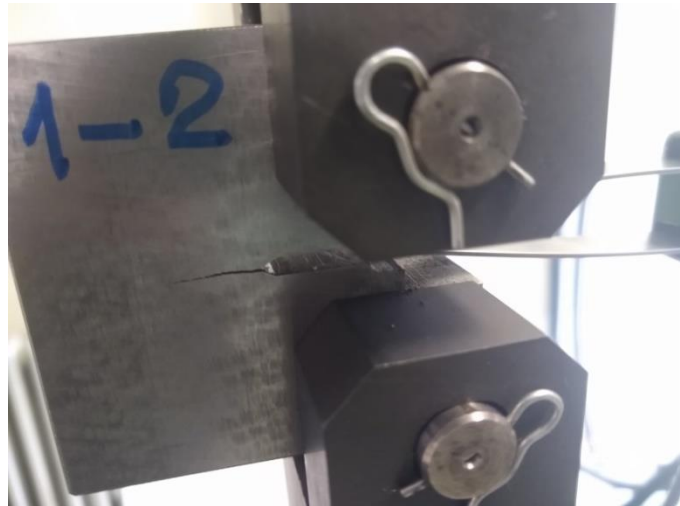


Slika 3.32. Geometrija C(T) epruvete sa tzv. stepenastim zarezom za ispitivanja žilavosti loma na sobnoj temperaturi (RT) [3.15]



Slika 3.33. Geometrija modifikovana C(T) epruveta za ispitivanje u komori za visoke temperature (HT)

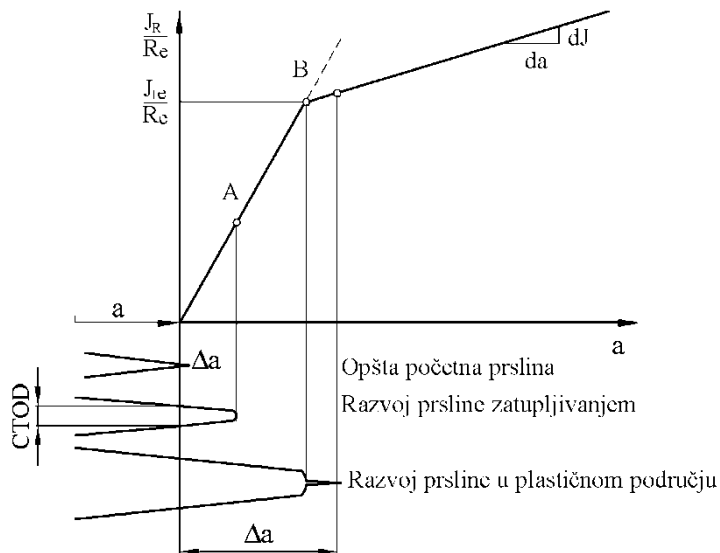
Faktor asimetrije ciklusa ($R = P_{min} / P_{max}$) je $R = 0,1$. Prethodno zamaranje C(T) epruveta je rađeno na servohidrauličkoj kitalici SHIMADZU SERVOPULSER, sl. 3.34, gde je moguće ostvariti sinusoidalno jednosmerno promenljivo opterećenje u opsegu od $\mp 100 \text{ kN}$. Srednje opterećenje i amplituda opterećenja su registrovani sa tačnošću $\pm 10 \text{ N}$, a učestanost se kretala u opsegu od 40 do 60 Hz.



Slika 3.34. Stvaranje prethodne zamorne prsline na servohidrauličkoj kitalici

Kako zahtev za ispunjenje uslova RSD iz jednačine (3.6) nije zadovoljen, korišćen je postupak EPML definisan standardom [3.16]. Cilj korišćenja EPML je da se vrednost kritičnog FIN, K_{Ic} , odredi posredno preko vrednosti kritičnog J -integrala, J_{Ic} , odnosno da se prati razvoj prsline u uslovima izražene plastičnosti. Ponašanje elasto-plastičnog materijala u koji spadaju i čelici za rad na povišenim temperaturama, pri stabilnom rastu prsline može da se opiše dijagramom $J-\Delta a$, gdje je Δa priraštaj prsline, sl. 3.35.

Kod mnogih materijala koji imaju veliku žilavost ne dolazi do katastrofalnih lomova na određenoj vrednosti J ili $CTOD$. Umesto toga ovi materijali pokazuju rastuću R -krivu na kojoj se vidi da J i $CTOD$ rastu sa porastom prsline. U metalima, porast na R -krivoj se obično povezuje sa rastom i koalescencijom mikrošupljina. Na sl. 3.35. šematski je prikazan tipičan oblik J -krive otpornosti duktilnih materijala. U početnom stadijumu deformacije R -kriva je skoro vertikalna. Pri krtom ponašanju materijala lom se razvija bez dodatnog utroška energije, i za taj slučaj dijagram $J-\Delta a$ predstavlja horizontalnu pravu liniju koja preseca ordinatu na visini J_{Ic} , sl. 3.35 [3.16]. Ta visina odgovara kritičnom utrošku energije koji je potreban za početak razvoja prsline. U početnoj fazi porasta sile i utroška energije, materijal se ponaša plastično i deformacija se iskazuje sa povećanjem otvora postojeće prsline ali ne i napredovanjem iste. Na dijagramu zavisnosti $J-\Delta a$ ovo ponašanje odgovara vrlo strmoj liniji i prestavlja fazu zatupljivanja vrha prsline. Tačka B na dijagramu na sl. 3.35 predstavlja kritičnu tačku i tu dolazi do promene nagiba krive zavisnosti i dalje otvaranje prsline je povezano i sa njenim napredovanjem i porastom dužine. Tačka pregiba (tačka B) u početnoj fazi se uzima kao J_{Ic} , i na osnovu te vrednosti se određuje kritični FIN K_{Ic} .



Slika 3.35. Shematski prikaz tipične J -krive otpornosti za žilav materijal pri stabilnom razvoju prsline

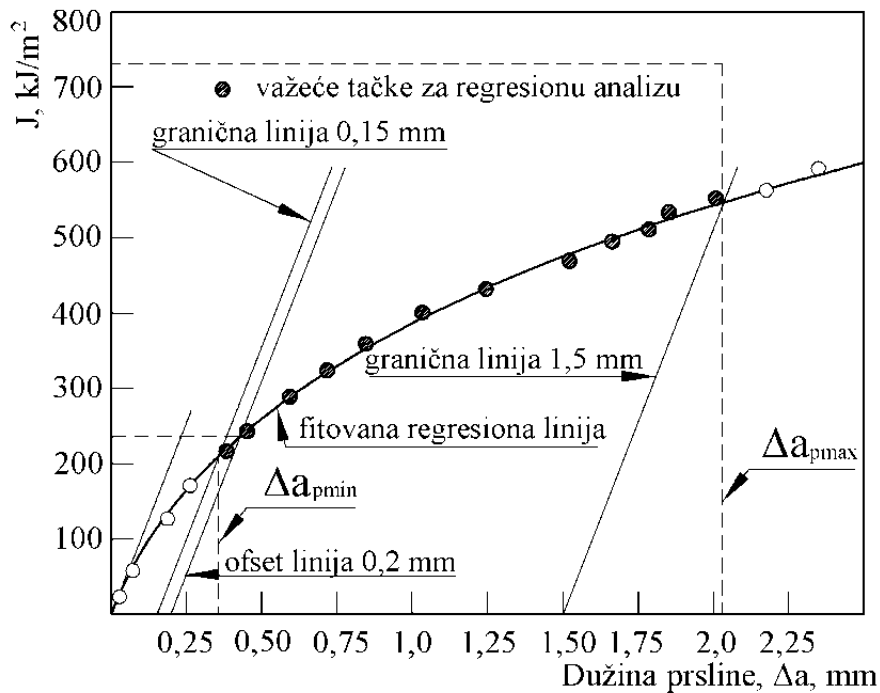
ASTM (American Society for Testing and Materials) je Američko društvo za ispitivanje materijala koje je uspostavilo standardni postupak za dobijanje krivih otpornosti metalnih materijala prema razvoju prsline.. Na unapređenju ovoga standarda rađeno je u okviru evropskog društva za integritet i vek konstrukcija ESIS [3.17]. Neka od rešenja ovog standarda su prihvaćena i primenjena u ovoj disertaciji, a odnose se na određivanje fitovane regresione linije.

Uslov za debljinu epruvete je:

$$B > 25 \frac{J_{IC}}{R_T} \quad (3.9.)$$

gde je:

J_{IC} - kritična vrednost J -integrala, sl. 3.36.



Slika 3.36. Prikaz postupka za izbor merodavnih tačaka za određivanje J_{IC} prema preporukama ESIS [3.17]

Očigledno je da se važenje uslova (3.9) može proveriti tek posle ispitivanja. Isto ograničenje važi i

za dužinu početnog ligamenta, b , odnosno:

$$b = W - a_0, \quad b > \frac{25J_{Ic}}{R_{p0,2}} \quad (3.10.)$$

gdje je:

- W - širina epruvete, mm , i
 a_0 - početna dužina zamorne prsline, mm .

Sledeće ograničenje se odnosi na stvarnu dužinu prsline pri ovom ispitivanju. Potrebno je prvo odrediti liniju zatupljivanja koja predstavlja zakonitost promene J -integrala kada se pri deformaciji ne povećava dužina prsline već se njen vrh zatupljuje kao posledica otvaranja vrha prsline (CTOD). Prividno povećanje dužine prsline za taj slučaj je jednako polovini CTOD. To prividno povećanje dužine prsline Δa definiše liniju zatupljivanja:

$$\Delta d_B = \frac{J}{R_e} = \frac{J}{2R_e} \quad (3.11.)$$

koja prolazi kroz koordinatni početak sistema J - Δa . Paralelno sa linijom zatupljivanja povlače se prave koje presjecaju apscisu (Δa) u tačkama 0,15 mm i 1,5 mm, sl. 3.36. Ove dve prave ograničavaju područje važećih tačaka za veličine J -integrala. Zahteva se da se bar četiri tačke nađu u tom području, pri čemu postoje ograničenja i za njihov međusobni položaj (najmanje jedna od četiri tačke treba da bude na zadovoljavajućem rastojanju od linije zatupljivanja, $\Delta a / 3$).

Zatim se kroz najmanje četiri, važeće tačke povlači regresiona linija najmanjeg kvadratnog odstupanja promene J -integrala sa dužinom prsline Δa . Konačan zahtjev važećeg J_{Ic} je da nagib regresione linije bude ograničen sa:

$$\frac{dJ}{da} < R_{p0,2} \quad (3.12.)$$

Tada nova linija na preseku sa 0,2 mm ofset linijom definiše J_{Ic} , sl. 3.36. Prema tome, cilj ovoga eksperimenta je određivanje kritične vrednosti J -integrala, J_{Ic} , a postupak ispitivanja se ogleda u dobijanju R -krive, odnosno J - Δa krive, koja se sastoji od vrednosti J -integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa .

Određivanje J -integrala je ispitivano je na sobnoj temperaturi od 20°C, i na radnoj temperaturi od 540°C. Za određivanje vrednosti K_{Ic} na sobnoj temperaturi korišćene su standardne C(T) 25 epruvete čija geometrija je definisana standardom [3.15] i data je na sl. 3.32.

Naši eksperimenti su izvođeni metodom ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti jedne epruvete, kako je to definisano standardom [3.15]. Cilj metode popustljivosti sa rasterećenjem je da se registruje veličina razvoja prsline, Δa , koja nastaje tokom ispitivanja. Ispitivanje na sobnoj temperaturi od 20°C je rađeno na servohidrauličkoj kidalici, sl. 3.37, dok je ispitivanje na radnoj temperaturi od 540°C rađeno na elektromehaničkoj kidalici, sl. 3.38.

Kod ispitivanja na sobnoj temperaturi epruveta je bila opremljena COD ekstenzometrom radi registrovanja otvaranja vrha prsline. To nije bio slučaj kod ispitivanja na povišenim temperaturama. Naime, zbog nedostatka ekstenzometra za rad na povišenim temperaturama, otvaranje vrha prsline je registrovano pomoću induktivnog davača, uz prethodno registrovanje kalibracione krive odnosa vrednosti dobijenih na ekstenzometru i induktivnom davaču.



Slika 3.37. Servohidraulička kidalica za ispitivanje J -integrala

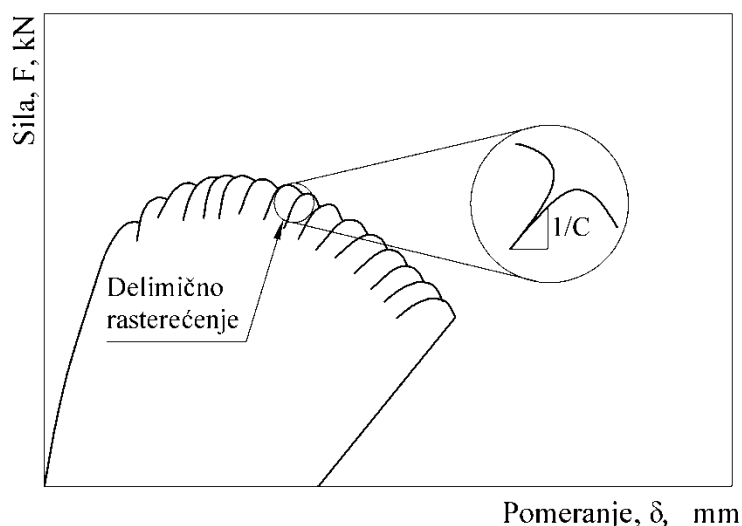


Slika 3.38. Elektromehanička kidalica za ispitivanje J -integrala

Opterećenje se uvodilo malom brzinom, i u konkretnom slučaju brzina uvođenja opterećenja iznosila je 1 mm/min . Opterećenje se uvodilo sa povremenim rasterećivanjima i za to vreme su se A/D konvertorom prikupljali podaci o opterećenju, pomeranju i otvaranju vrha prslina.

Po završetku ispitivanja obeležavala se pozicija prslina nastale zatezanjem ispitivane epruvete. Markiranje položaja prslina se vršilo na dva načina. Epruvete ispitane na sobnoj temperaturi su se bojile zagrevanjem do $200 \text{ }^\circ\text{C}$, a epruvete ispitane na povišenim temperaturama su se naknadno zamarale. Ovo je rađeno radi preciznijeg određivanja ukupne dužine prslina. Potom su se epruvete lomile i na površini preloma su merene početne dužine prslina a_0 i krajnje dužine prslina a_f .

Uočljiva rasterećenja na krivoj sila $F - \delta$, sl. 3.39, služila su za određivanje popustljivosti ispitivane epruvete pri trenutnoj dužini prslina a ($a = a_0 + a_z$).



Slika 3.39. Kriva sila F – otvaranje vrha prsline δ

Iz popustljivosti C_i , koja je predstavljena recipročnom krutošću c_i (krutost je odnos priraštaja sile F i priraštaja otvaranja vrha prsline δ na liniji rasterećenja), određivan je rast dužine prsline preko izraza:

$$\Delta a_i = \Delta a_{i-1} + \left(\frac{b_{i-1}}{\eta_{i-1}}\right) \cdot \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{C_{i-1}}\right) \quad (3.13.)$$

Ovde su:

- a_{i-1} - prethodna dužina prsline;
- $C_i = \text{tg } \alpha_i$ - nagib posmatrane linije rasterećenja;
- $C_{i-1} = \text{tg } \alpha_{i-1}$ - nagib prethodne linije rasterećenja i
- $\eta_{i-1} = 2 + 0.522 b_i/W$ - koeficijent za C(T) epruvete.

J -integral je prema definiciji jednak zbiru elastične i plastične komponente [3.15]:

$$J_{(i)} = J_{el} + J_{pl} \quad (3.14.)$$

Za C(T) epruvete elastična komponenta J -integrala se računa na osnovu izraza [3.15]:

$$J_{el(i)} = \frac{K_i^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \quad (3.15.)$$

gde je:

- K_i - FIN, definisan standardom ASTM E1820;
- ν - Poasonov koeficijent i
- E - modul elastičnosti.

FIN K_i za C(T) epruvete se izračunava na osnovu izraza:

$$K_i = \frac{F_i}{(B \cdot B_N \cdot W)^{1/2}} \cdot f(a_i/W) \quad (3.16.)$$

Geometrijski član $f(a_0/W)$, kod C(T) epruveta se izračunava na osnovu izraza:

$$f(a_i/W) = \frac{(2+a_i/W) \left[0,866+4,64(a_i/W)-13,32(a_i/W)^2 + 14,72(a_i/W)^3 - 5,6(a_i/W)^4 \right]}{(1-a_i/W)^{3/2}} \quad (3.17.)$$

Plastična komponenta J -integrala se računa na osnovu izraza [3.15]:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_i}{b_i} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \times \left[1 - \gamma_i \frac{(a_i - a_{i-1})}{b_i} \right] \quad (3.18.)$$

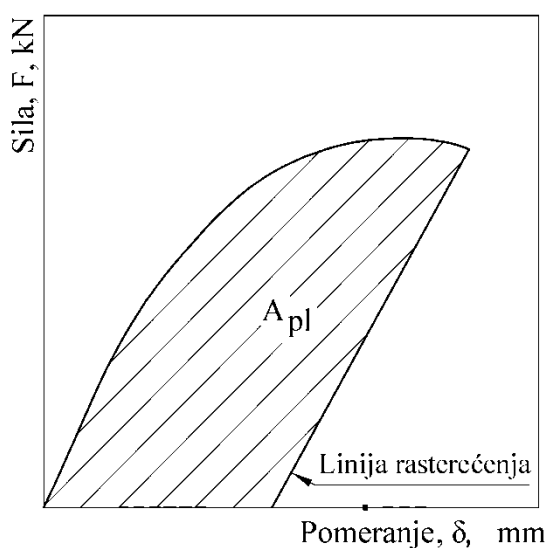
gde je:

A_{pl} - plastična komponenta energije, sl. 3.40;

B_N - neto širina epruvete;

$\eta_i = 2 + 0.522 b_i/W$ - koeficijent za CT epruvete i

$\gamma_i = 1 + 0.76 b_i/W$ - za CT epruvete.



Slika 3.40. Plastična komponenta energije

Plastična komponenta energije $A_{pl(i)}$ izračunava se na osnovu podataka dobijenih sa dijagrama $F - \delta$, sl. 3.40 kao:

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[F_i + F_{i-1}] \cdot [\delta_{pl(i)} - \delta_{pl(i-1)}]}{2} \quad (3.19.)$$

Na osnovu podataka prikupljenih sa kidalice, (davača sile i COD davača), konstruisani su dijagrami sila F - otvaranje vrha prsline δ (CMOD). Pomoću ovih dijagrama dobijamo R -krive, odnosno $J - \Delta a$ krive, koja se sastoji od vrednosti J -integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa , sa koje možemo očitati kritičnu vrednost J -integrala, J_{Ic} .

Poznavajući kritičnu vrednost J_{Ic} može se izračunati vrednost kritičnog FIN ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (3.20.)$$

Uticaj eksploatacionih uslova, odnosno radne temperature na sklonost ka krtom lomu ispitivanog materijala je ocenjivan određivanjem žilavosti loma u uslovima ravne deformacije, odnosno kritične

vrednosti faktora intenziteta napona K_{Ic} . Kritična vrednost FIN K_{Ic} je određena *single specimen* metodom tj. ispitivanjem jedne epruvete sukcesivnim opterećivanjem i rasterećivanjem.

Izračunate vrednosti K_{Ic} su date u tabeli 3.11.

Napominjemo da je u proračunu za žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} korišćena jedna vrednost za modul elastičnosti na sobnoj temperaturi (197 GPa), a druga vrednost za radnu temperaturu (približno 138 GPa za 540 °C).

Primenom osnovne formule mehanike loma:

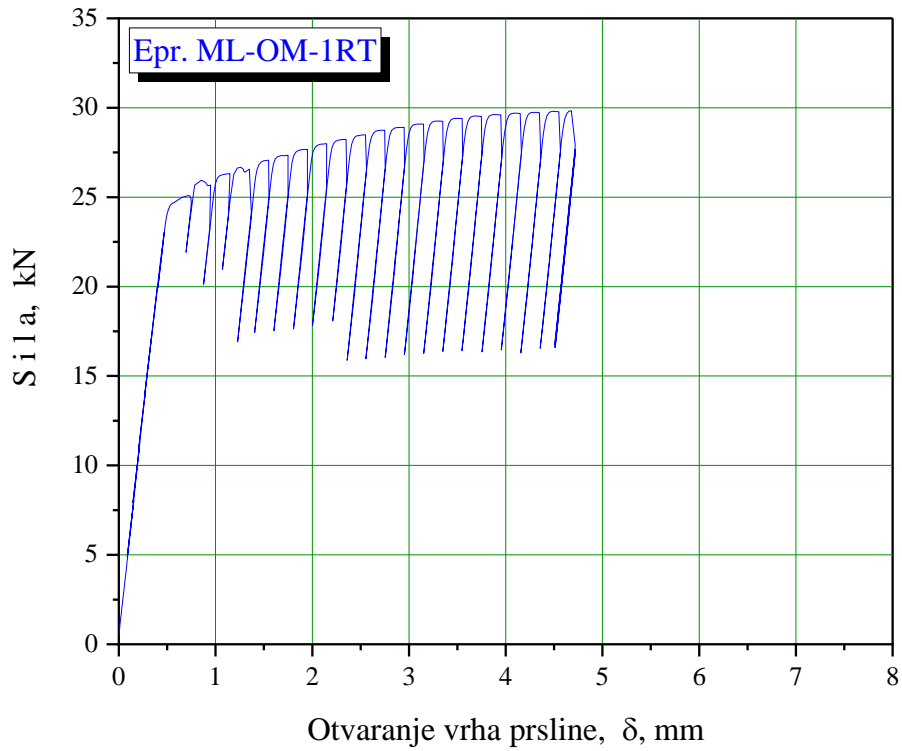
$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad (3.21.)$$

te unošenjem vrednosti konvencionalnog napona tečenja, $\sigma = R_{p0,2}$, mogu se izračunati i približne vrednosti za kritičnu dužinu prslina, a_c .

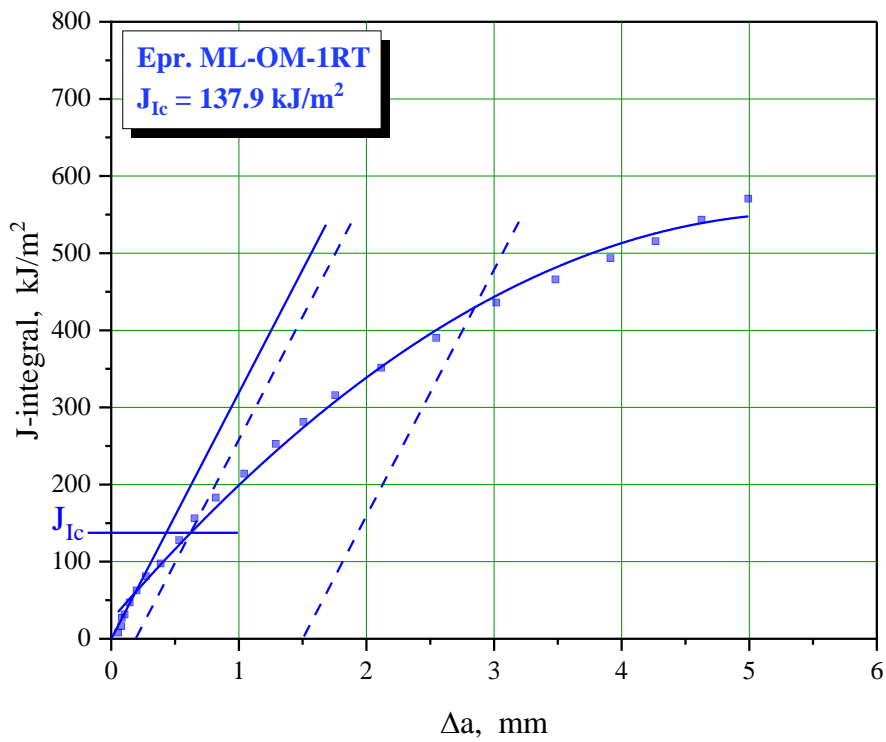
Tabela 3.11. Vrednosti K_{Ic} C(T) epruveta ispitanih na sobnoj (RT) i povišenoj (HT) temperaturi

Oznaka epruvete	J_{Ic} , kJ/m ²	Srednja vrednost J_{Ic} , kJ/m ²	K_{Ic} , MPa√m	Srednja vrednost K_{Ic} , MPa√m	a_c , mm	Srednja vrednost a_c , mm
ML-OM-1RT	137,9	140	172,8	174	72,2	73
ML-OM-2 RT	147,4		178,6		77,1	
ML-OM-3 RT	134,1		170,4		70,2	
ML-OM-1 HT	63,1	65	97,8	99	67,2	69
ML-OM-2 HT	58,9		94,5		62,7	
ML-OM-3HT	71,6		104,2		76,2	

Karakteristični dijagrami $F - \delta$, i $J - \Delta a$ za epruvete uzorkovane iz ispitivanog materijala su dati na sl. 3.41 do 3.43 za epruvete ispitane na RT, i na sl. 3.44 do 3.46 za epruvete ispitane na HT.

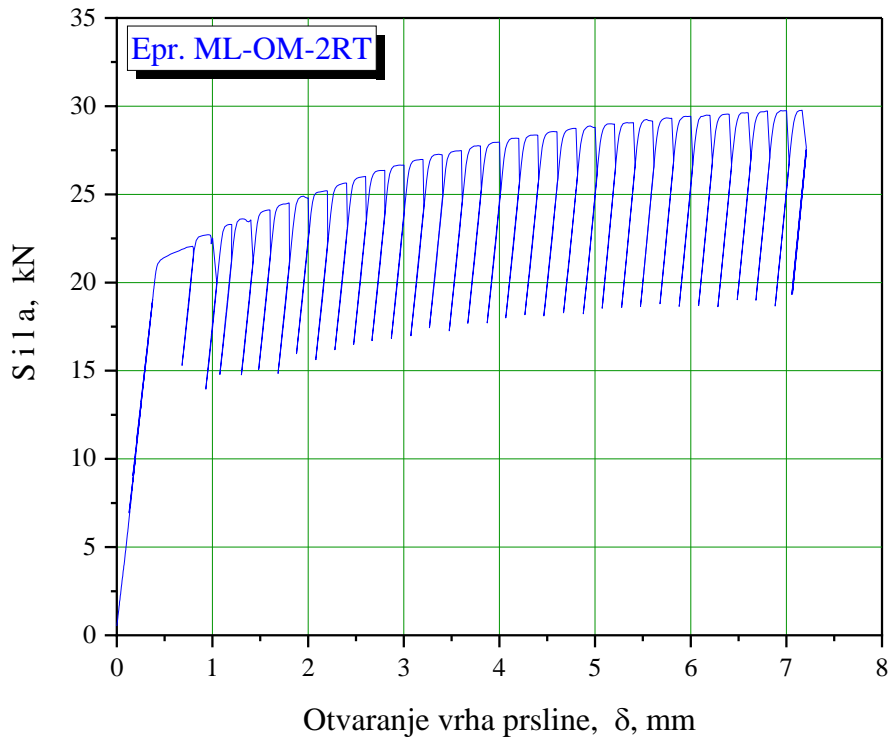


(a)

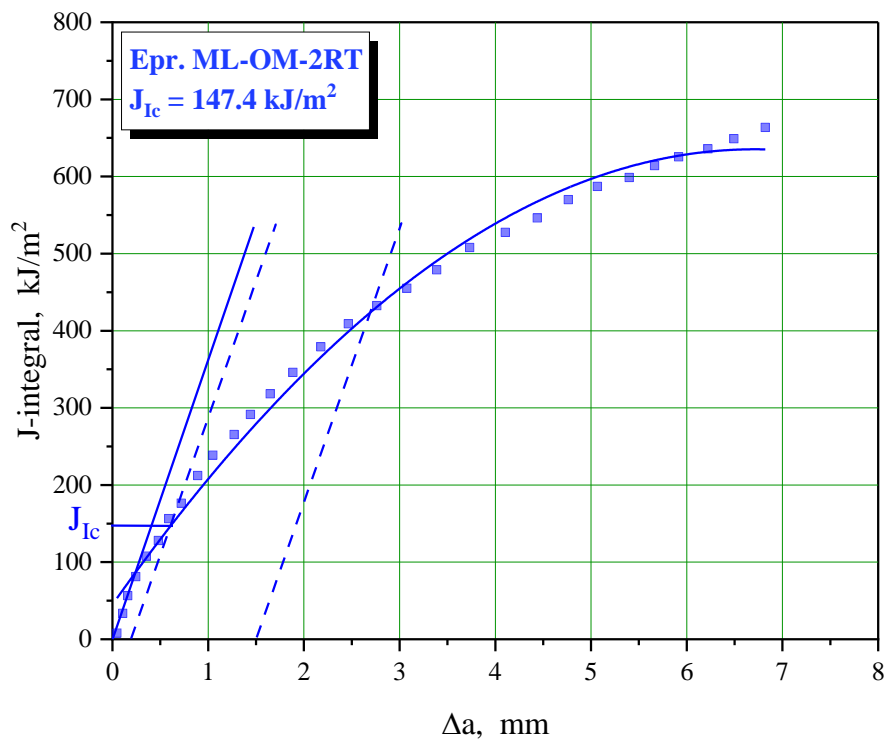


(b)

Slika 3.41. Dijagrami za eprvetu ispitanu na 20 °C oznake ML-OM-1RT
(a) $F - \delta$ i (b) $J - \Delta a$

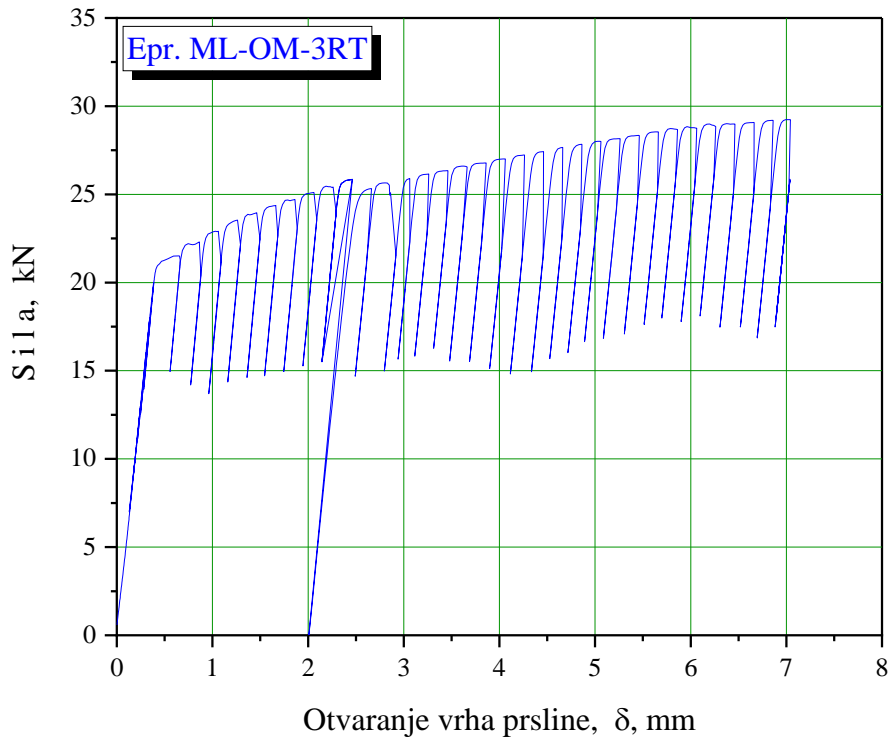


(a)

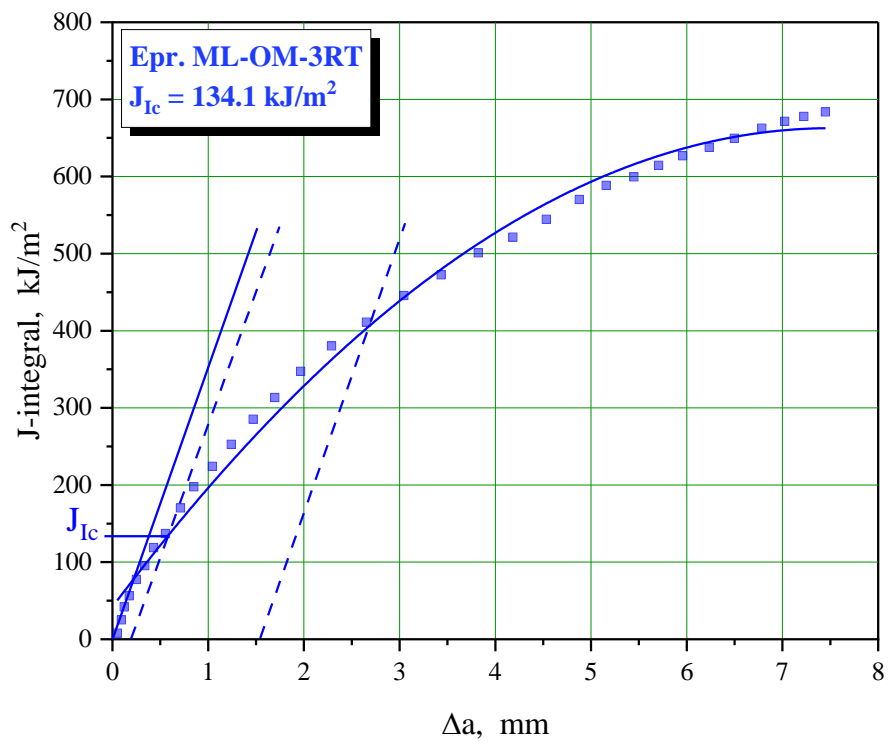


(b)

**Slika 3.42. Dijagrami za eprvetu ispitanu na 20 °C oznake ML-OM-2RT
(a) $F - \delta$ i (b) $J - \Delta a$**

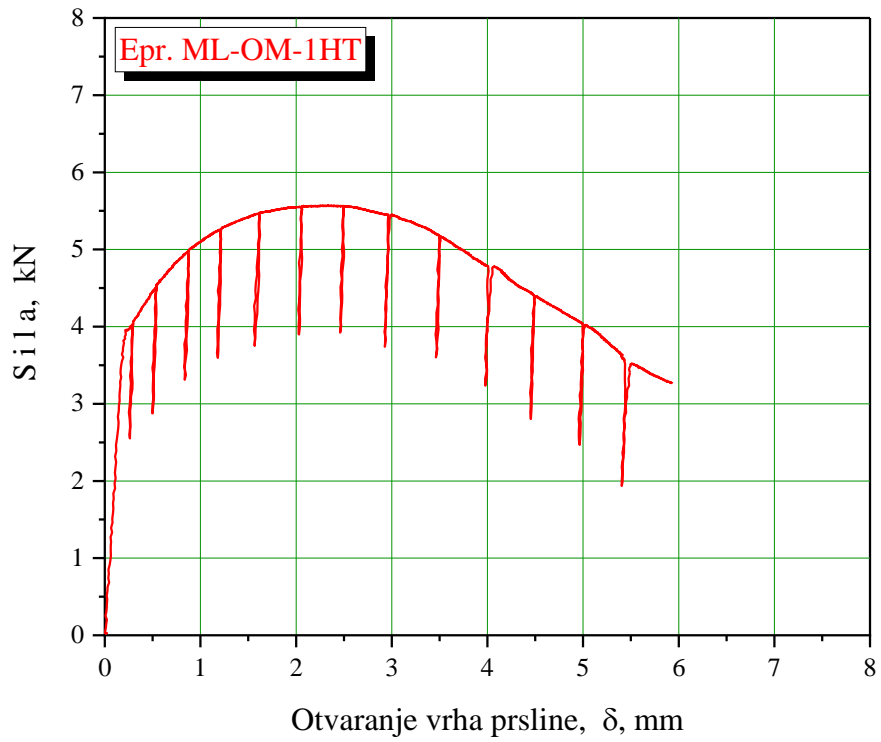


(a)

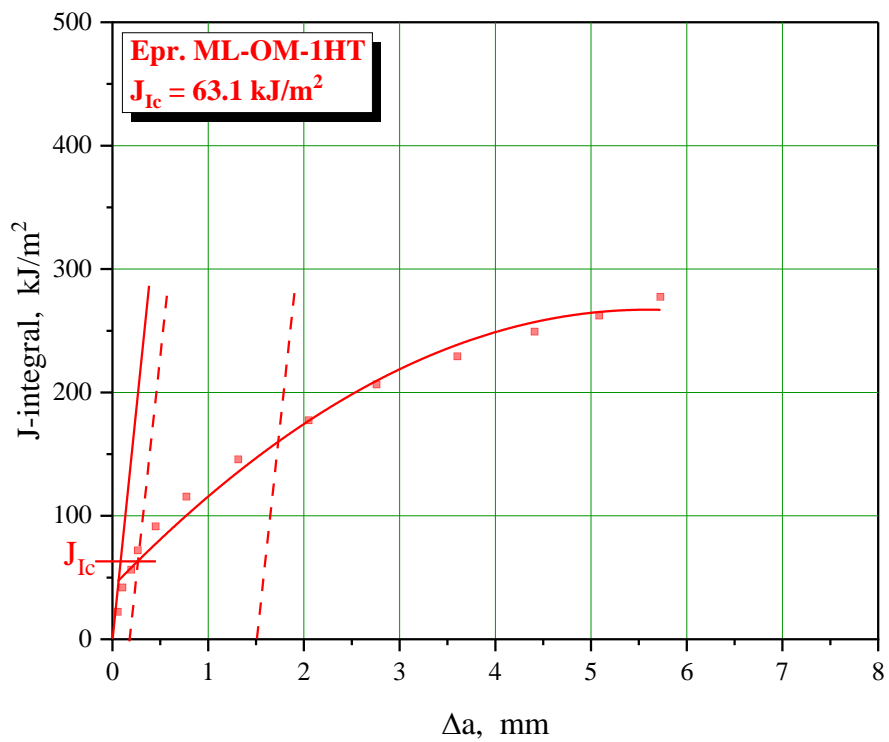


(b)

Slika 3.43. Dijagrami za eprvetu ispitanu na 20 °C oznake ML-OM-3RT
(a) $F - \delta$ i (b) $J - \Delta a$

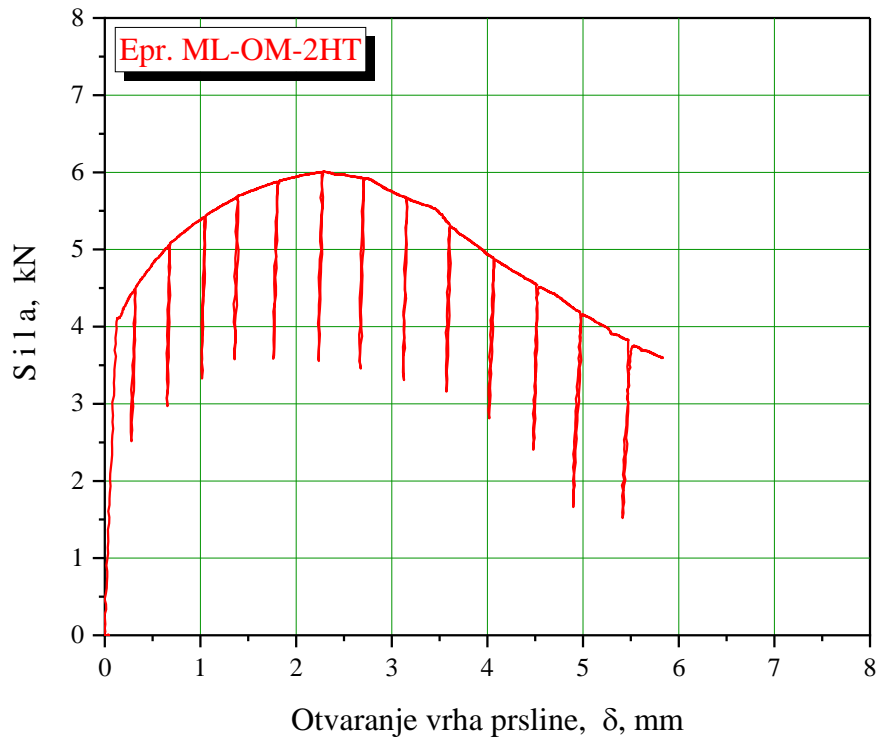


(a)

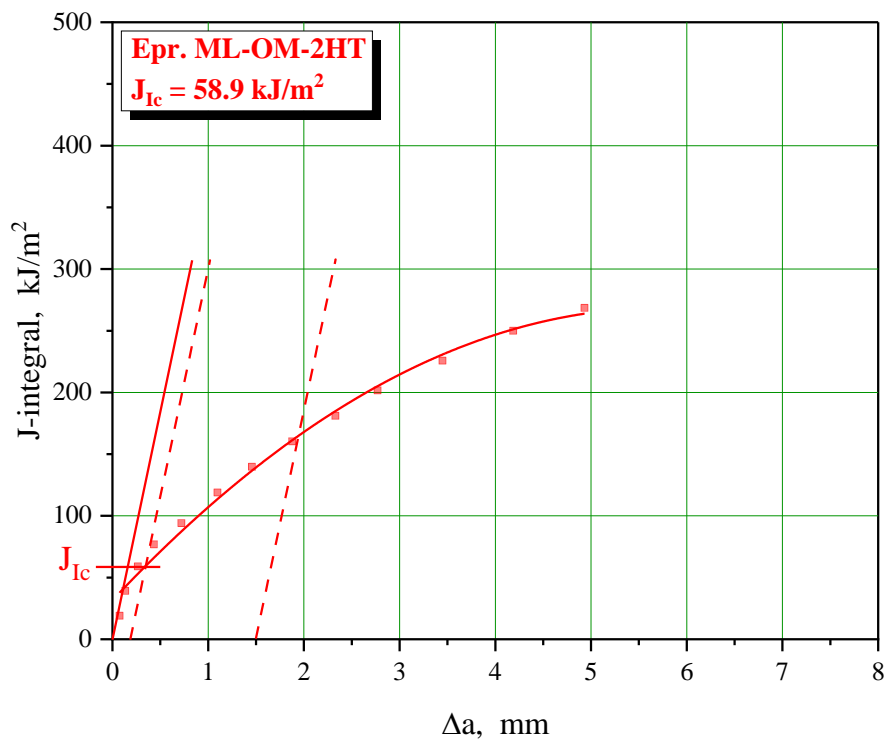


(b)

**Slika 3.44. Dijagrami za epruvetu ispitanu na 540 °C oznake ML-OM-1HT
(a) $F - \delta$ i (b) $J - \Delta a$**

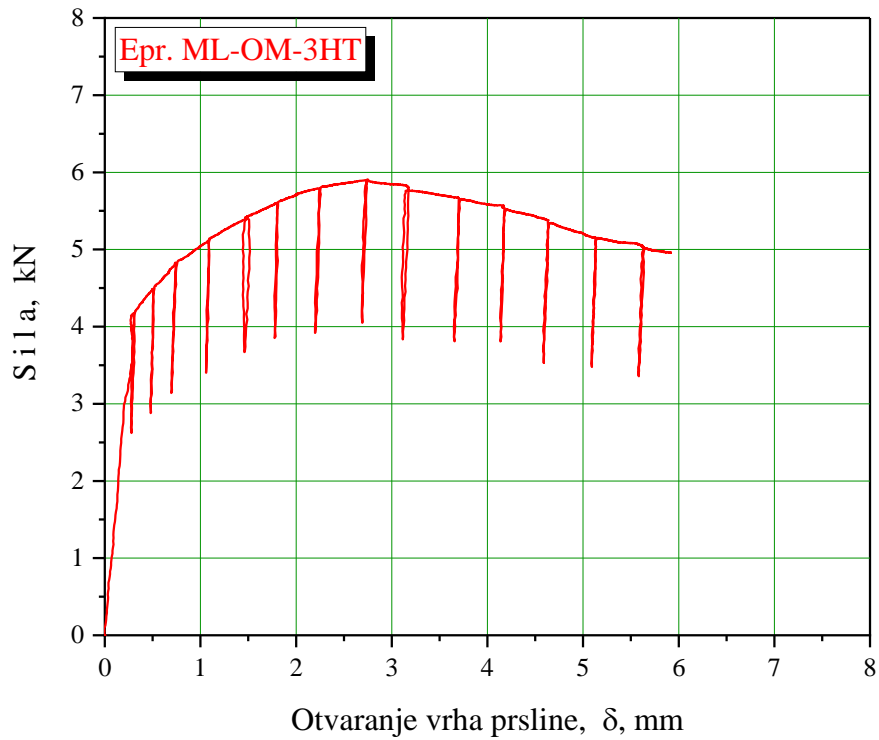


(a)

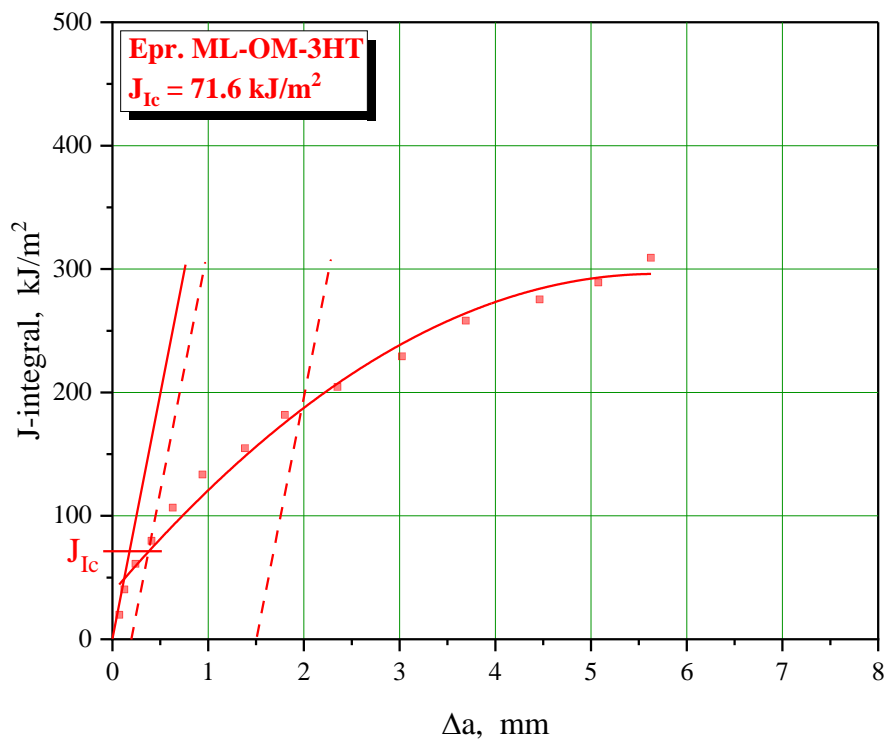


(b)

**Slika 3.45. Dijagrami za epruvetu ispitanu na 540 °C oznake ML-OM-2HT
(a) $F - \delta$ (b) $J - \Delta a$**



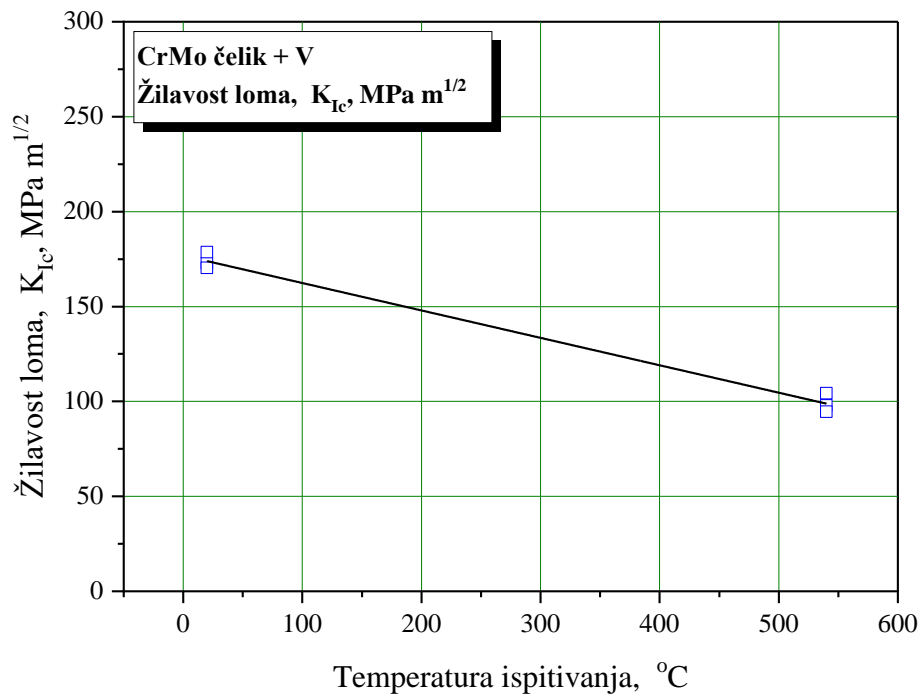
(a)



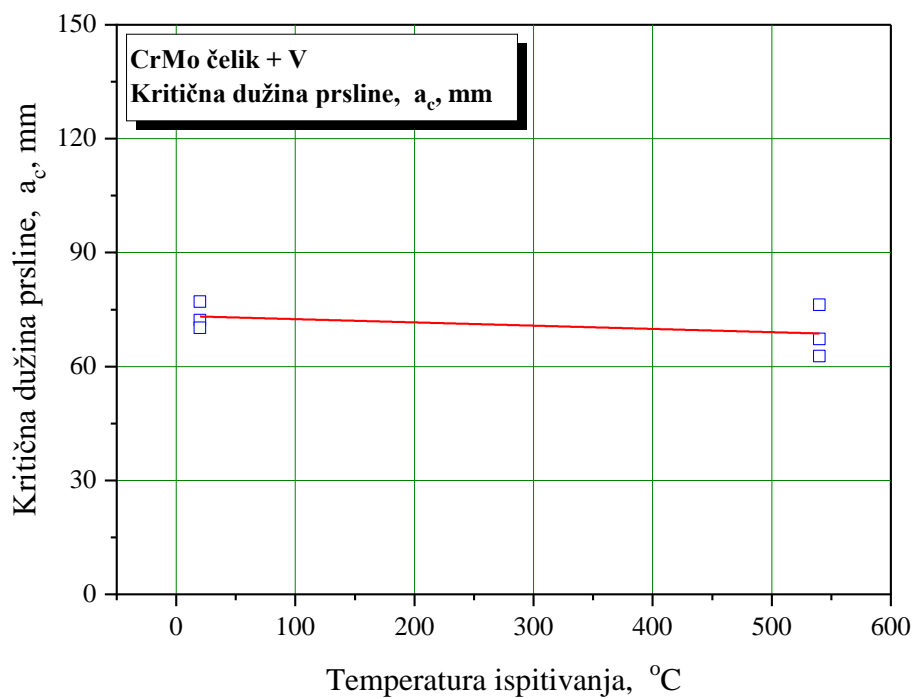
(b)

**Slika 3.46. Dijagrami za eprvetu ispitanu na 540 °C oznake ML-OM-3HT
(a) $F - \delta$ i (b) $J - \Delta a$**

Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} za eprvete uzorkovane iz cevi od ispitivanog čelika za rad na povišenim temperaturama, grafički je prikazan na sl. 3.47, a uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritične dužine prsline a_c , je grafički prikazan na sl. 3.48.



Slika 3.47. Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja



Slika 3.48. Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja

3.7. Određivanje parametara rasta zamorne prsline

Analizom brojnih preloma mašinskih delova koji su u dužem vremenskom periodu bili izloženi naizmenično promenljivom opterećenju, ustanovljeno je da radni naponi nisu prelazili vrednosti napona tečenja materijala, odnosno naponi su ostajali u linearno elastičnom području. Rast prsline pod uticajem promenljivih opterećenja koja su manja od opterećenja kvazistatičkog loma može da se nazove **zamor materijala**. Najveći broj oštećenja i ispada iz pogona delova i konstrukcija tokom eksploatacije se događa kao posledica zamora materijala, što iziskuje pojavu greške tipa prsline. U nizu situacija oštećenja se mogu pripisati stanju materijala, ali su mnoga oštećenja posledica loših konstrukcijskih rešenja. To znači da sklonost ka zamoru nekod dela mašine ili konstrukcije ne zavisi samo od izdržljivosti na zamor materijala od koje je deo izrađen već i od njegove geometrije [3.16].

Greške u metalima i razni oblici koncentratora napona (zarezi, žljebovi, otvori, zavareni i mehanički spojevi) u elementima konstrukcija se ne mogu izbeći. Zbog toga se period do stvaranja zamorne prsline N_s , sa stanovišta ukupnog veka zamora, do pojave loma N_f , može zanemariti. S obzirom da se na brzinu rasta makroskopske prsline ne može uticati promenom strukture, to preostaje da se za dati materijal epruvete ili elementa odredi brzina rasta prsline u laboratorijskim uslovima i da se, nakon što se povremenim kontrolnim pregledima odredi veličina prsline, proceni preostali vek dela mašine ili konstrukcije. Mogućnost za ovu procenu pružaju postavke LEML [3.16].

Koncept LEML se može primeniti i za određivanje rasta prsline pri zamoru [3.17]. Teoretska potvrda je bazirana na takozvanom konceptu sličnog ponašanja kada su uslovi na vrhu prsline jednoznačno definisani samo preko jednog parametra opterećenja kao što je $FIN K$. Za slučaj stacionarne prsline to znači da će do loma dve različite konfiguracije izrađene od istog materijala doći pri istoj, kritičnoj, vrednosti K -faktora, K_c . Pod određenim uslovima se K -faktor može primeniti i za opisivanje rasta prsline usled zamora.

Osnovni napredak koji je mehanika loma napravila u sferi zamora materijala je u analitičkom raščlanjivanju fenomena loma usled zamora na period stvaranja, u kome zamorna prsline nastaje, i potom na period rasta ili širenja te prsline u kome se ona povećava do kritične veličine pri kojoj dolazi do naglog loma. Time se ukupan broj ciklusa, N_u , posle koga dolazi do loma, deli na broj ciklusa potrebnih da zamorna prsline nastane, N_s , i broj ciklusa da ona poraste do kritične veličine za lom, $N_{\bar{s}}$, odnosno:

$$N_u = N_s + N_{\bar{s}} \quad (3.22.)$$

Razvoj u proučavanju ponašanja materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja je omogućen paralelnim uvođenjem eksperimentalnog i teorijskog pristupa, jer samo teorijski pristup ne može da potpuno objasni nastanak i rast zamorne prsline. Danas se intenzivno istražuje koji sve faktori utiču na zavisnost $da/dN = f(\Delta K)$, u oblasti niskocikličnog zamora, kada se u petlji histerezisa jednog ciklusa uspostavlja plastična deformacija. Analiza stanja napona i deformacija na vrhu rastuće zamorne prsline postupcima LEML je dovela do formulisanja Parisove jednačine za sve metale i legure, koja dovodi u vezu brzinu rasta zamorne prsline sa opsegom FIN na vrhu prsline [3.18,3.19]:

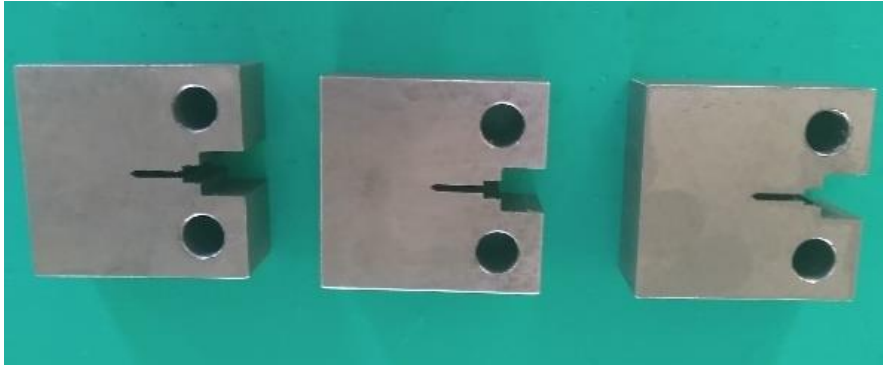
$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (3.23.)$$

Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora ΔK_{th} , i velikih brzina K_{Ic} , veliki linearni srednji deo krive pokriven Parisovom jednačinom se sa praktične tačke gledišta pokazao daleko najvažnijim jer istovremeno dopušta da se napravi razlika između stvaranja i rasta zamorne prsline. Primena Parisove jednačine se pokazala naročito plodonosnom u području zamora konstrukcija izrađenih od materijala povišene i visoke čvrstoće.

Kako konstrukcija pod određenim uslovima neće biti ugrožena dok prsline ne dostigne kritičnu veličinu, može se, uz prethodne analize, dopustiti eksploatacija konstrukcije sa prsline i u periodu

rasta prsline. Bitan podatak za odluku o daljoj eksploataciji je poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od delujućeg opterećenja. Standard ASTM E647-15e1, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates" propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline da/dN , koja se razvija iz postojeće prsline i proračun opsega FIN, ΔK , što znači da epruveta treba da ima zamornu prslinu.

Za određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} na sobnoj temperaturi korišćena je standardna CT-50 epruveta (širina epruvete $W = 50\text{mm}$), prikazana na sl. 3.49.



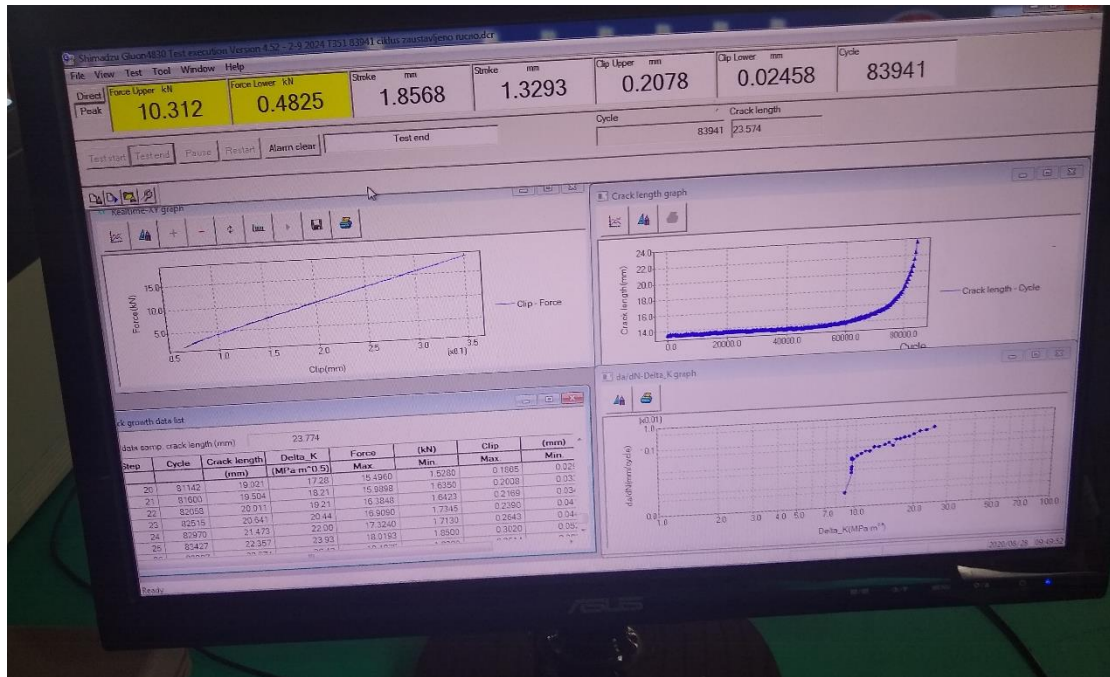
Slika 3.49. Epruvete za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline na sobnoj temperaturi

Ispitivanja kojim su određene brzine rasta zamornih prsline da/dN i pragovi zamora ΔK_{th} , urađena su na servohidrauličkoj kraljici SHIMADZU SERVOPULSER prikazanoj na sl. 3.50. Ispitivanje je rađeno u kontroli rasta prsline. Ovaj servohidraulički sistem ostvaruje sinusoidalno jednosmerno promenljivo opterećenje u opsegu od -100 do $+100\text{ kN}$.



Slika 3.50. Savremeni servohidraulički sistem za dinamička ispitivanja

Uređaj je sastavni deo merno-akvizicionog sistema kojim je omogućena automatizacija merenja i direktno prikupljanje i obrada dobijenih podataka, sl. 3.51. Ispitivanje je obavljeno pri koeficijentu asimetrije ciklusa $R = 0,1$. Definisana učestalost je bila 15 Hz , uz tačnost registrovanja srednjeg opterećenja i njegove amplitude od $\pm 10\text{ N}$.



Slika 3.51. Prikaz ekrana sa kontrolom merenja i obradom rezultata

Ispitivanje na temperaturi od 540 °C, a u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na modifikovanim C(T) epruvetama prikazanim na sl. 3.52, na elektromehaničkoj kidalici. Ispitivanje je rađeno u kontroli hoda. Zbog što potpunije ocene ponašanja materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja, a imajući u vidu dimenzije epruvete, rađen je kritični slučaj delovanja promenljivog opterećenja, i to pozitivno promenljivo opterećenje sa faktorom asimetrije ciklusa $R=0,1$.



Slika 3.52. Modifikovana C(T) epruveta za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline na povišenoj temperaturi

Određivanje zavisnosti brzine rasta zamorne prsline po ciklusu da/dN i opsega FIN ΔK se svodi na određivanje koeficijenta C i eksponenta m u jednačini Parisa. Brzini rasta zamorne prsline treba za trenutnu dužinu prsline, a , pripisati opseg FIN, ΔK , koji zavisi od geometrije epruvete i dužine prsline, i od opsega promenljive sile, $\Delta F = F_g - F_d$. Za određivanje opsega FIN koristi se formula:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B\sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad (3.24.)$$

Ovde su:

L – raspon oslonaca, mm

B – debljina epruvete, mm

W – širina (visina) epruvete, mm

a – dužina prsline, mm

Geometrijski član $f(a/W)$ dat je izrazom (3.25):

$$f(a/W) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \quad (3.25.)$$

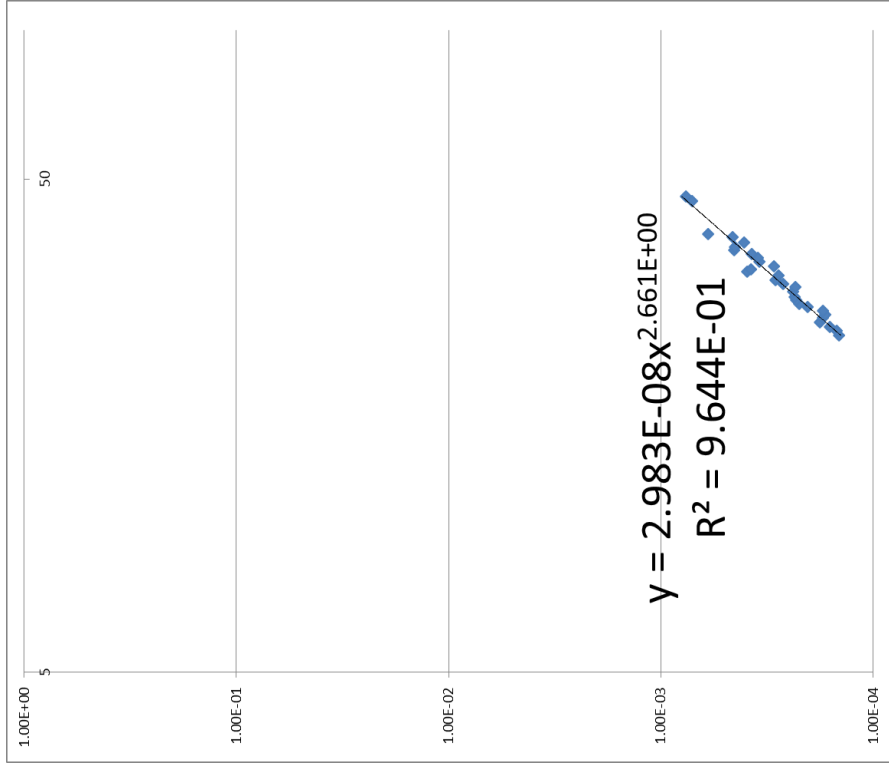
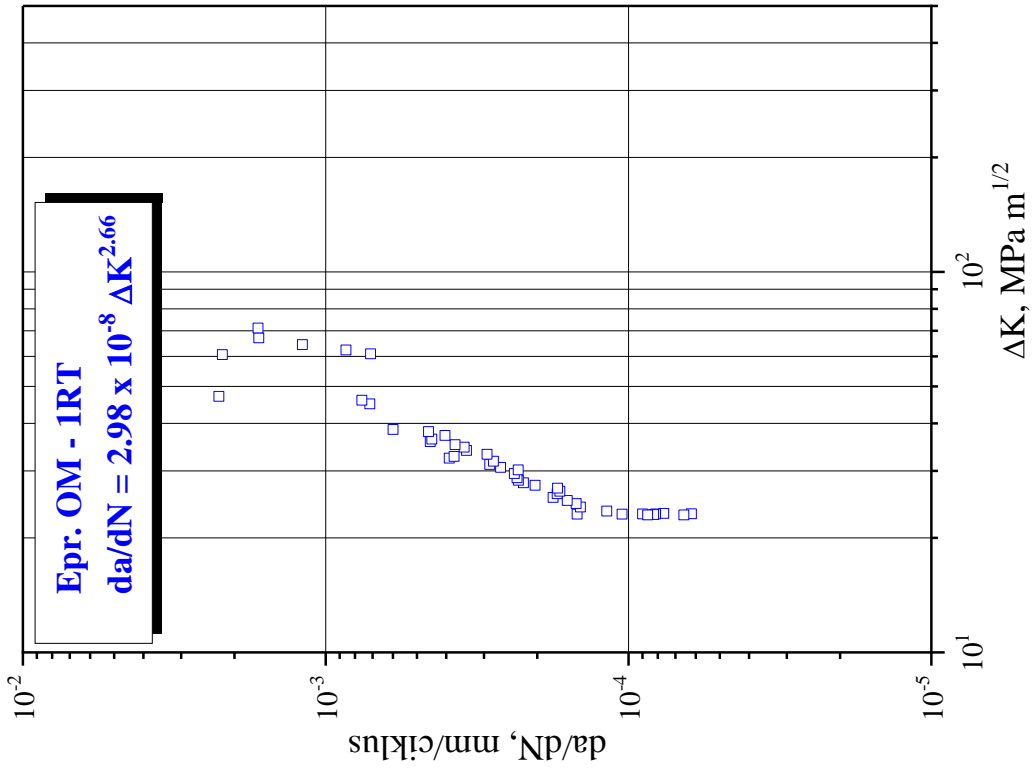
Uticaj temperature na parametre rasta zamorne prsline je analiziran ispitivanjem OM legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranim vanadijumom.

U zavisnosti od primenjenog promenljivog opterećenja iskazanog kroz promenu opsega FIN , ΔK , crtaju se krive u dvostrukim logaritamskim koordinatama ($\log da/dN - \log(\Delta K)$). Ispitivanjem na epruvetama sa vrhom prsline u OM dobijene su vrednosti sledećih parametara Parisove jednačine: koeficijenta C i eksponenta m , praga zamora ΔK_{th} , i brzina rasta zamorne prsline, da/dN , pri vrednosti $\Delta K = 25 \text{ MPa} m^{1/2}$. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3.12.

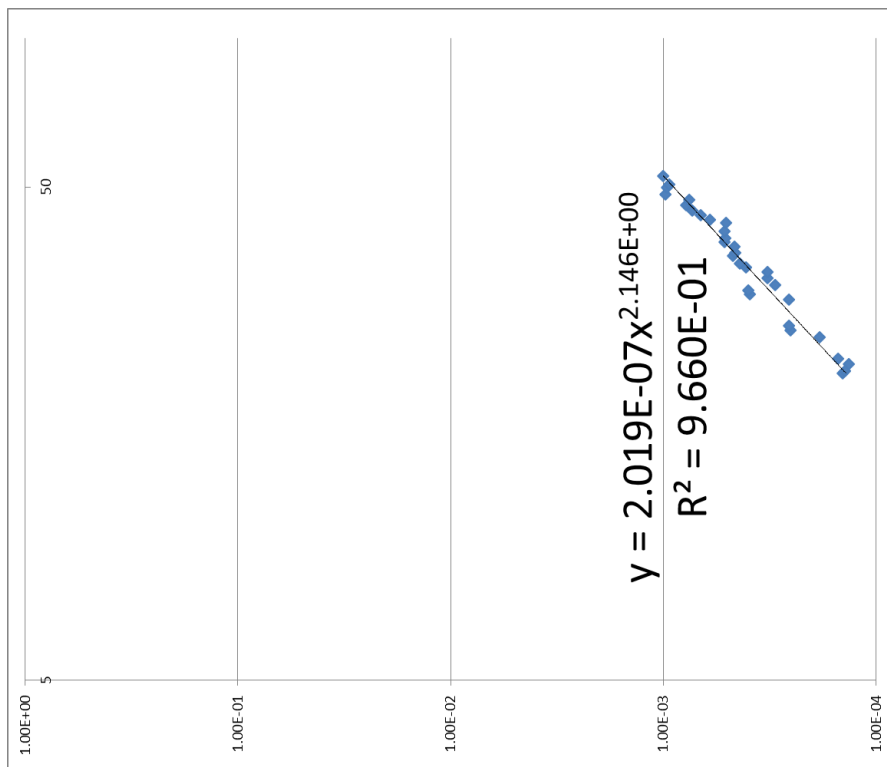
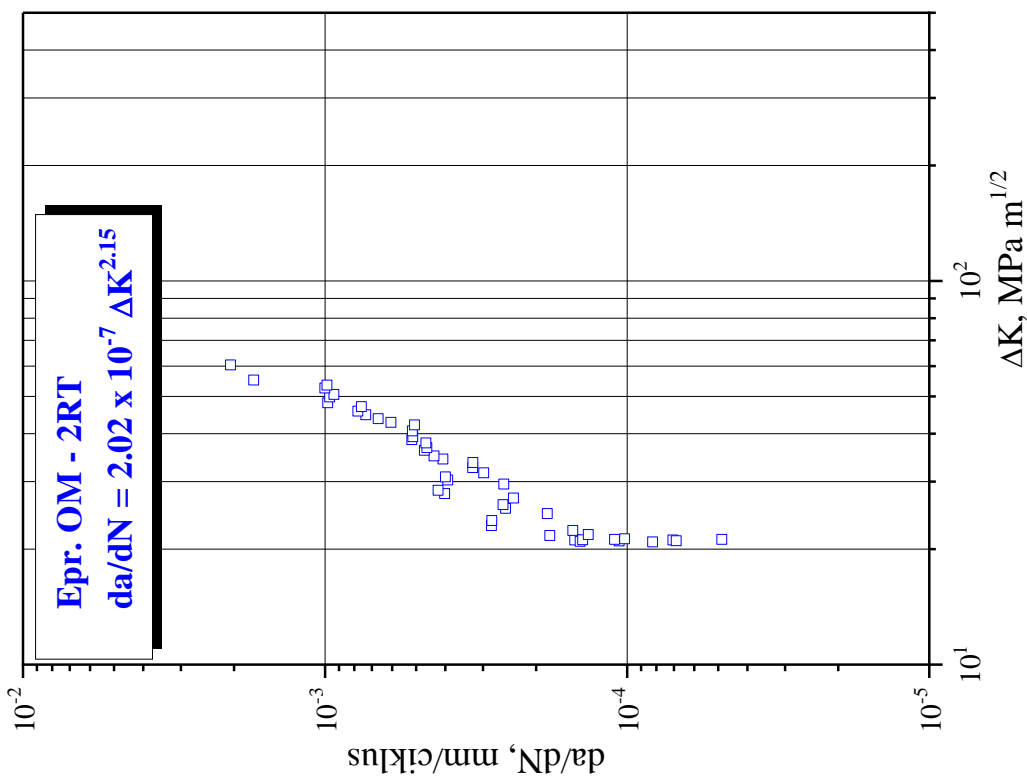
Tabela 3.12. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u OM

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora ΔK_{th} , $\text{MPa}\sqrt{m}$	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN , $\mu\text{m/cikl}$, pri $\Delta K=25 \text{ MPa}\sqrt{m}$
Epr. OM-1RT	20	23,2	$2,98 \cdot 10^{-8}$	2,66	$0,253 \cdot 10^{-3}$
Epr. OM-2RT		20,4	$2,02 \cdot 10^{-7}$	2,15	$0,303 \cdot 10^{-3}$
Epr. OM-3 RT		19,7	$7,33 \cdot 10^{-7}$	1,85	$0,396 \cdot 10^{-3}$
Epr. OM-1 HT	540	16,3	$1,44 \cdot 10^{-6}$	2,34	$2,69 \cdot 10^{-3}$
Epr. OM-2 HT		15,5	$7,51 \cdot 10^{-6}$	1,89	$3,29 \cdot 10^{-3}$
Epr. OM-3HT		15,1	$4,77 \cdot 10^{-6}$	2,05	$3,50 \cdot 10^{-3}$

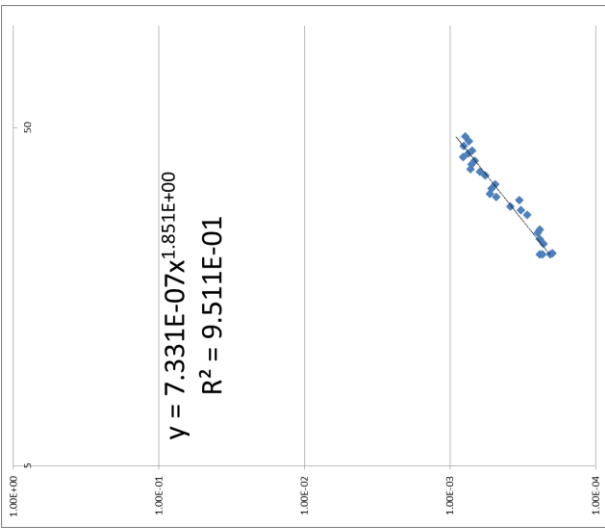
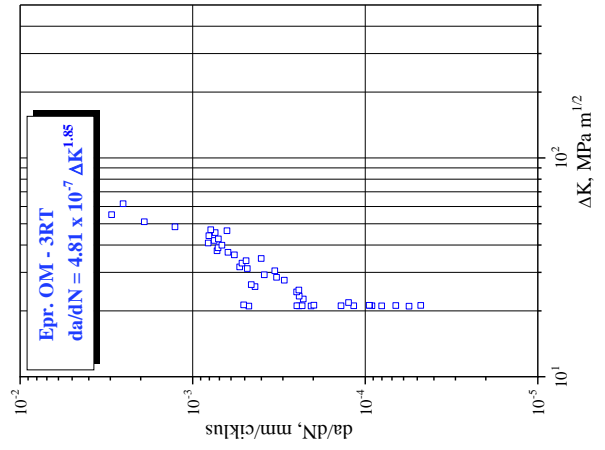
Karakteristični dijagrami brzina rasta zamorne prsline, $da/dN - \Delta K$, za epruvete sa vrhom zamorne prsline u OM i ispitane na sobnoj temperaturi su dati na sl. 3.53 do 3.55, a na temperaturi od 540 °C prikazani su na sl. 3.56 do 3.58.



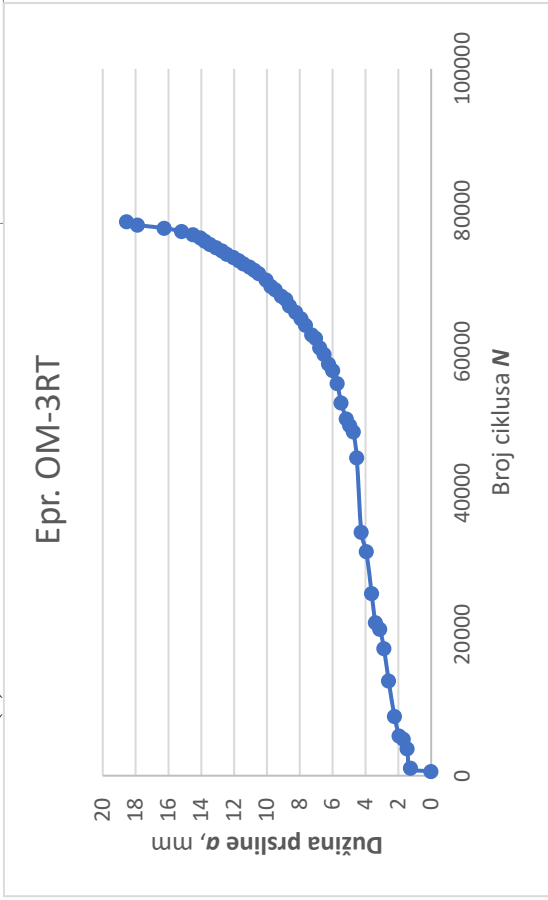
Slika 3.53. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK epruvete OM – 1RT



Slika 3.54. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK epruvete OM – 2RT

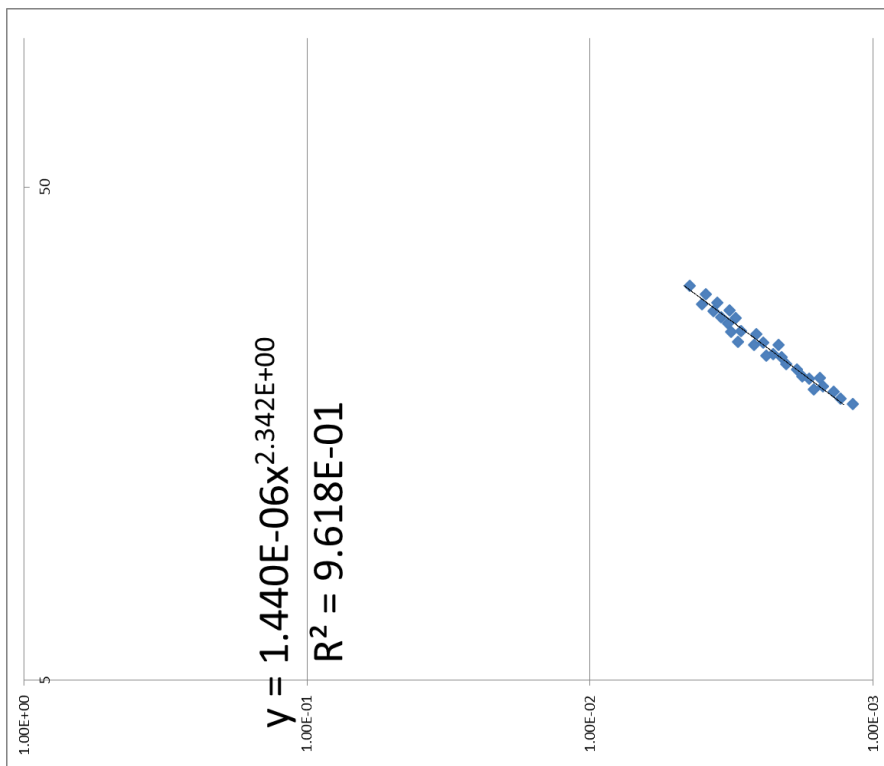
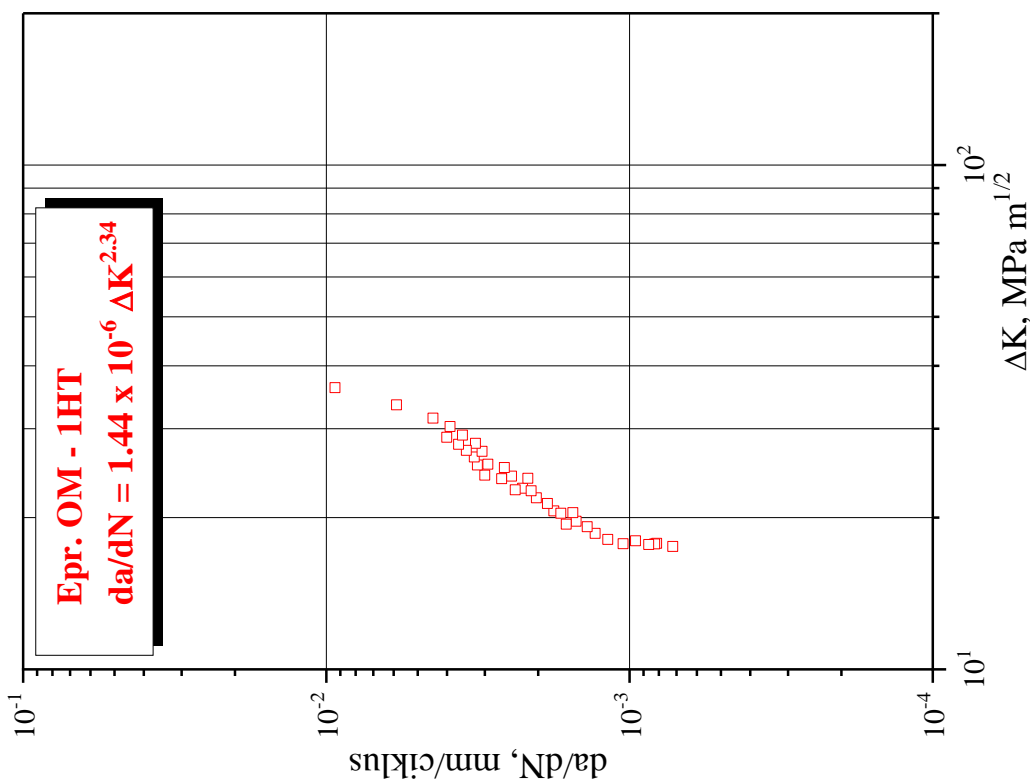


(a)

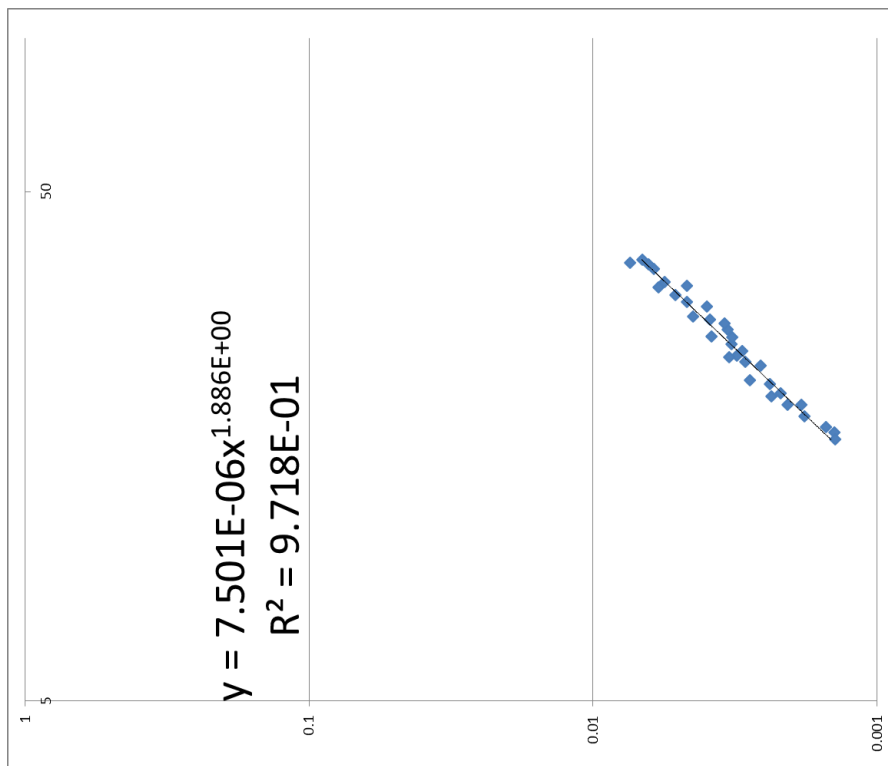
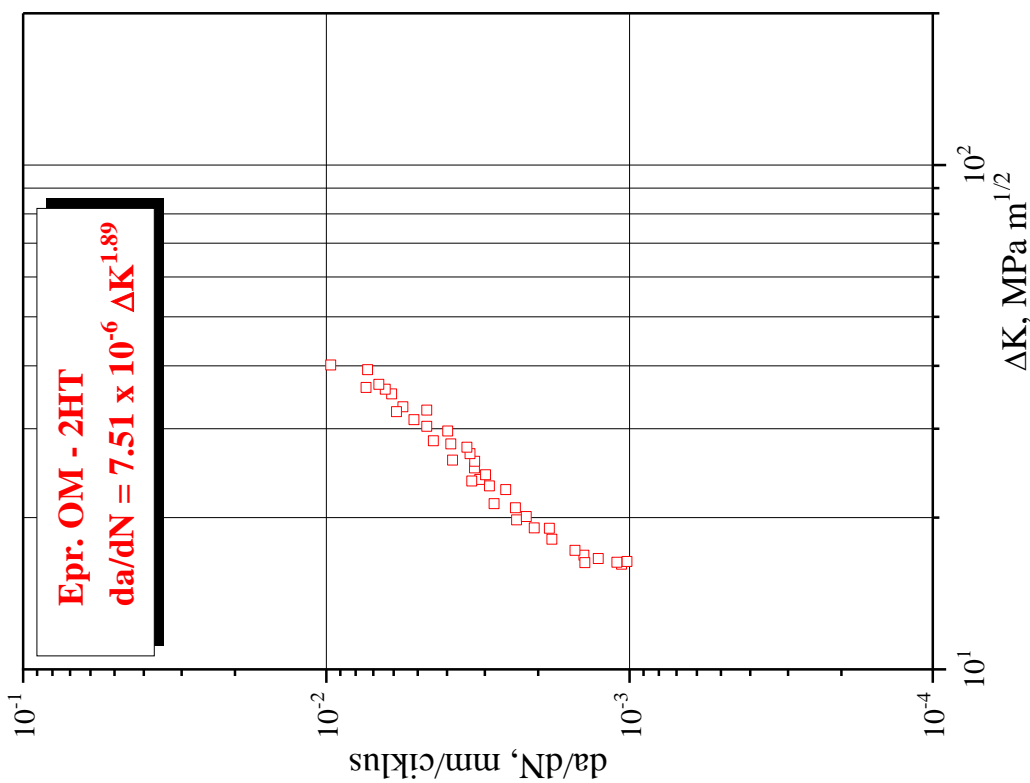


(b)

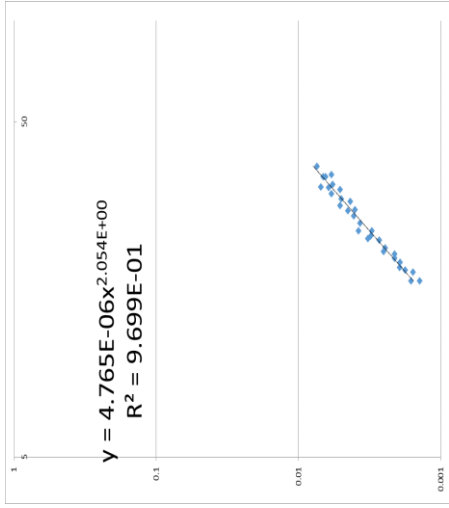
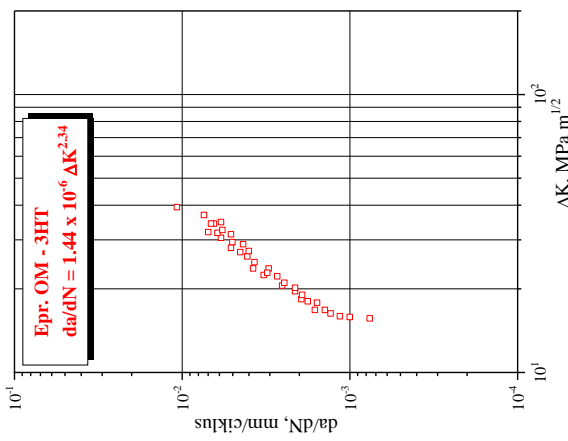
Slika 3.55. Dijagrami zavisnosti: (a) da/dN - ΔK i (b) a - N za epruvetu OM-3RT



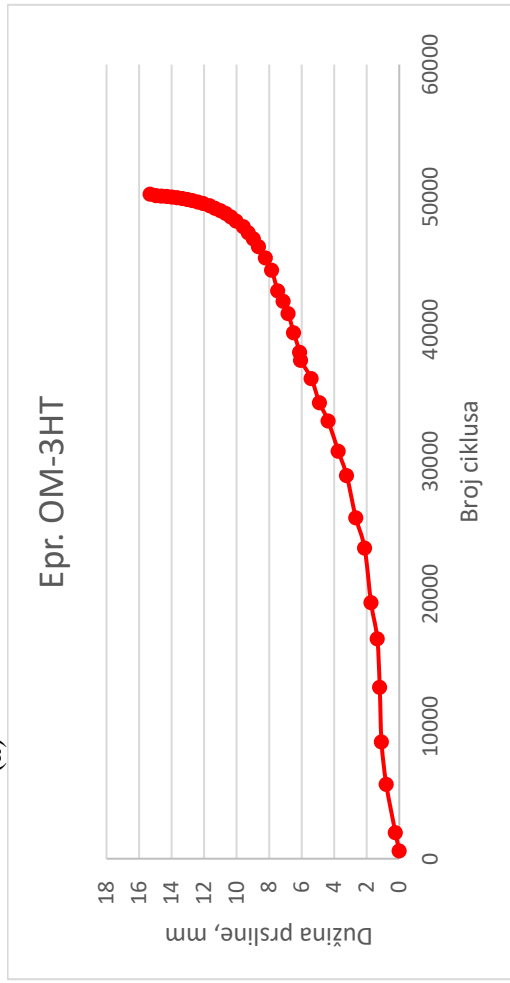
Slika 3.56. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK epruvete OM – 1HT



Slika 3.57. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK epruvete OM – 2HT



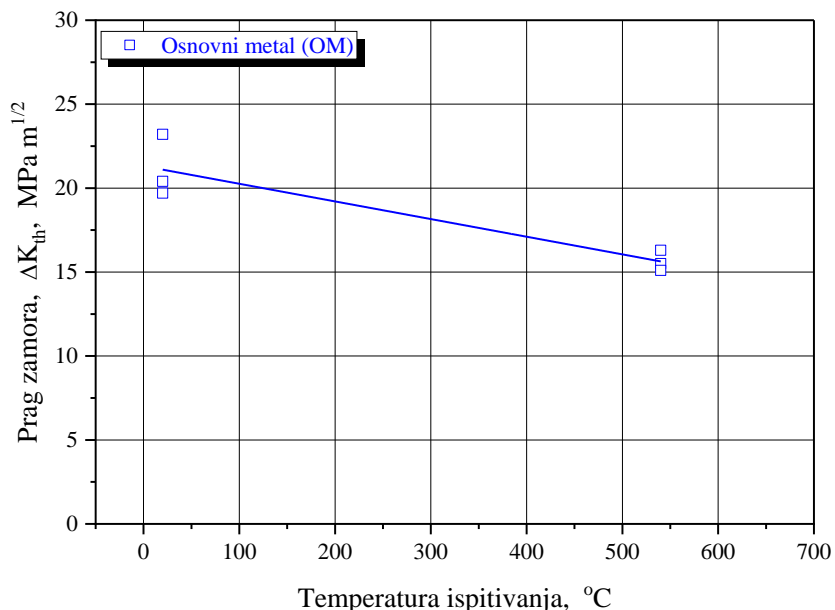
(a)



(b)

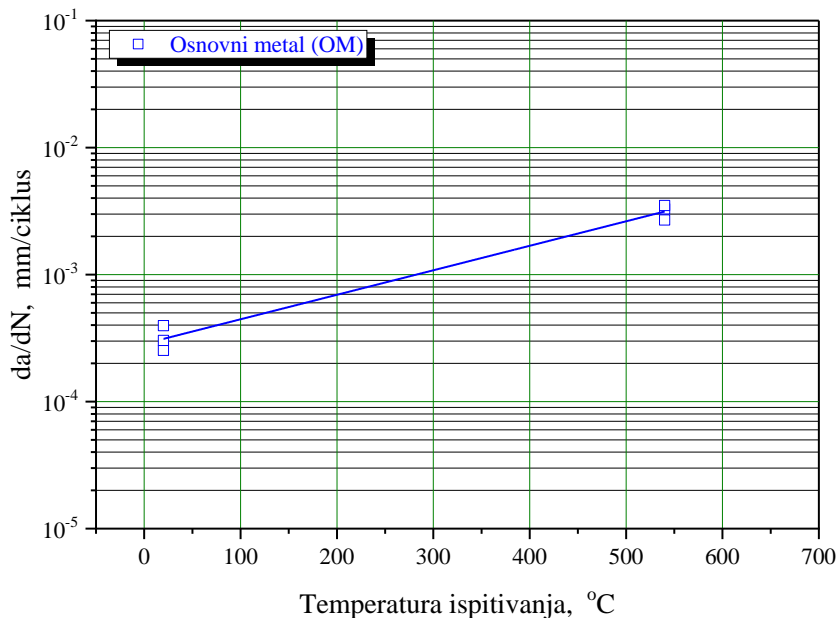
Slika 3.58. Dijagrami zavisnosti: (a) $da/dN - \Delta K$ i (b) $a - N$ epruvete OM – 3HT

Uticaj mesta postavljanja zarezova i inicijacije prsline, kao i temperatura ispitivanja, imaju odlučujući uticaj na vrednosti praga zamora ΔK_{th} . Za epruvete sa vrhom zamorne prsline u OM legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranim vanadijumom, to je grafički prikazano na sl. 3.59.



Slika 3.59. Promena vrednosti ΔK_{th} kod OM sa porastom temperature ispitivanja

Uticaj temperature ispitivanja na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , kod epruveta sa zarezom u OM legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranim vanadijumom, je grafički prikazan na sl. 3.60.



Slika 3.60. Promena vrednosti da/dN sa porastom temperature ispitivanja kod epruveta sa zarezom u OM

3.8. Metalografska ispitivanja

Metalografskim ispitivanjima se dobijaju važne informacije o mikrostrukturi materijala, kao što su prisutne faze u strukturi i veličina zrna, a koje imaju važan uticaj na osobine ispitivanog materijala.

3.8.1. Optička mikroskopija

Metalografska ispitivanja novog, neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, su rađena u Laboratoriji za konstrukcione i tehničke materijale VTI Žarkovo na optičkom mikroskopu LEITZ - METALLOPLAN. Uzorci za metalografsko ispitivanje su pripremljeni finim brušenjem, poliranjem i nagrizanjem površine 3% NITALOM. Oprema za pripremu uzoraka i metalografska ispitivanja je prikazana na sl. 3.61.



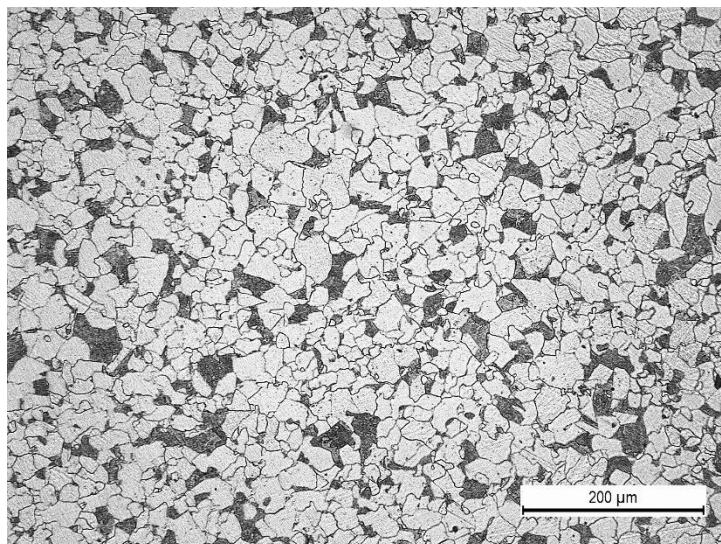
(a) uređaj za poliranje uzoraka



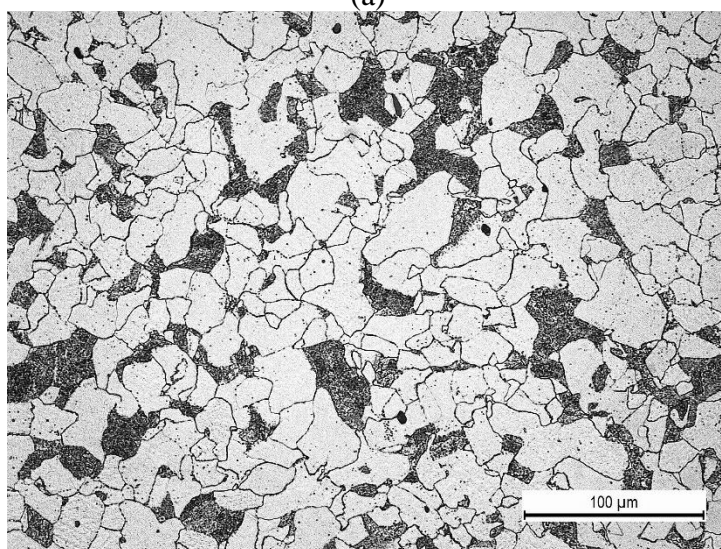
(b) optički mikroskop

Slika 3.61. Uredaji za metalografska ispitivanja

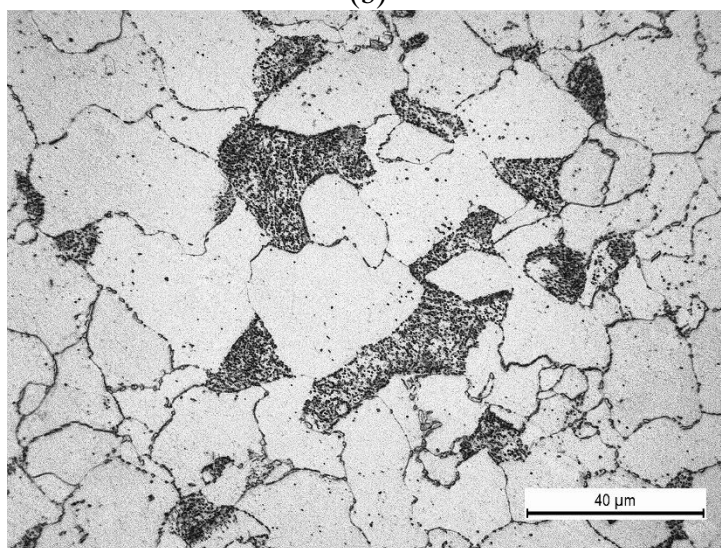
Mikrostruktura unutrašnje površine cevi izrađene od novog-neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, pri uvećanjima 100x, 200x i 500x je prikazana na sl. 3.62 (a) do (c).



(a)



(b)



(c)

Slika 3.62. Mikrostruktura novog-neeksploatisanog čelika

3.8.2. Skening elektronska mikroskopija

Zadatak fraktografskog ispitivanja je utvrđivanje uzroka loma pručavanjem karakteristika prelomne površine. U nastavku je dat pregled prelomnih površina slikanih posle sledećih eksperimentalnih ispitivanja:

- 3.8.2.1. udarnih,
- 3.8.2.2. žilavosti loma i
- 3.8.2.3. brzine rasta zamorne prsline.

3.8.2.1. Prelomne površine epruveta za udarna ispitivanja

Na sl. 3.63 od (a) do (c) prikazane su SEM fotografije površina preloma uzoraka posle udarnog ispitivanja na instrumentiranom Šarpijevom klatnu. Detaljno su analizirane prelomne površine uzoraka br.3 dobijene udarnim ispitivanjem na sobnoj temperaturi (RT), i to uzorka izvađenog iz cevi u L-pravcu i u T-pravcu. Vrednosti izmerenih energija udara prikazane su u tabelama 3.9 i 3.10.

Na sl. 3.64 od (a) do (c) prikazane su površine preloma uzorka br. 1 u dva pravca L- i T- ,dobijene ispitivanjem na radnoj temperaturi od 540 °C (HT). Vrednosti izmerenih energija udara prikazane su u tabelama 3.9 i 3.10.

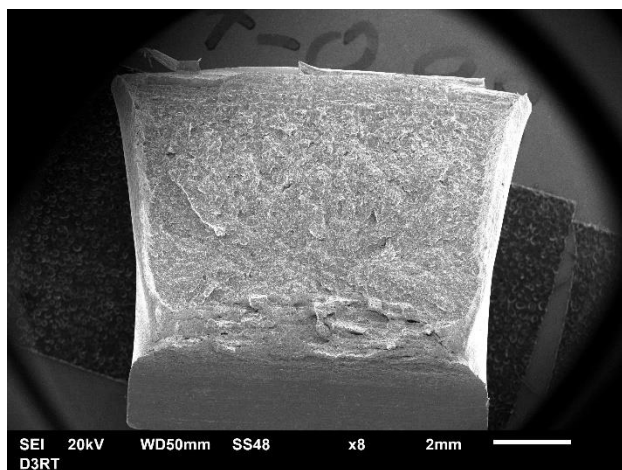
3.8.2.2. Prelomne površine epruveta za određivanje žilavosti loma

Na sl. 3.65. od (a) do (d) prikazane su SEM fotografije površina preloma uzoraka za ispitivanje žilavosti loma. Detaljno su analizirane prelomne površine uzoraka izvađenih iz cevi u L-pravcu i označenih kao ML-OM-1RT i ML-OM-2RT obe dobijene ispitivanjem na sobnoj temperaturi (RT). Vrednosti žilavosti loma prikazane su u tabeli 3.11.

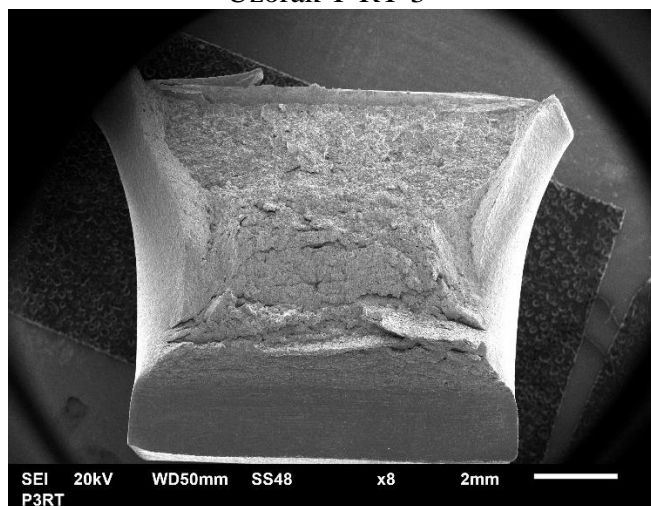
3.8.2.3. Prelomne površine epruveta za merenje brzine rasta zamorne prsline

Na sl. 3.66. od (a) do (c) prikazane su SEM fotografije površina preloma uzoraka za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline. Detaljno su analizirane prelomne površine uzoraka označenih kao OM-2RT i OM-2HT. Vrednosti parametara Parisove jednačine date su u tabeli 3.12.

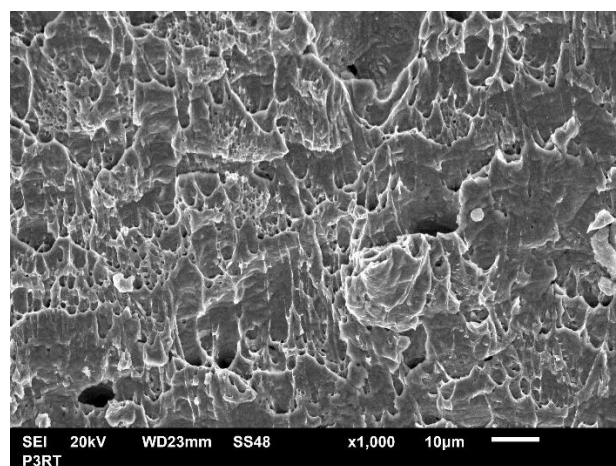
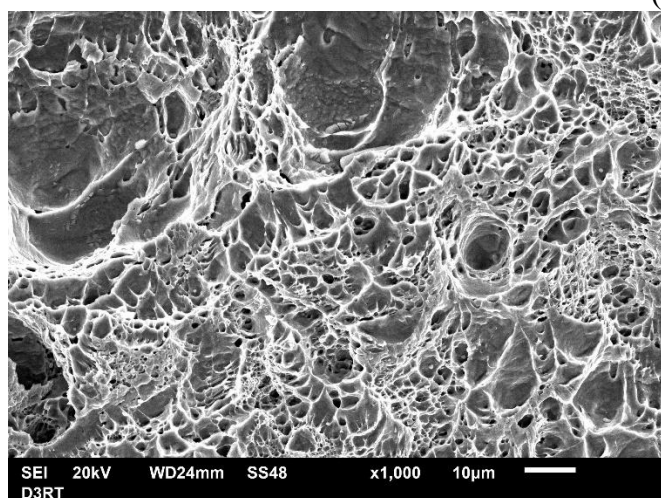
Uzorak L-RT-3



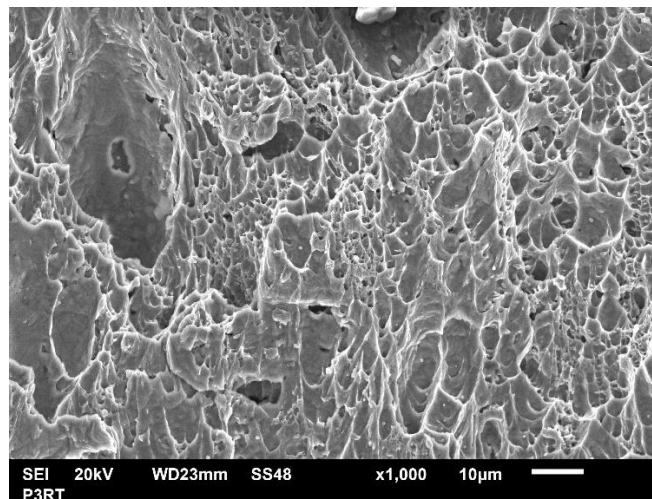
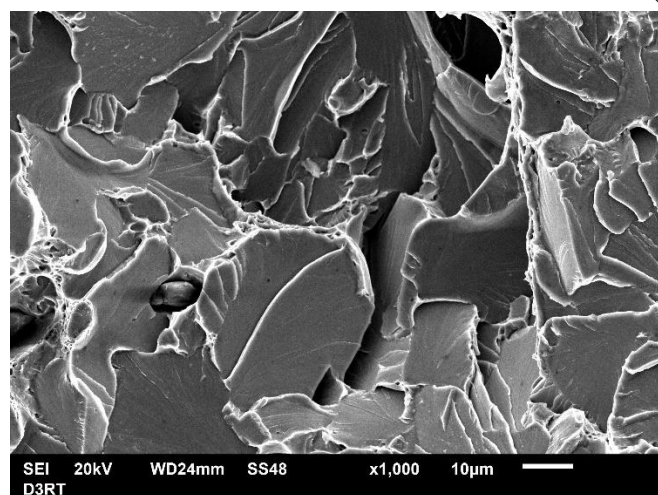
Uzorak T-RT-3



(a)



(b)

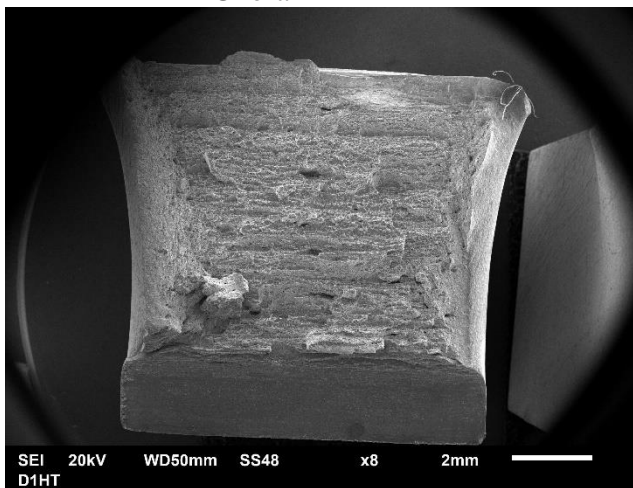


(c)

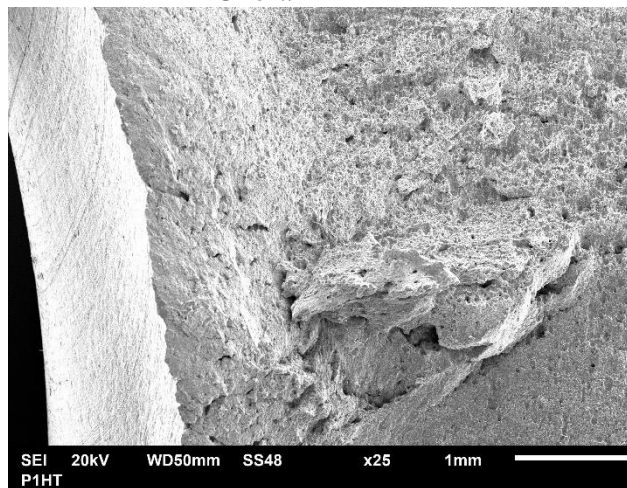
Slika 3.63. SEM fotografije prelomnih površina uzoraka OM posle udarnih ispitivanja na sobnoj temperaturi:

(a) makroskopski izgled površina preloma uzoraka ispitanih u L i T pravcu; (b) početak stvaranja prsline kod uzoraka ispitanih u L i T pravcu; (c) rast prsline kod uzoraka ispitanih u L i T pravcu.

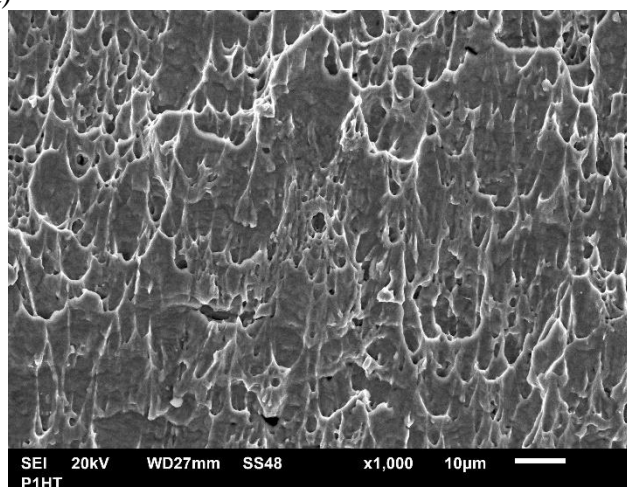
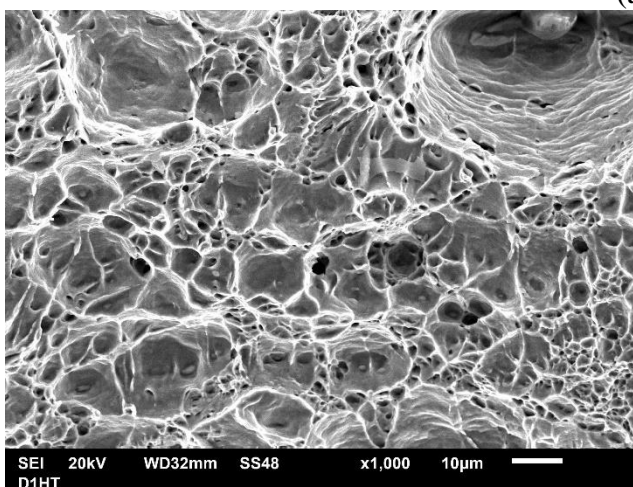
Uzorak L-HT-1



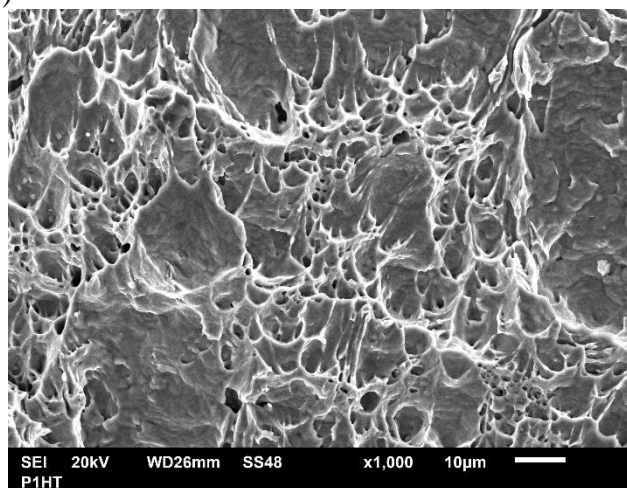
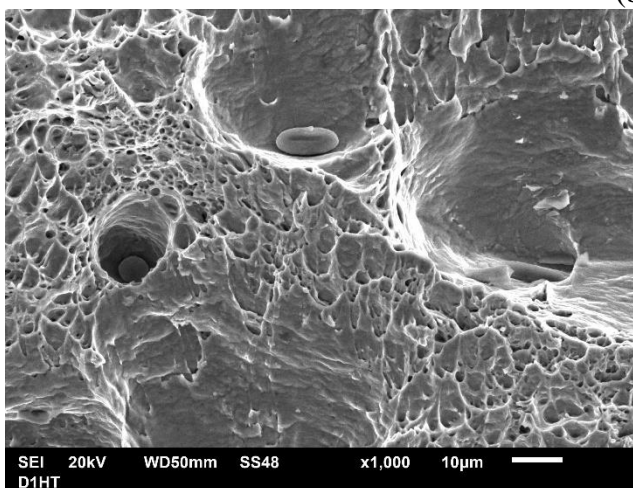
Uzorak T-HT-1



(a)



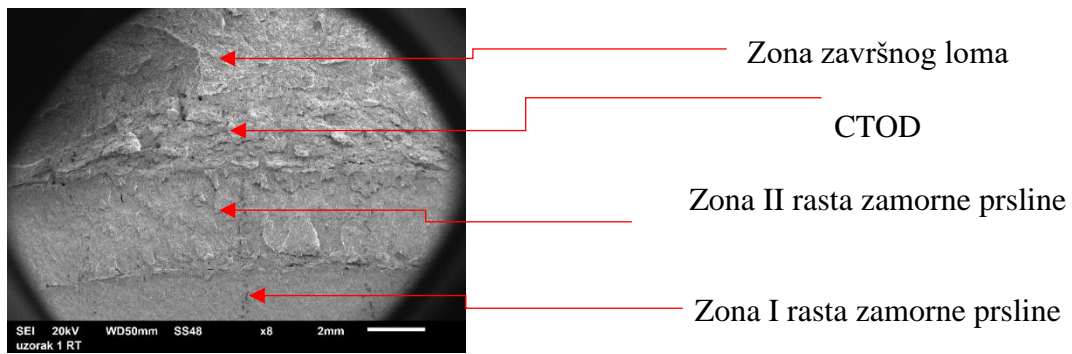
(b)



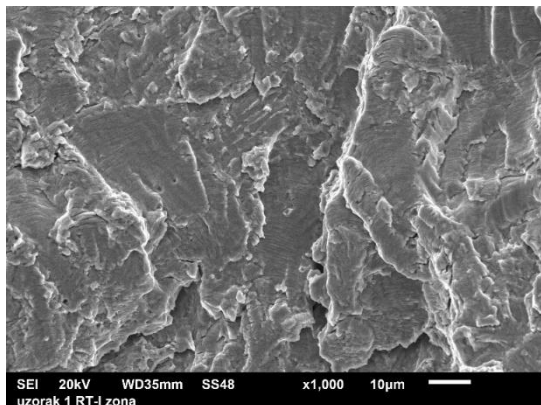
(c)

Slika 3.64. SEM fotografije prelomnih površina uzoraka OM posle udarnih ispitivanja na radnoj temperaturi od 540 °C:

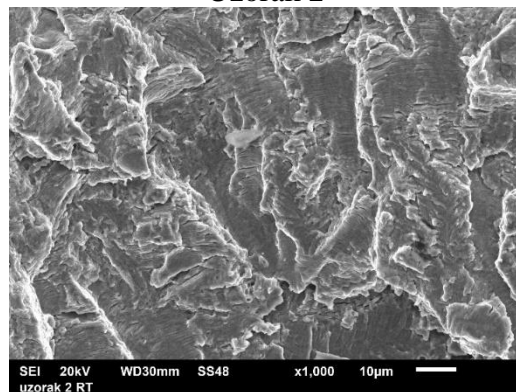
(a) makroskopski izgled površina preloma uzoraka ispitanih u L i T pravcu; (b) početak stvaranja prsline kod uzoraka ispitanih u L i T pravcu; (c) rast prsline kod uzoraka ispitanih u L i T pravcu.



Uzorak 1

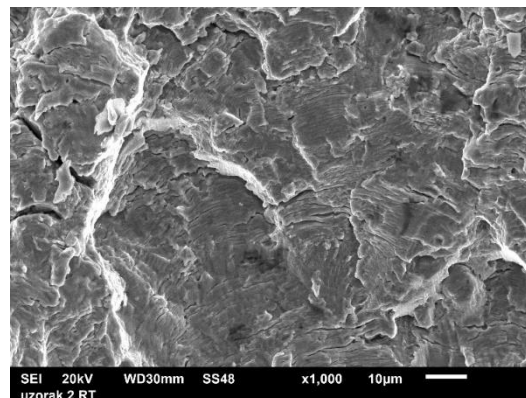
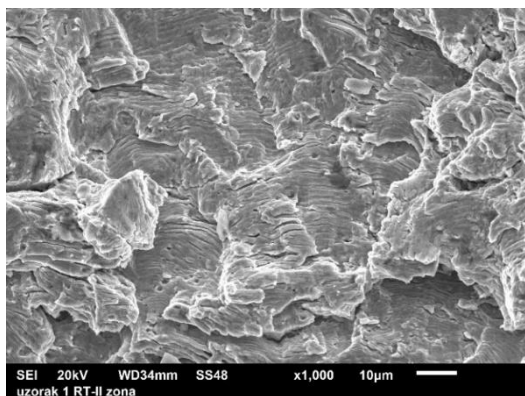


Uzorak 2

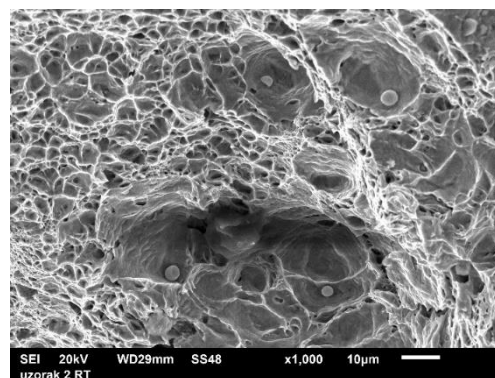
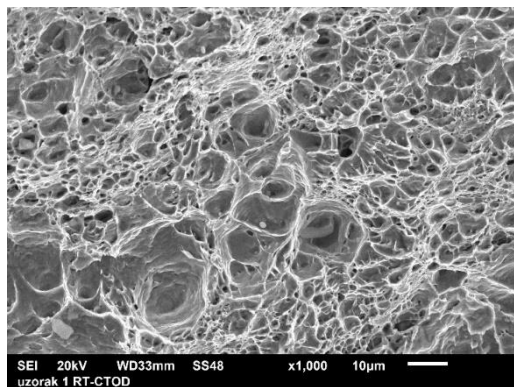


(a)

(b)



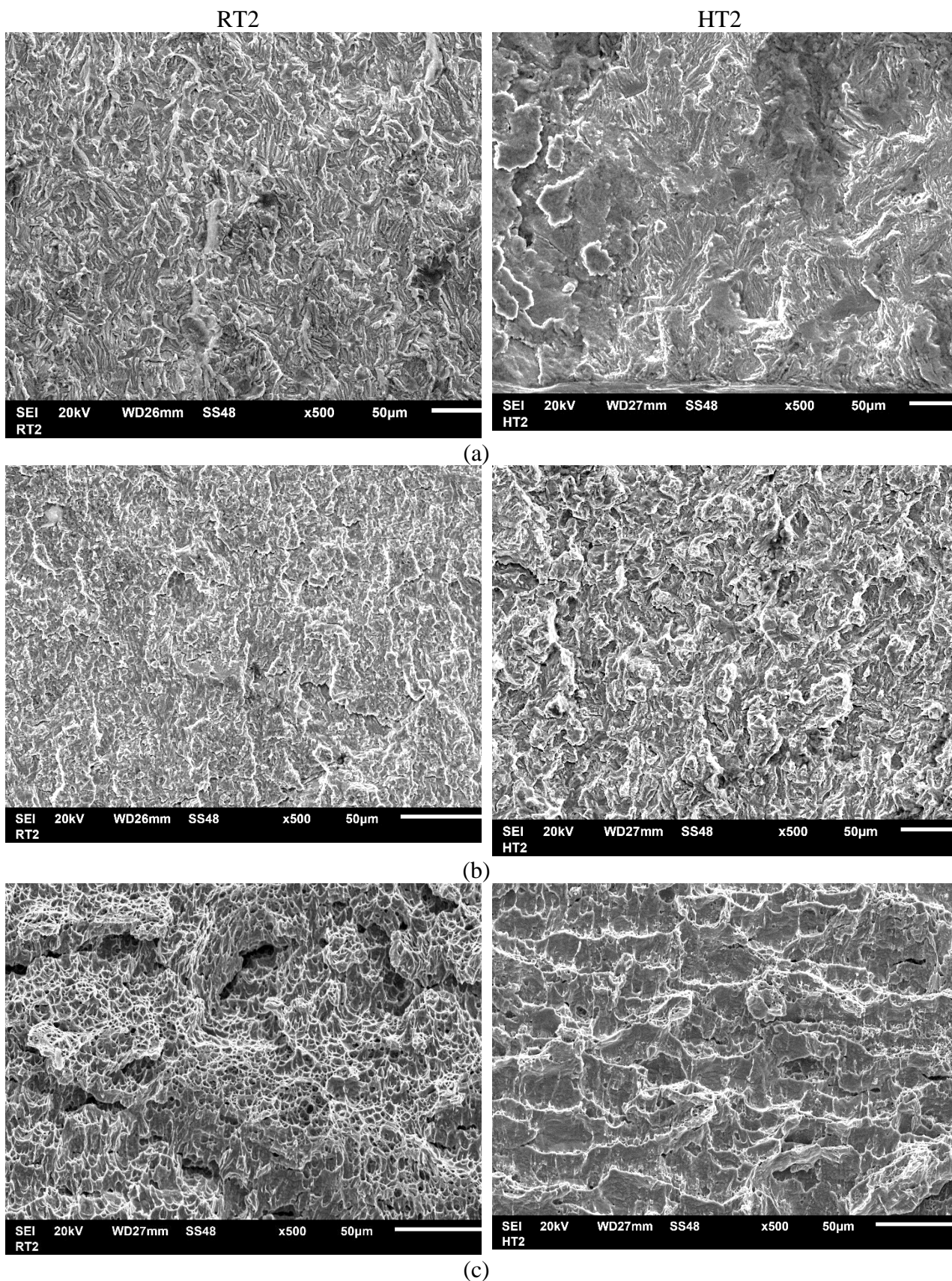
(c)



(d)

Slika 3.65. SEM fotografije prelomnih površina uzoraka OM epruveta za određivanje žilavosti loma:

- (a) makroskopski izgled prelomnih površina; (b) zona I-rast zamorne prsline; (c) zona II-rast zamorne prsline i (d) CTOD**



**Slika 3.66. SEM fotografije prelomnih površina uzoraka OM za merenje brzine rasta zamorne prsline:
 (a) stvaranje prsline; (b) rast zamorne prsline; (c) završni lom.**

4. NUMERIČKA ANALIZA

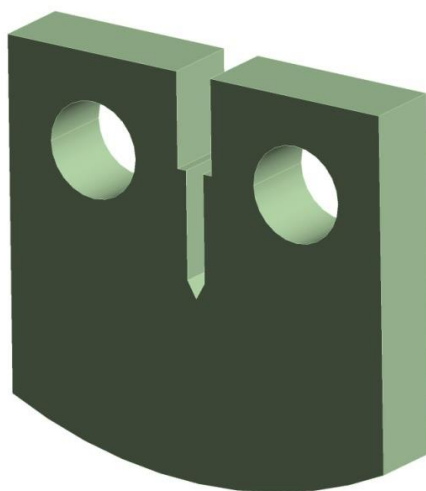
4.1. Numerički proračun J -integrala

Sve numeričke simulacije su rađene u softverskom paketu Ansys Workbench R21 koji se oslanja na MKE. Prvo su napravljeni modeli u CATIA v5, čija je geometrija zatim uvezena u Ansys Workbench, nakon čega je generisana mreža konačnih elemenata, definisani granični uslovi i opterećenja.

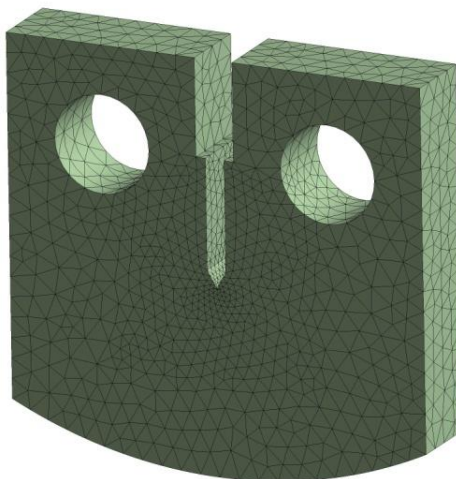
Epruveta na povišenoj temperaturi

Na sledećim slikama predstavljene su faze definisanja modela konačnih elemenata za epruvetu na radnoj (HT) temperaturi od 540 °C, od definisanja početne geometrije, sl. 4.1, preko postavljanja graničnih uslova, unošenja opterećenja i definisanja mreže konačnih elemenata, što je dovelo do dobijanja numeričkih modela spremnih za proračun.

Naglašavamo da su u svim modelima korišćeni tetraedarski konačni elementi sa 20 čvorova, sl. 4.2. Veličina elemenata je varirala u zavisnosti od njihove lokacije, manji elementi su korišćeni na mestima gde se očekivao rast zamorne prsline, dok su na mestima udaljenim od kritičnih korišćeni veći elementi, kako bi broj čvorova bio što manji, pa da bi samim tim i proračun bio pojednostavljen u određenoj meri. Ukupan broj čvorova za model na povišenoj temperaturi je 64368 dok je broj elemenata 44559.



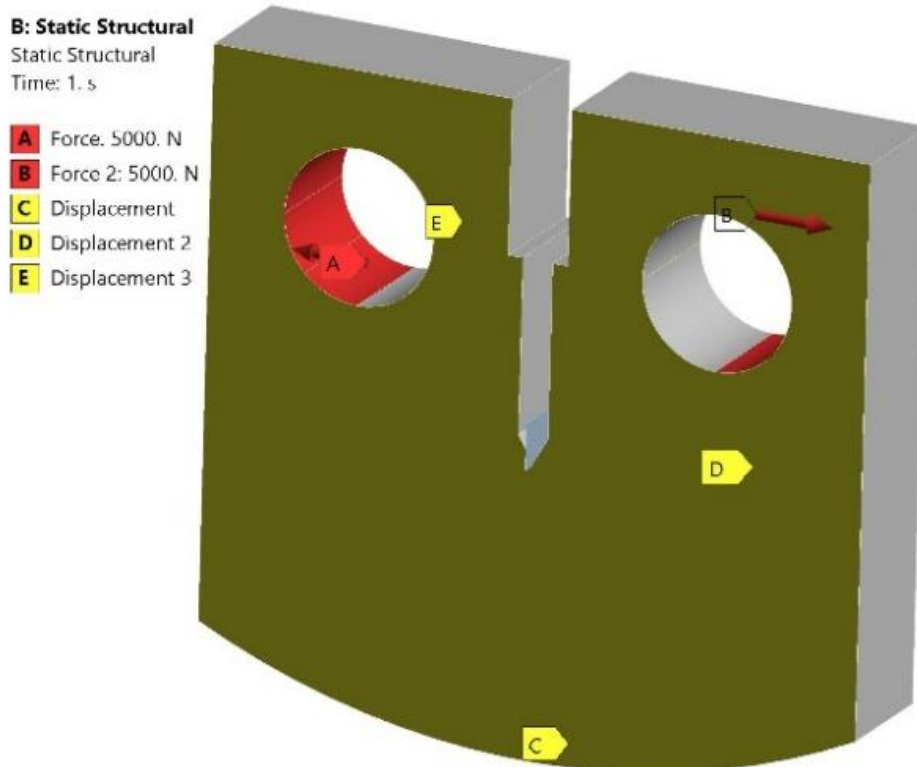
Slika 4.1. Geometrija uzorka za ispitivanje na HT



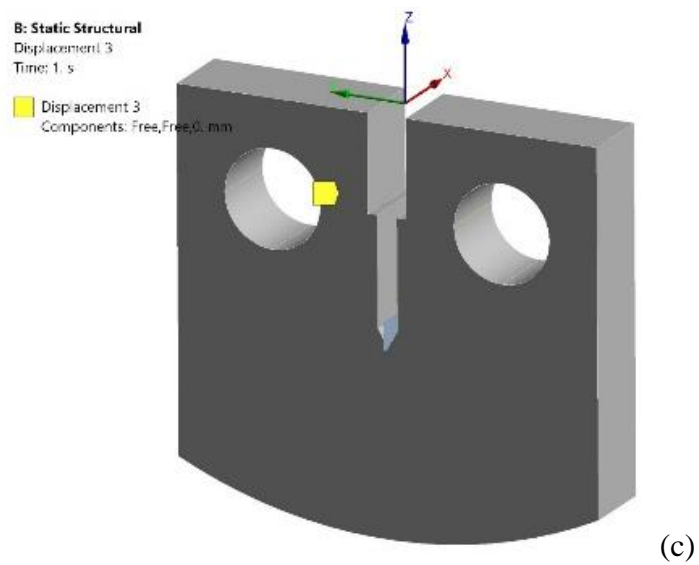
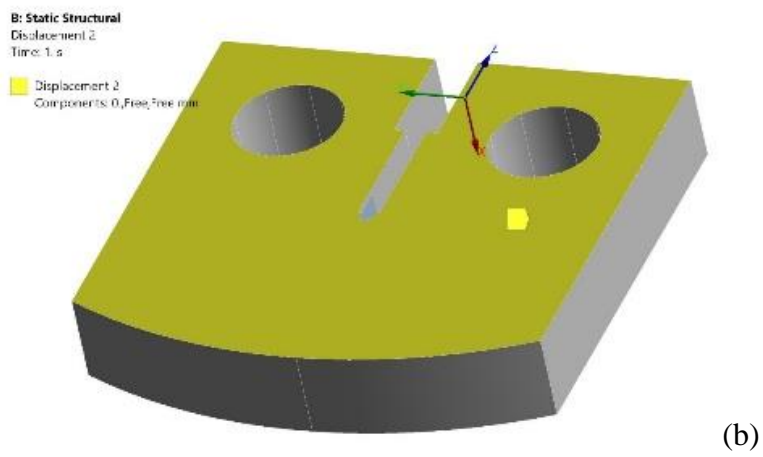
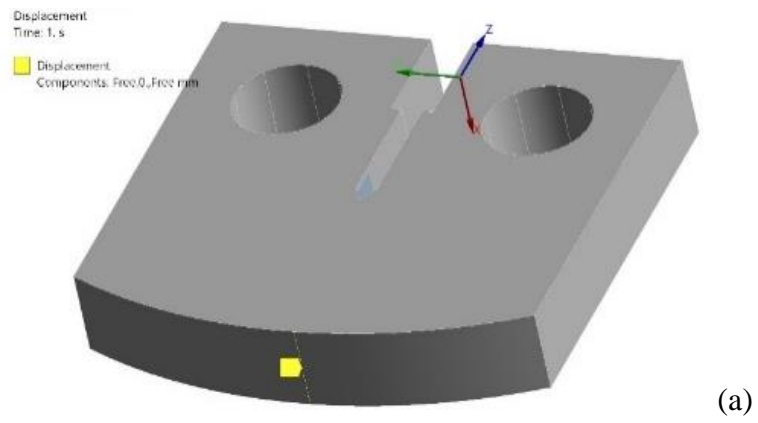
Slika 4.2. Mreža konačnih elemenata

Za vrednost sile uzeta je maksimalna vrednost iz eksperimenta $F = 5000\text{ N}$, sl. 4.3. Detaljan prikaz graničnih uslova: ograničena pomeranja u y, x i z pravcu možemo videti na sl. 4.4.

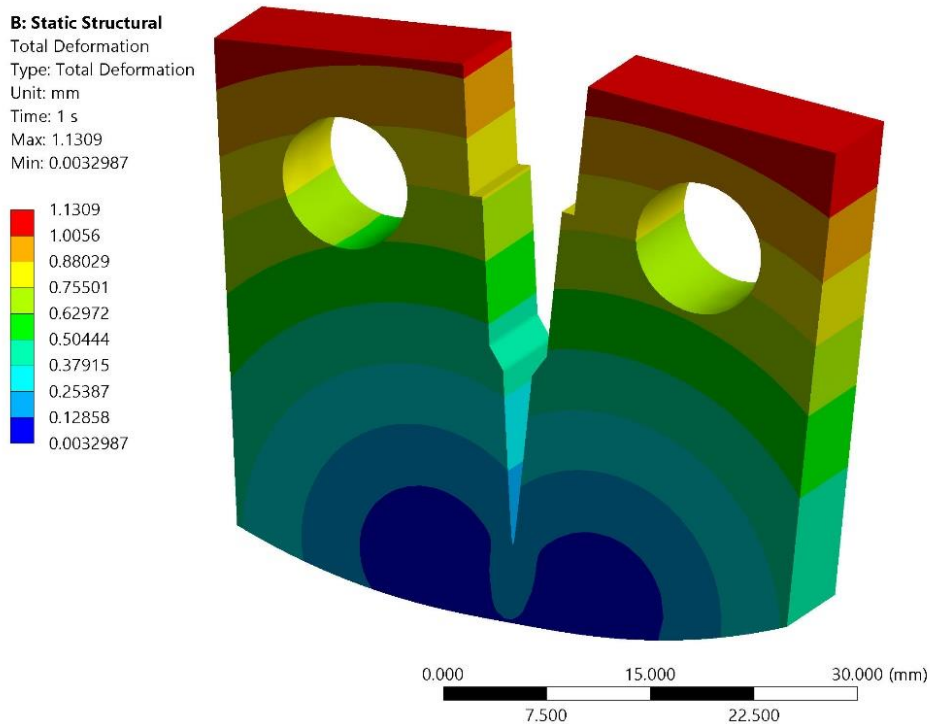
Što se tiče osobina materijala, one su određene na osnovu prethodno opisanih eksperimenata, ispitivanja zatezanjem, za osnovni materijal na radnoj i na sobnoj temperaturi, dok od mehaničkih osobina su korišćene granica tečenja i zatezna čvrstoća, kao i izduženje koje je takođe izmereno u eksperimentu za materijal na radnoj i na sobnoj temperaturi. Na sl. 4.5 možemo videti pomeranja epruvete pri kraju procesa numeričke simulacije širenja prsline.



Slika 4.3. Granični uslovi – pomeranja (žuta boja) i opterećenje u vidu sila (crvena boja)

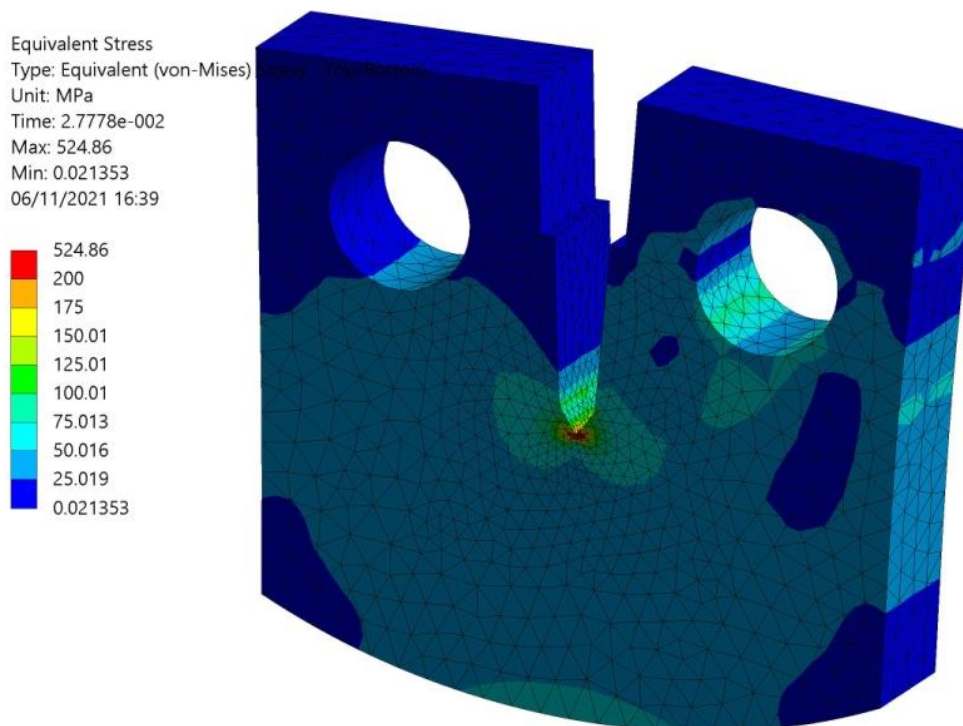


Slika 4.4. Detaljan prikaz graničnih uslova: ograničena pomeranja u: (a) y, (b) x i (c) z pravcu

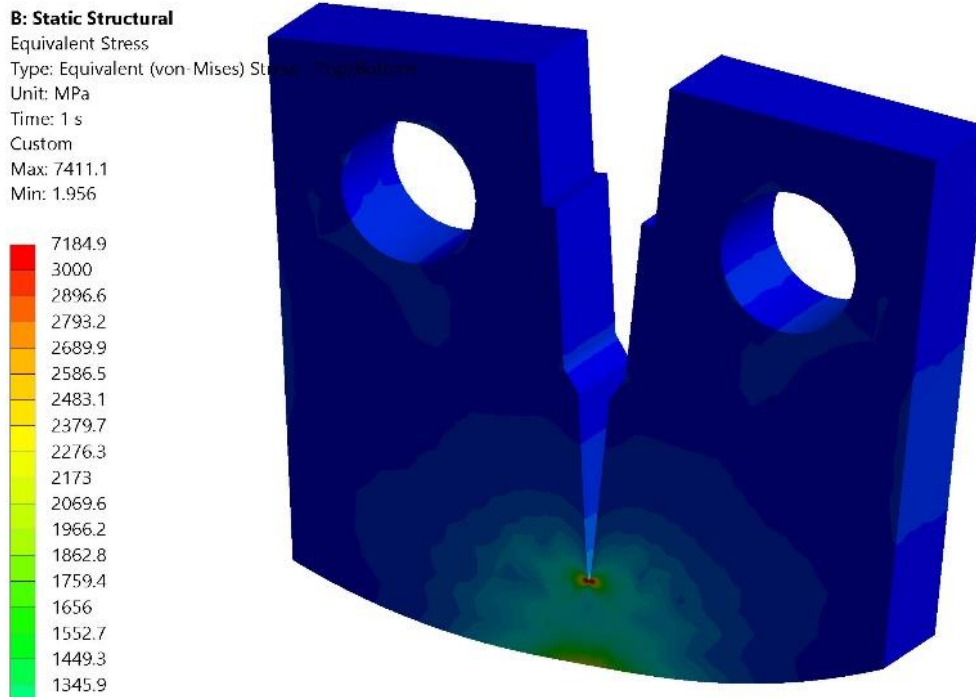


Slika 4.5. Pomeranja epruvete u mm pri kraju procesa numeričke simulacije rasta prsline u epruveti na HT

Maksimalni napon od je bio u vrhu prsline nakon otvaranja prsline, sl. 4.6, i pri kraju simulacije širenja, sl.4.7, što je bilo i očekivano.



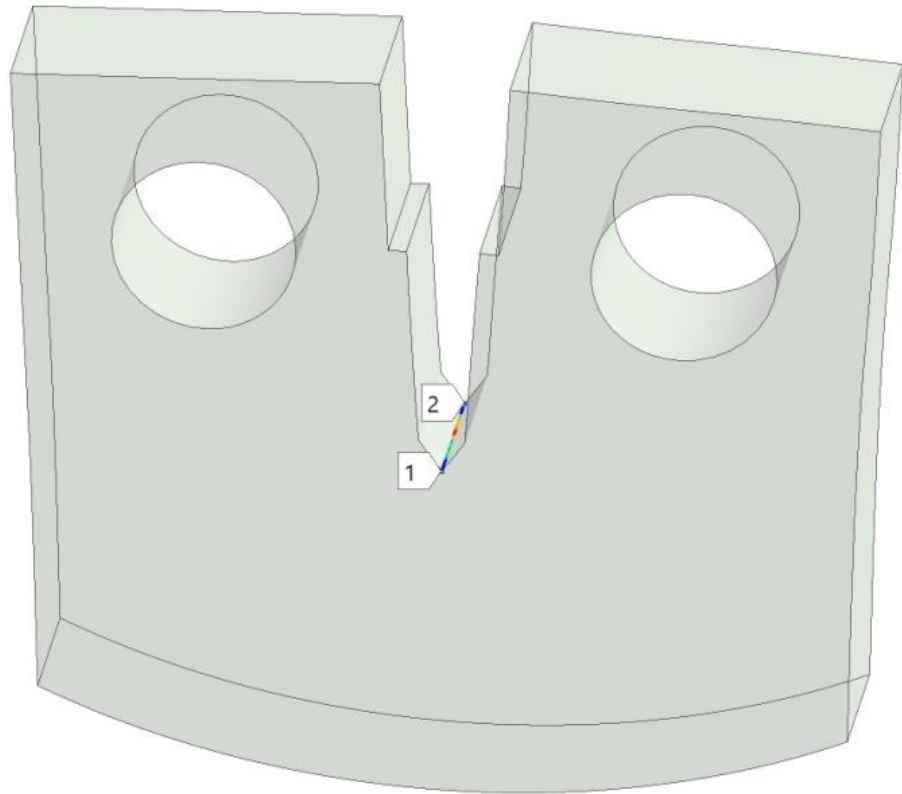
Slika 4.6. Naponsko stanje nakon otvaranja prsline epruvete na HT



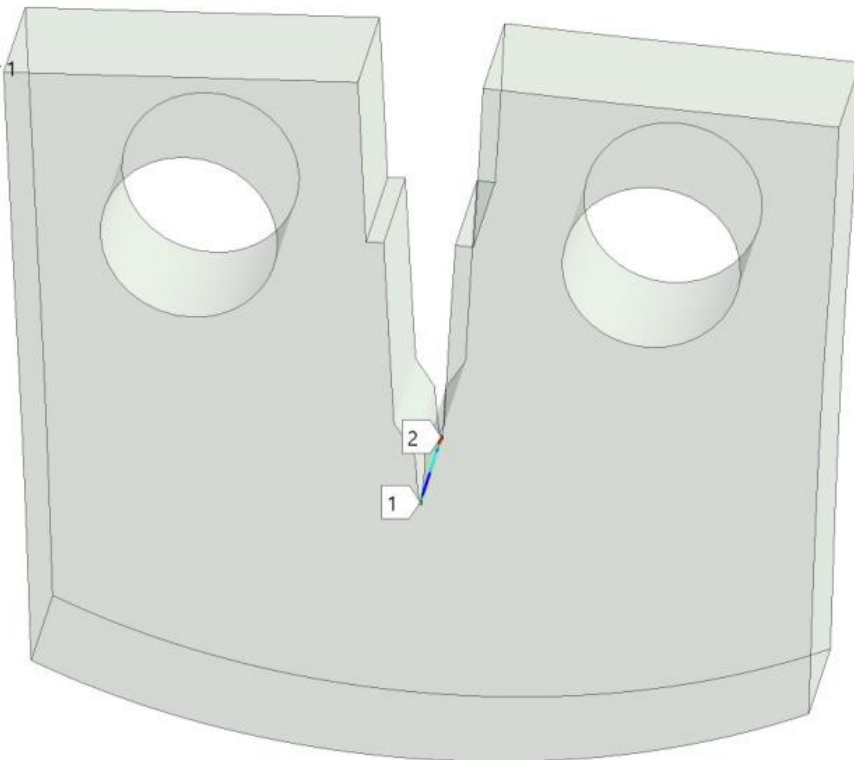
Slika 4.7. Naponsko stanje pri kraju simulacije širenja prsline epruvete na HT

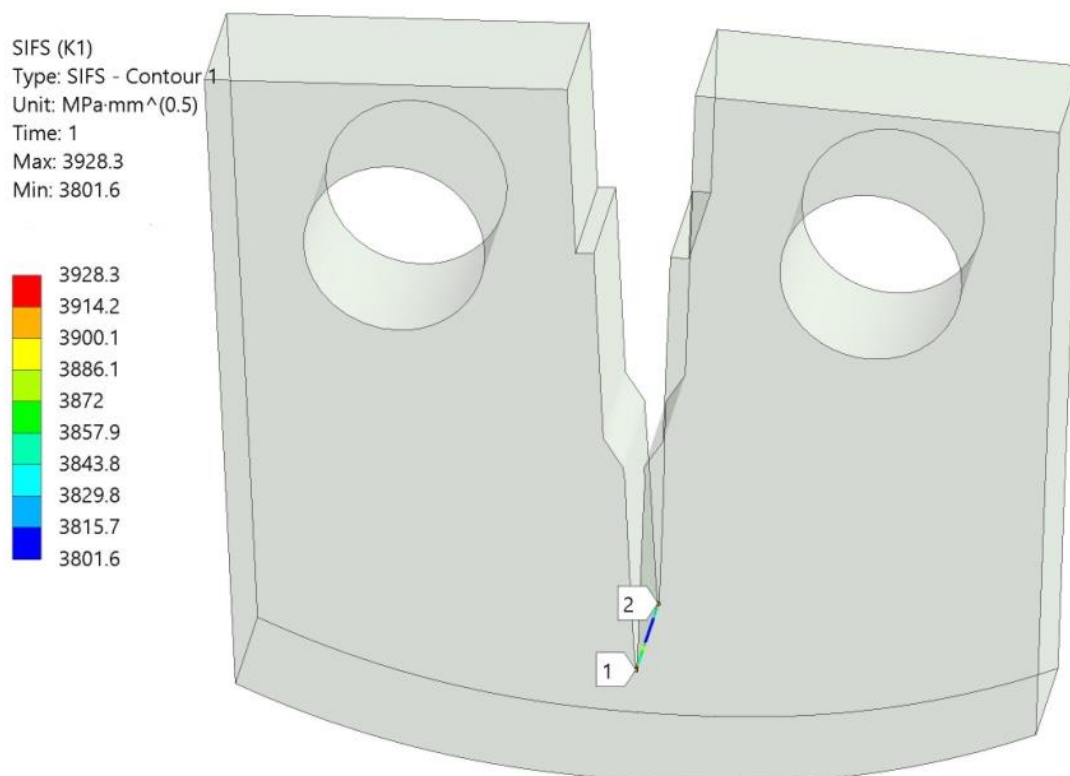
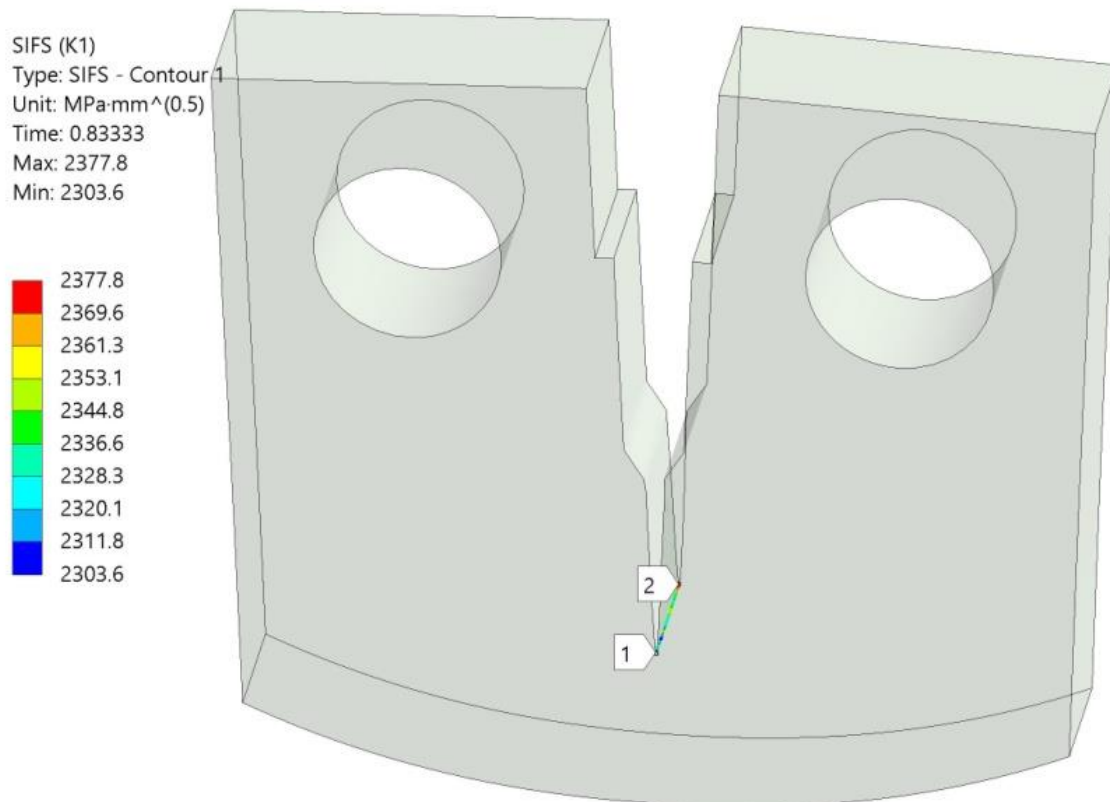
Na sl.4.8 možemo videti vrednosti faktora intenziteta napona (FIN) kroz korake širenja, dok je na sl. 4.9, prikazana vrednost J integrala kroz korake širenja prsline. Numerički određena vrednosti kritičnog J integrala u slučaju epruvete za povišene temperature je $J_C = 55,921 \text{ kJ/m}^2$, sl. 4.10, dok je numerički određena vrednosti kritičnog FIN-a iznosila $K_{IC} = 2892,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 91,46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, sl. 4.11.

SIFS (K1)
Type: SIFS - Contour 1
Unit: MPa-mm^(0.5)
Time: 2.7778e-002
Max: 286.98
Min: 263.7



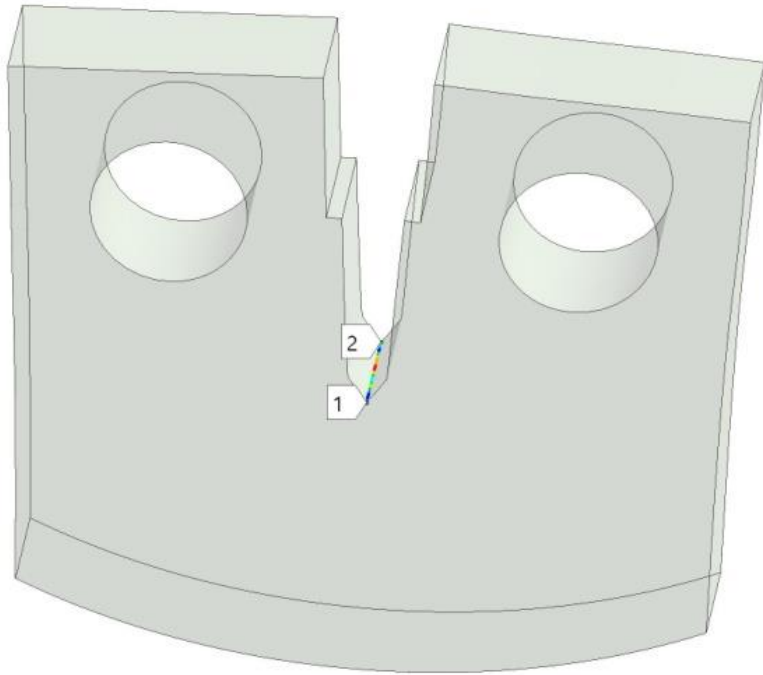
SIFS (K1)
Type: SIFS - Contour 1
Unit: MPa-mm^(0.5)
Time: 0.27778
Max: 597.01
Min: 578.47



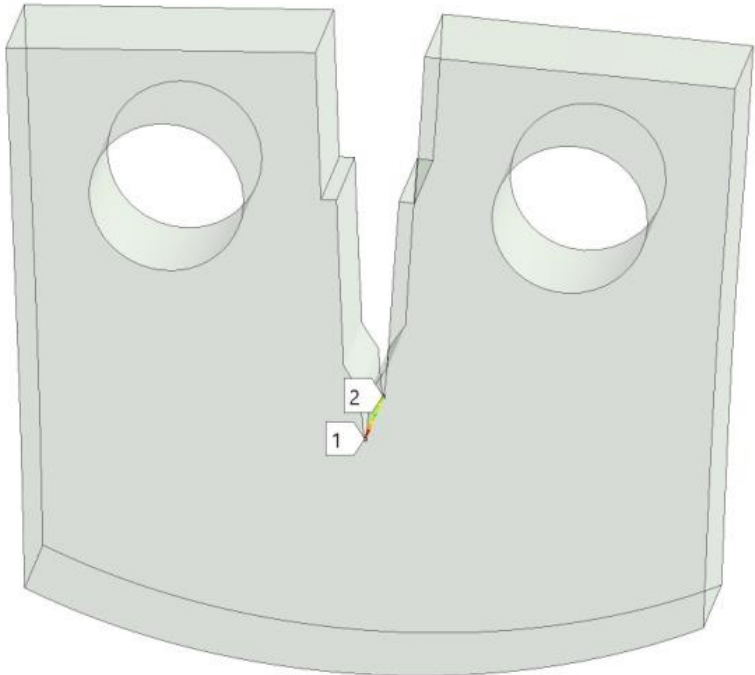


Slika 4.8. Vrednosti faktora intenziteta napona K_I u $MPa\sqrt{mm}$ kroz korake rasta prsline epruvete na HT

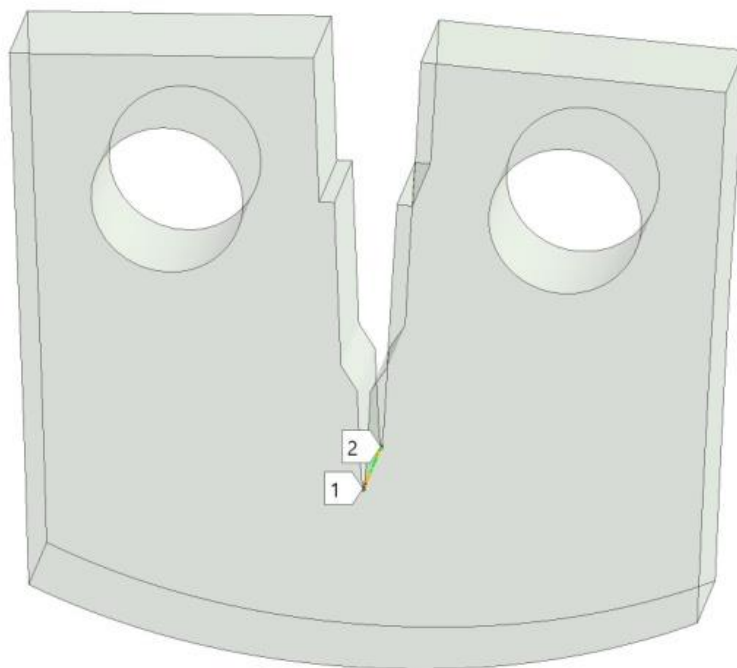
J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 2.7778e-002
Max: 1.0522
Min: 0.85882



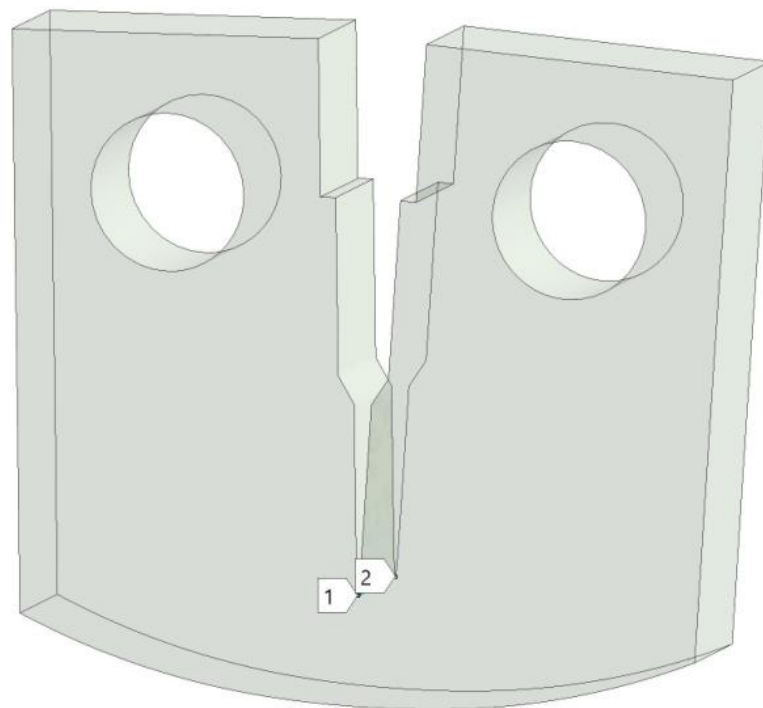
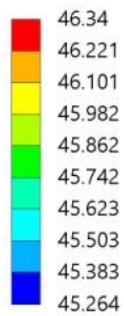
J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 0.27778
Max: 9.2065
Min: 8.894



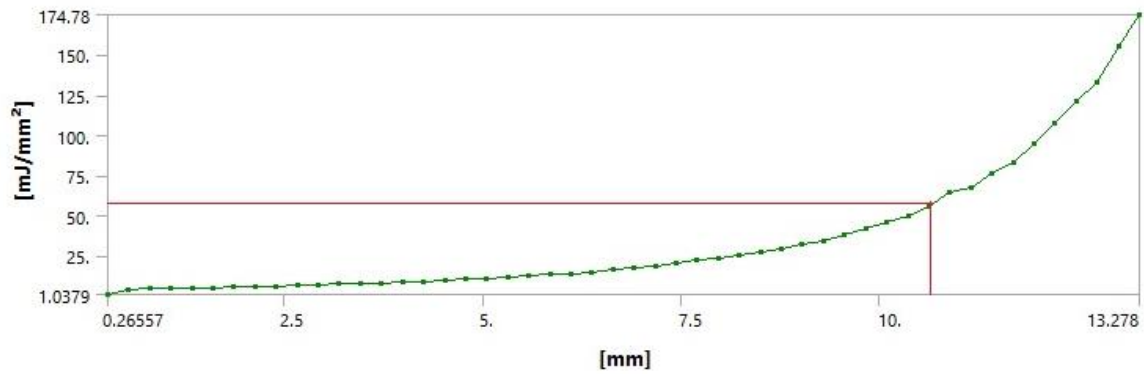
J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 0.55556
Max: 20.157
Min: 19.701



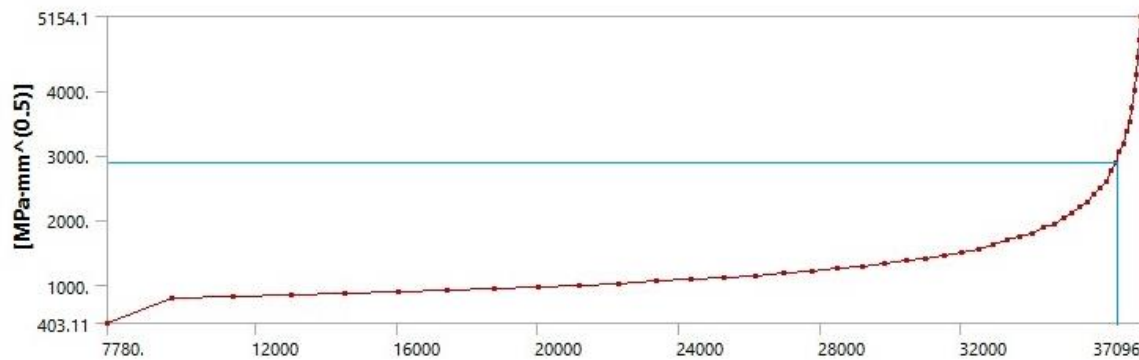
J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 1
Max: 46.34
Min: 45.264



Slika 4.9. Vrednosti J integrala kroz korake širenja (u mJ/mm^2) epruvete za HT



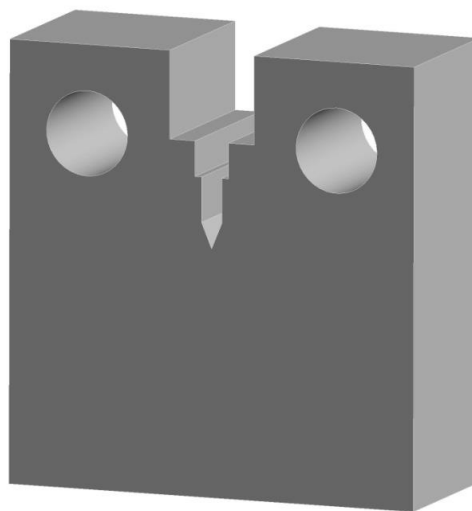
Slika 4.10. Numerički određena vrednosti kritičnog J integrala ($J_C = 55,921 \text{ mJ/mm}^2$) na HT



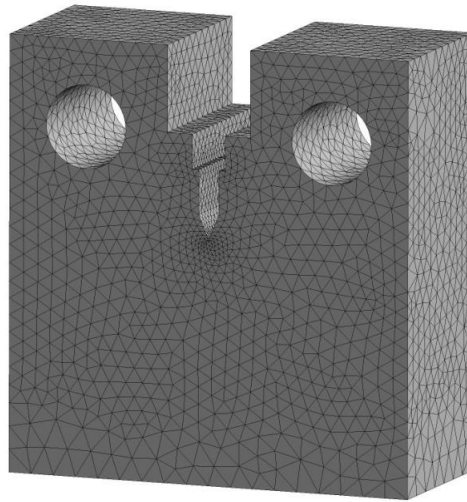
Slika 4.11. Numerički određena vrednosti kritičnog FIN-a ($K_{IC} = 2892,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$)

Epruveta na sobnoj temperaturi

Potpuno ista procedura je ponovljena za epruvetu na sobnoj temperaturi (RT). Nakon definisanja geometrije prema dimenzijama epruvete u eksperimentu, sl. 4.12, definisana je mreža konačnih elemenata, sl. 4.13. I u ovom modelu su korišćeni tetraedarski elementi gde je ukupan broj čvorova za model na sobnoj temperaturi 127116 dok je broj elemenata 88131.

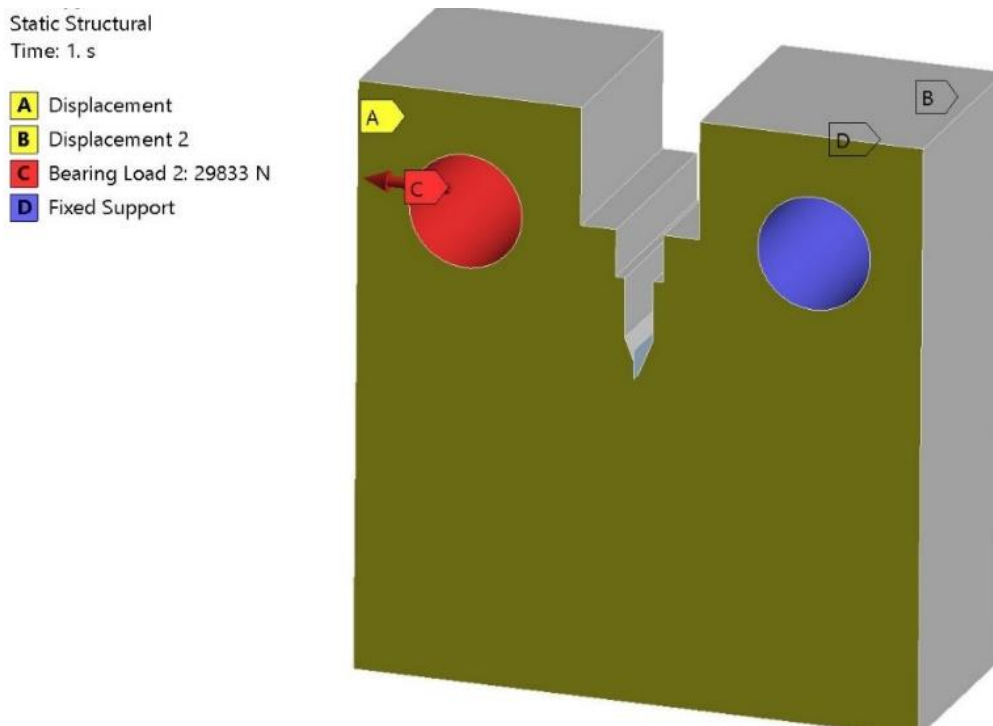


Slika 4.12. Geometrija uzorka za ispitivanje na RT

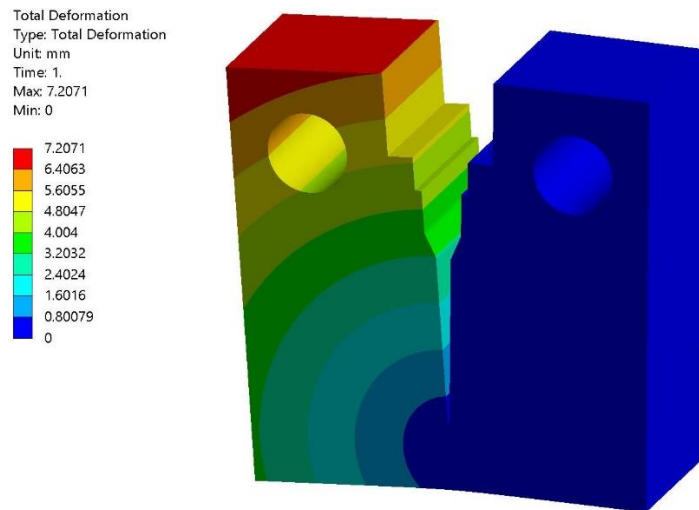


Slika 4.13. Mreža tetraedarskih elemenata

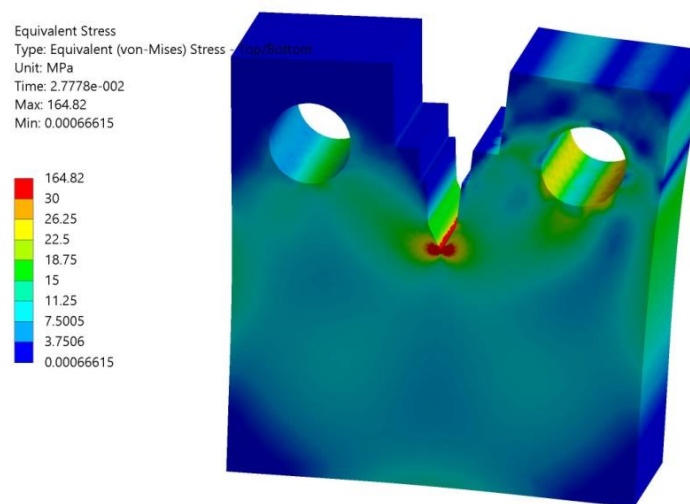
Granični uslovi su takođe odgovarali eksperimentu, i za vrednost sile uzeta je maksimalna vrednost iz eksperimenta $F = 29833 \text{ N}$, sl. 4.14. Redom na slikama 4.15-4.18 možemo videti izgled pomeranja epruvete pri kraju procesa numeričke simulacije širenja, naponsko stanje nakon otvaranja prsline i pri kraju simulacije (maksimalni napon je u vrhu prsline u oba slučaja), zatim promene vrednosti J integrala kroz korake širenja. Numerički određena vrednosti na RT kritičnog J -integrala je $J_C = 126.7 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ što možemo videti na sl. 4.19.



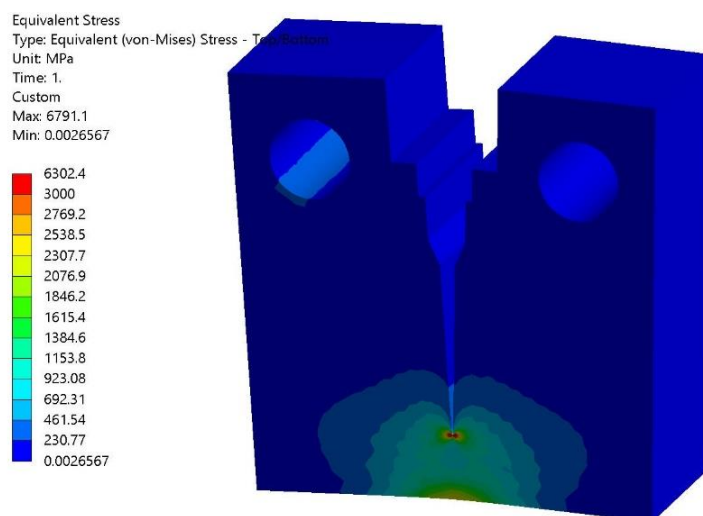
Slika 4.14. Granični uslovi (plava i žuta boja) i opterećenje u vidu sile (tzv. *bearing load*, crvena boja)



Slika 4.15. Pomeranja epruvete pri kraju procesa numeričke simulacije širenja prsline u epruveti na RT

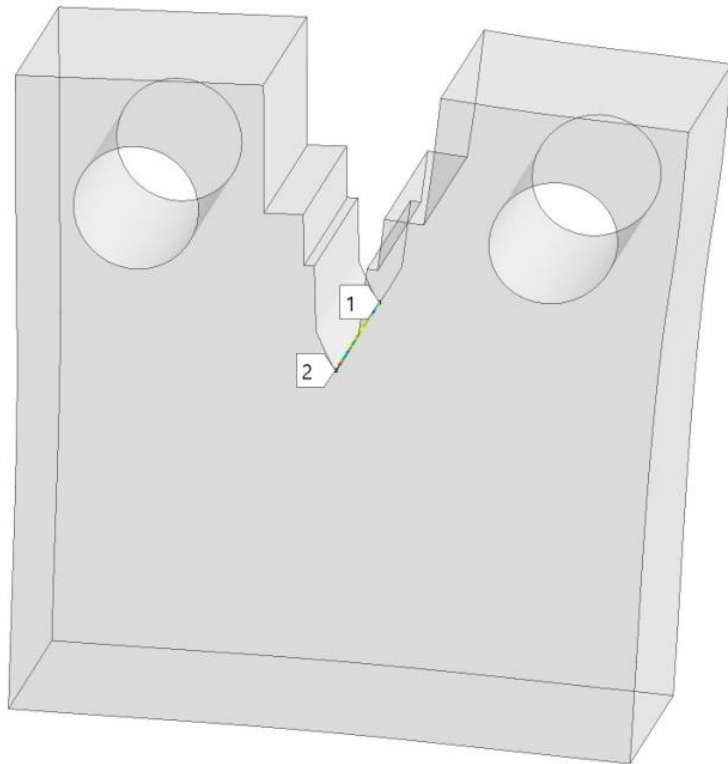
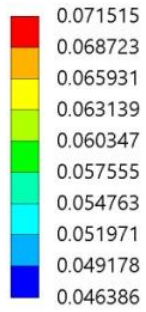


Slika 4.16. Naponsko stanje nakon otvaranja prsline

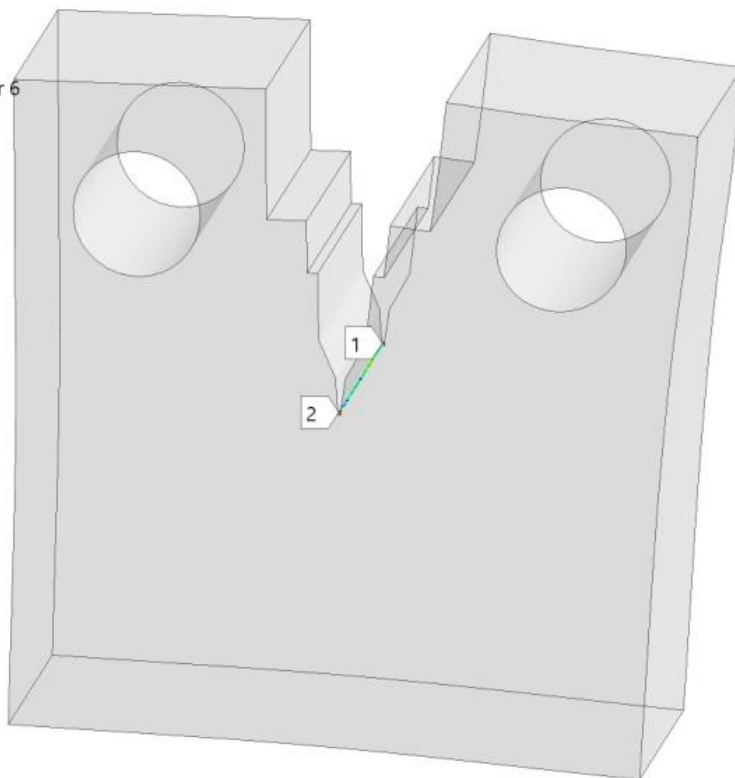


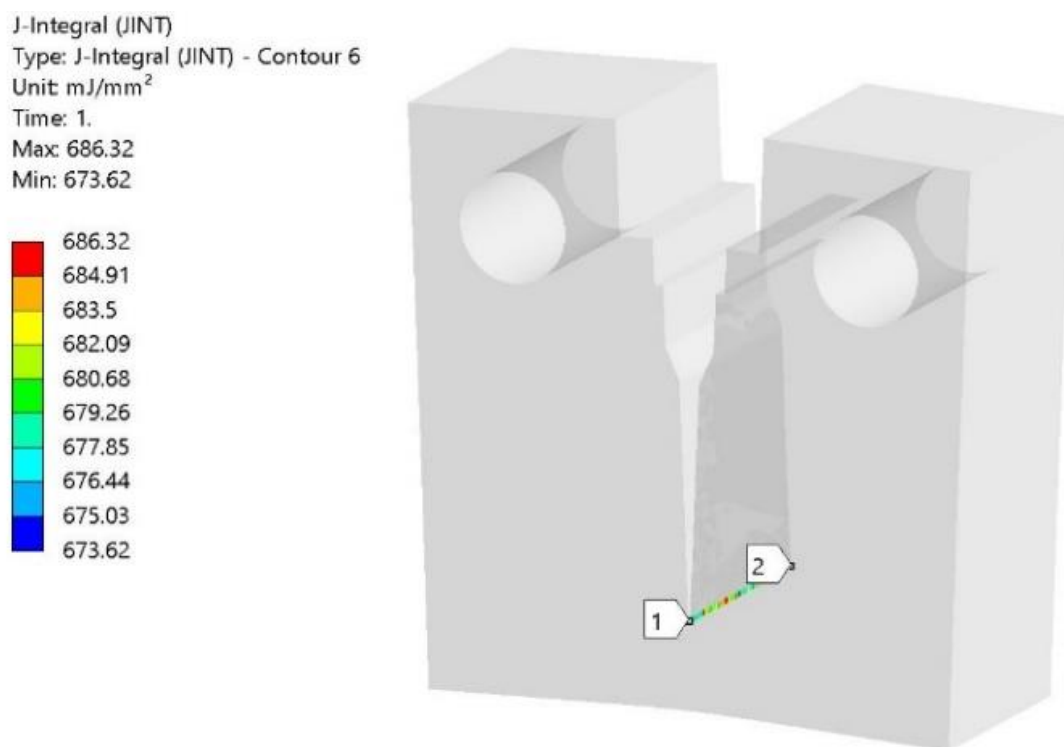
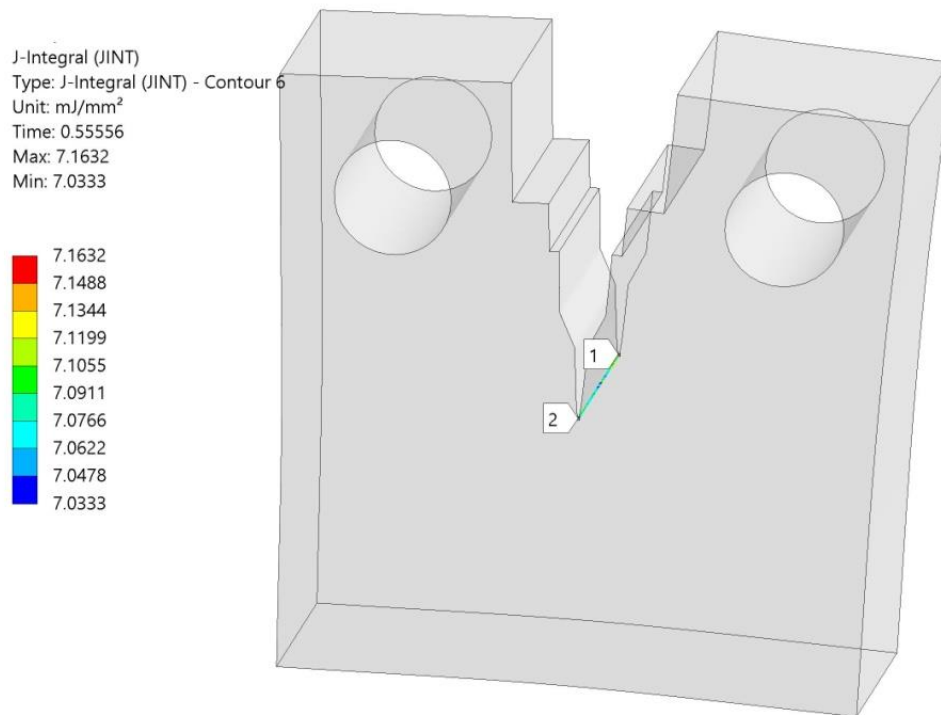
Slika 4.17. Naponsko stanje u vrhu prsline pri kraju simulacije

J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 2.7778e-002
Max: 0.071515
Min: 0.046386

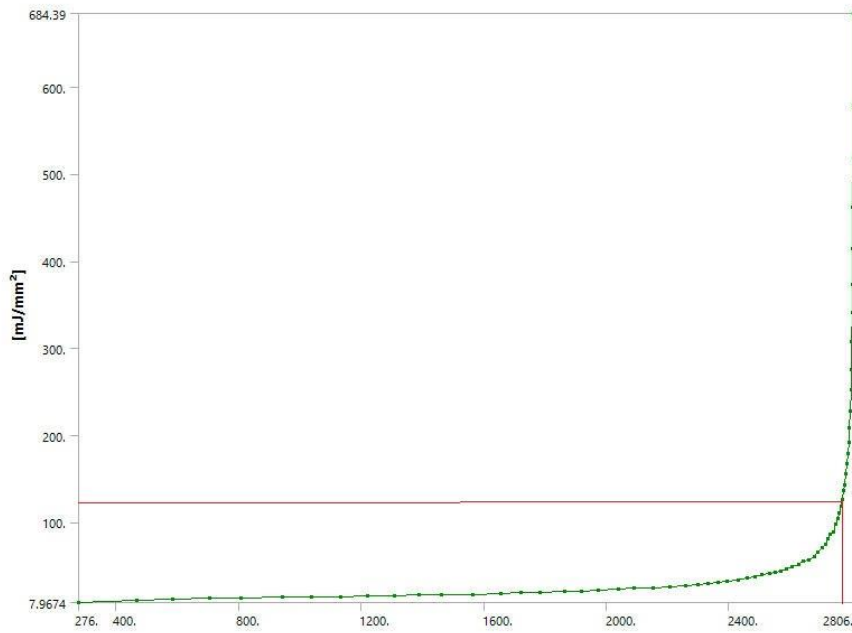


J-Integral (JINT)
Type: J-Integral (JINT) - Contour 6
Unit: mJ/mm²
Time: 0.27778
Max: 2.6711
Min: 2.6021

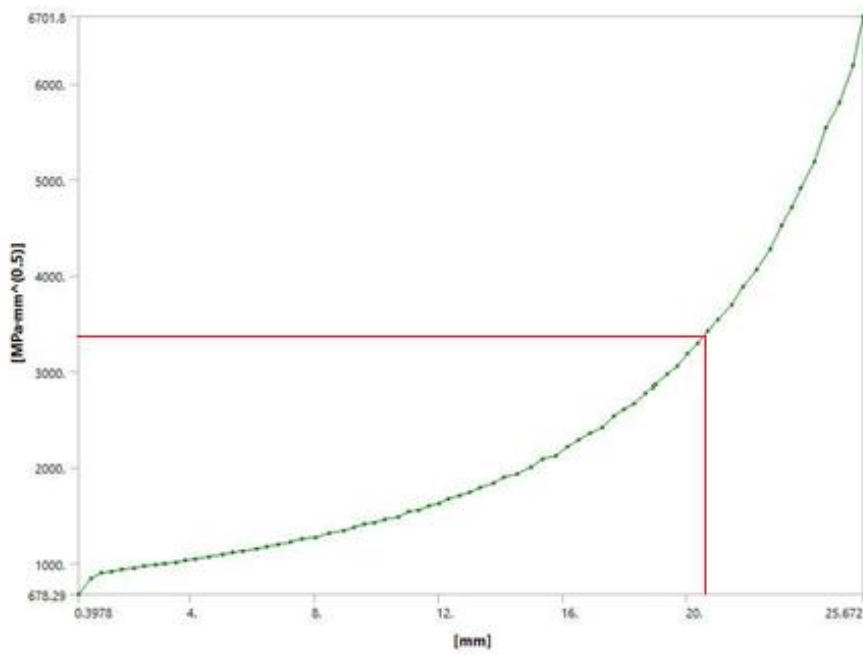




Slika 4.18. Promene vrednosti J -integrala u mJ/mm^2 kroz korake rasta prsline za epruvetu na RT



Slika 4.19. Numerički određena vrednosti kritičnog J integrala ($J_c = 126,7 \text{ mJ/mm}^2$) na RT



Slika 4.20. Numerički određena vrednosti kritičnog FIN-a ($K_{IC} = 3374,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$) na RT

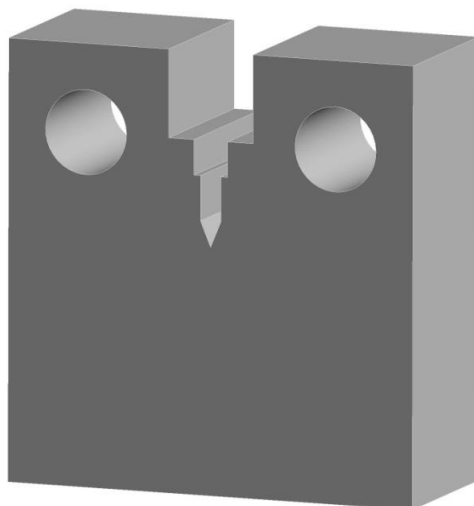
4.2. Numeričko predviđanje rasta zamorne prsline

Osnovu numeričke analize koja je urađena MKE, činile su $da/dN - \Delta K$ krive na osnovu kojih su određeni koeficijenti Parisove jednačine C i m . Granični uslovi i opterećenja su definisani u skladu sa eksperimentom.

U narednom delu će biti prikazani rezultati simulacije za dve epruvete, na sobnoj (RT) i radnoj (HT) temperaturi. U okviru rezultata su prikazani sami modeli u deformisanom obliku, sa vrednostima napona i deformacija, vrednostima faktora intenziteta napona (FIN), kao i dobijeni dijagrami dužina prsline – broj ciklusa za svaki model.

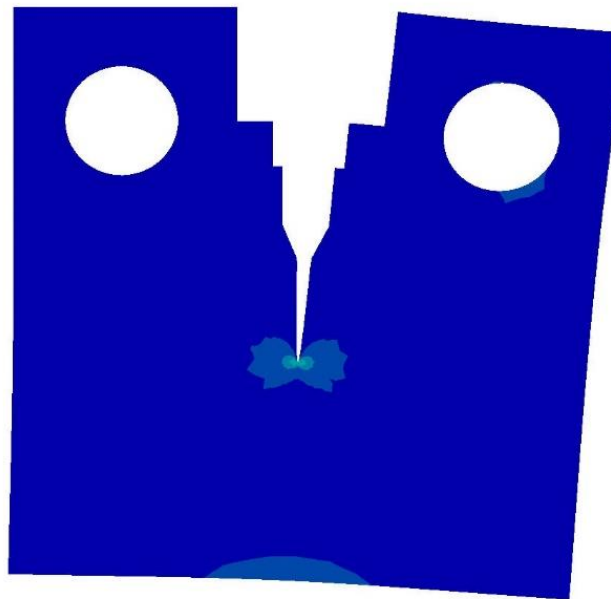
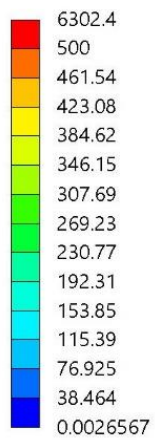
Epruveta na sobnoj temperaturi

Definisana je geometrije epruvete prema dimenzijama epruvete u eksperimentu, sl. 4.21. Nakon definisanja mreža konačnih elemenata, usledile su faze definisanja graničnih uslova i opterećenja koje su odgovarale eksperimentu, a što je već opisano ranije. Na sl. 4.22 prikazan je izgled modela nakon delovanja zamarajućeg opterećenja sa raspodelom napona u okolini vrha prsline. Vrednosti FIN K_I od otvaranja do konačne dužine prsline, računane za 36 koraka primene opterećenja, prikazane su na sl. 4.23 (a) i (b).



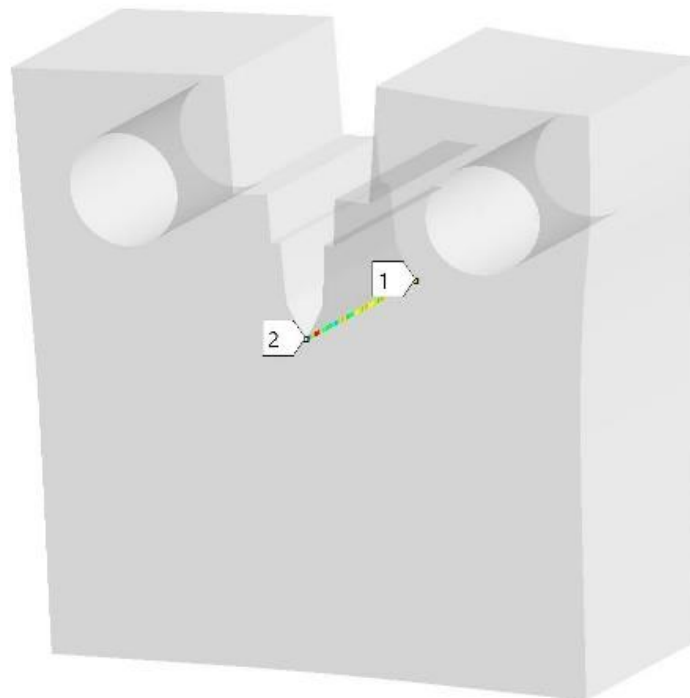
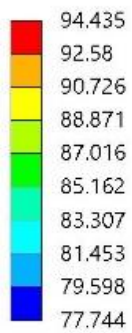
Slika 4.21. Geometrija uzorka za ispitivanje na RT

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 35
Custom Obsolete
Max: 261.64
Min: 0.00093452



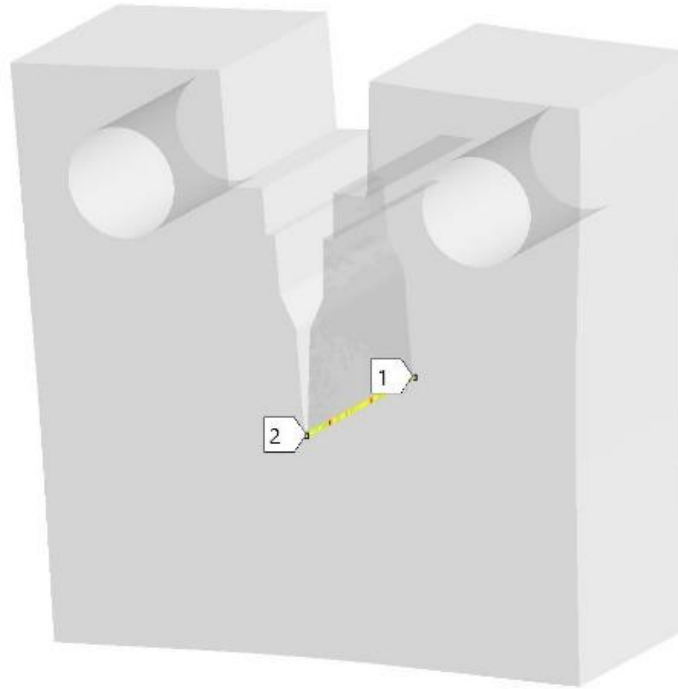
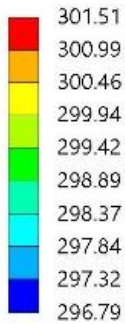
Slika 4.22. Raspodela napona u MPa deformisanog modela

SIFS (K1) 2
Type: SIFS - Contour 6
Unit: MPa·mm^{^(0.5)}
Time: 1
Max: 94.435
Min: 77.744



(a)

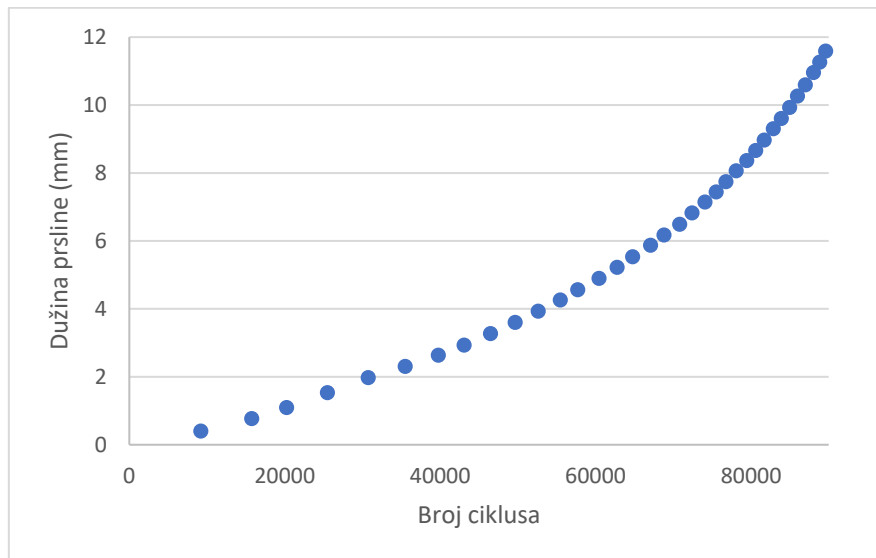
SIFS (K1) 36
 Type: SIFS - Contour 6
 Unit: MPa·mm^{^(0.5)}
 Time: 35
 Max: 301.51
 Min: 296.79



(b)

Slika 4.23. Vrednosti FIN K_I u $MPa\sqrt{mm}$ od: (a) otvaranja do (b) konačne dužine prsline za RT

Ukupan broj ciklusa do dostizanja kritične dužine prsline a_c na RT je iznosio $N = 89623$, što predstavlja veću vrednosti u odnosu na eksperimentalno dobijene brojeve ciklusa pri odgovarajućim dužinama prsline, sl. 4.24.

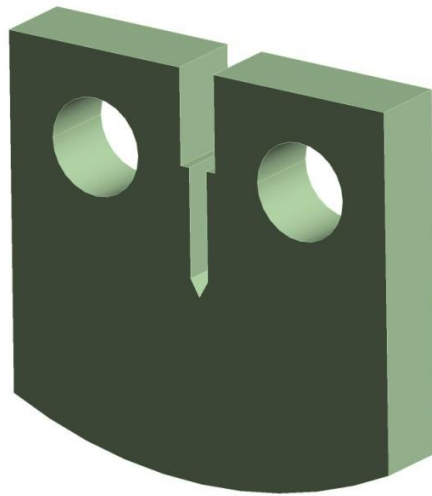


Slika 4.24. Dijagram $a - N$ za simuliranu epruvetu na RT

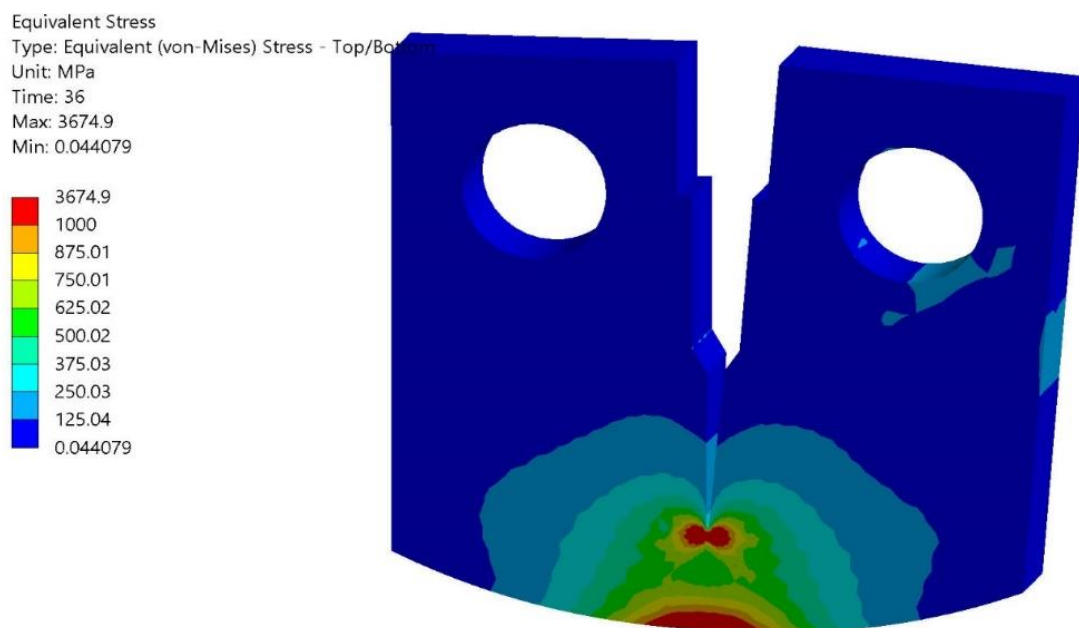
Epruveta na povišenoj temperaturi

Ista procedura je ponovljena za epruvetu na HT. Na sl. 4.25 je prikazana geometrija epruvete koja odgovara eksperimentu. Nakon definisanja mreža konačnih elemenata, usledile su faze definisanja graničnih uslova i opterećenja koje su odgovarale eksperimentu kao i u slučaju prve epruvete. Na sl. 4.26 prikazan je izgled modela nakon delovanja zamarajućeg opterećenja sa raspodelom napona u

okolini vrha prsline. Vrednosti K_I od otvaranja do konačne dužine prsline prikazano je na sl. 4.27. Broj ciklusa do dostizanja kritične dužine prsline a_c je iznosio $N = 50130$, što je gotovo ista vrednost u odnosu na eksperimentalno dobijene brojeve ciklusa, sl. 4.28.

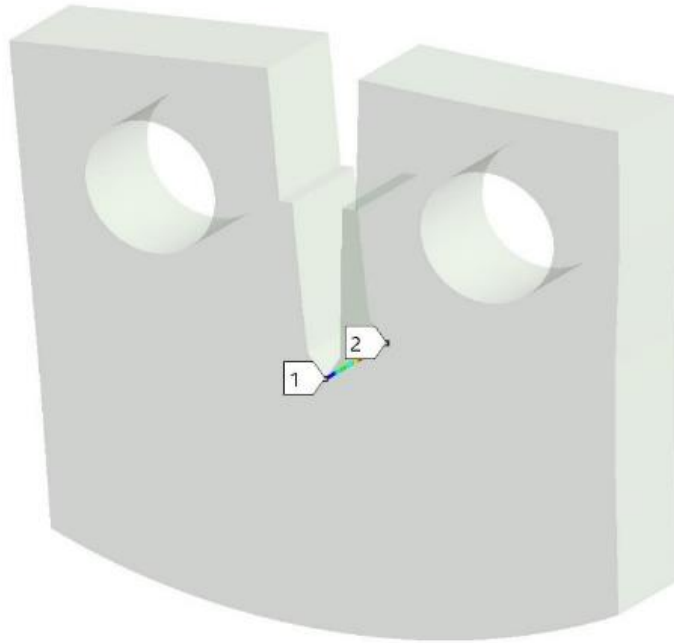
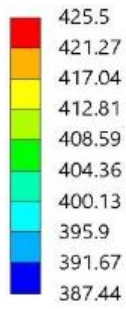


Slika 4.25. Geometrija uzorka za ispitivanje na HT



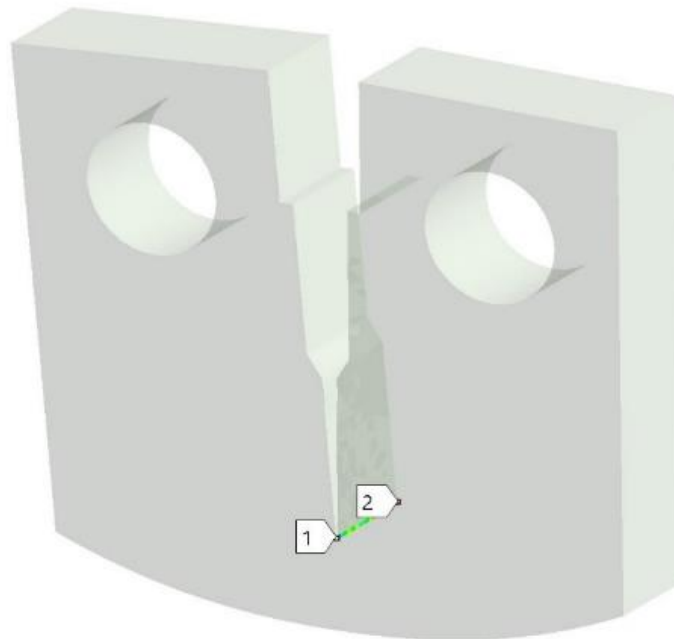
Slika 4.26. Raspodela napona u MPa u deformisanom modelu

SIFS (K1)
 Type: SIFS - Contour 6
 Unit: MPa·mm^{0.5}
 Time: 1
 Max: 425.5
 Min: 387.44



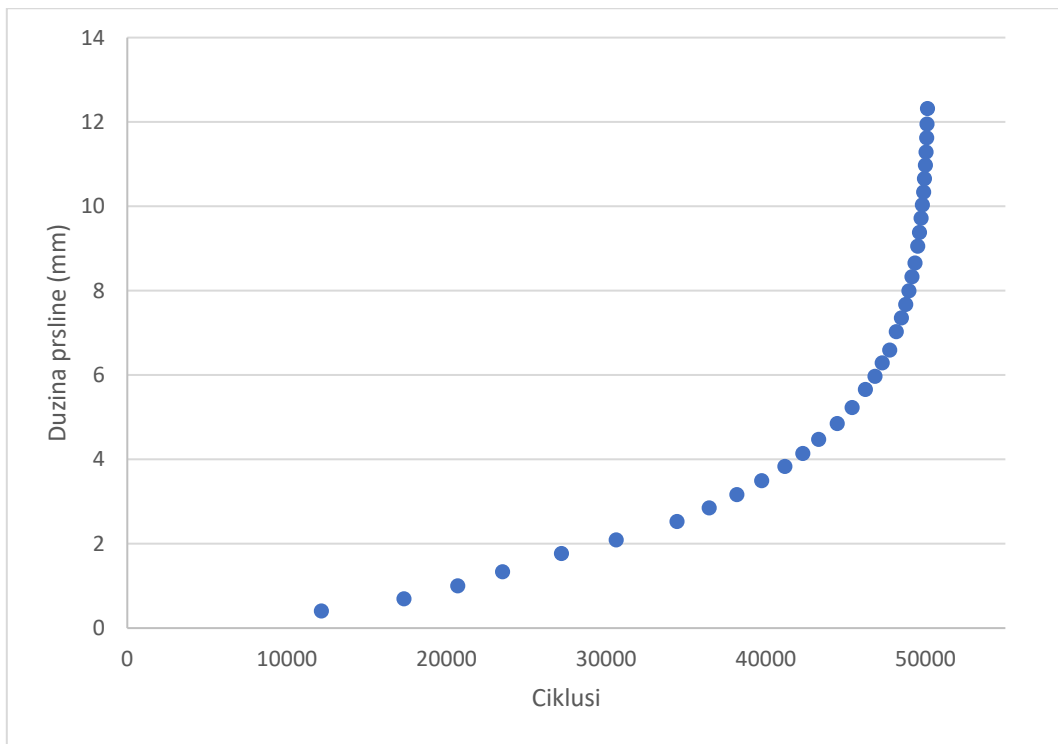
(a)

SIFS (K1)
 Type: SIFS - Contour 6
 Unit: MPa·mm^{0.5}
 Time: 36
 Max: 4105.9
 Min: 4022.3



(b)

Slika 4.27. Vrednosti FIN K_I u $MPa\sqrt{mm}$, od: (a) otvaranja do (b) konačne dužine prsline za HT



Slika 4.28. Dijagram zavisnosti $a - N$ za simuliranu eprvetu na HT

5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Eksperimentalni rezultati

5.1.1. Hemijski sastav ispitivanog čelika

Rezultati hemijske analize dobijeni u različitim akreditovanim laboratorijama koji su prikazani u tabeli 3.4 su gotovo identični sa prvim merenjem i pokazali su da ispitivani materijal po svom hemijskom sastavu ne odgovara uslovno deklarisanom legiranom čeliku 14 MoV 6-3. Opet, sadržaj važnih legirajućih elemenata, a to su molibden, vanadijum i hrom (Mo, V i Cr) ne odgovara vrednostima sadržanim u standardu SRPS EN 10216-2:2014. Naime, značaj prisustva ovih legirajućih elemenata se ogleda kroz njihov uticaj na mikrostrukturu i na-mehaničke osobine čelika pri radu na povišenim temperaturama.

Molibden utiče na povećanje zatezne čvrstoće, napona tečenja i sposobnosti deformisanja, takođe utiče na povećanje udarne žilavosti. Sa povećanjem sadržaja Mo, poboljšavaju se mehaničke osobine na povišenim temperaturama, sprečava se krtost i poboljšavaju se otpornost na koroziju i prokaljivost.

Sa povećanjem sadržaja vanadijuma, povećava se zatezna čvrstoća, otpornost prema starenju i otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama.

Relativno visok sadržaj hroma doprinosi otpornosti ovog čelika na koroziju. Povećanjem sadržaja hroma povećava se sposobnost deformisanja ali se istovremeno smanjuje udarna žilavost.

Analizirajući dobijene rezultate hemijske analize može se konstatovati da je dobijeni hemijski sastav najpribližniji legiranom čeliku za rad na povišenim temperaturama oznake 16 CrMo 4. Deklarisani hemijski sastav legiranog čelika za rad na povišenim temperaturama oznake 16 CrMo 4 je prikazan u tabeli 3.5. Zato smo u radu za analizirani čelik koristili naziv *legirani hrom-molibdenski čelik za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiran vanadijumom*.

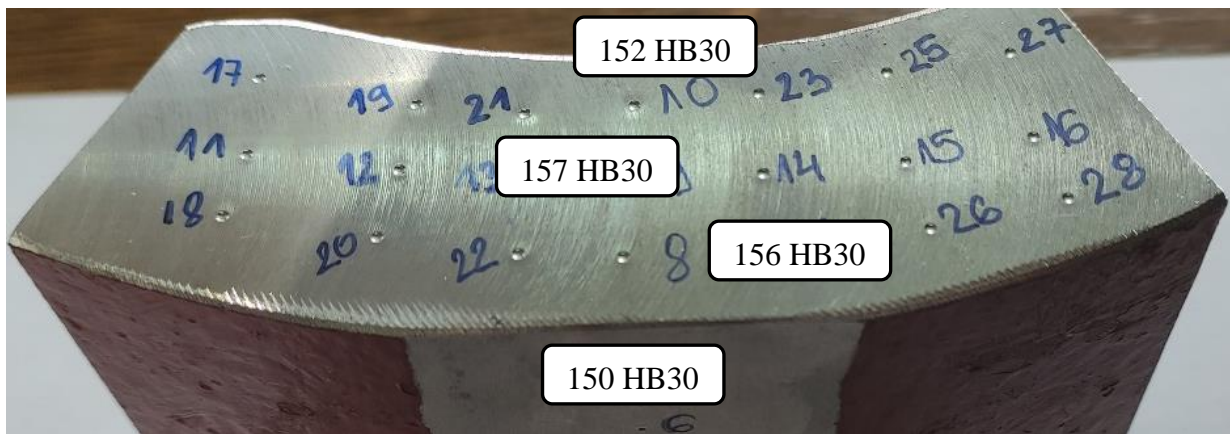
5.1.2. Tvrdoća

Rezultati izmerenih vrednosti tvrdoće na ispitivanom uzorku cevi na mernim mestima označenim na sl. 3.3, prikazani su u tabeli 3.6. Srednje vrednosti izmerenih tvrdoća prikazane su na sl. 5.1.

Kako je propisana tvrdoća za legirani čelik kvaliteta 14 MoV 6-3 145 – 190 HBW 2.5/187.5, a za legirani čelik 16 CrMo 4 160-205 HBW 2.5/187.5, a na osnovu rezultata ispitivanja tvrdoće novog-neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, može se zaključiti da tvrdoća na spoljašnjoj površini cevi odgovara tvrdoći legiranog čelika kvaliteta 14 MoV 6-3 145 – 190 HBW 2.5/187.5, a u okviru standardom SRPS EN 10216-2:2014 predviđenih vrednosti za ovaj materijal. Nešto niže vrednosti od izmerenih vrednosti u unutrašnjosti cevi su najverovatnije rezultat razugljeničenja površinskog sloja cevi.

Tvrdoća na 10 mm - poprečno ispod spoljašnje površine cevi parovoda odgovara tvrdoći legiranog čelika kvaliteta 14 MoV 6-3 145 – 190 HBW 2.5/187.5, a u okviru standardom SRPS EN 10216-2:2014 predviđenih vrednosti za ovaj materijal. Tvrdoća u sredini poprečnog preseka cevi parovoda odgovara tvrdoći legiranog čelika kvaliteta 14 MoV 6-3 145 – 190 HBW 2.5/187.5, a u okviru standardom SRPS EN 10216-2:2014 predviđenih vrednosti za ovaj materijal. Tvrdoća na 10mm - poprečno iznad unutrašnje površine cevi parovoda odgovara tvrdoći legiranog čelika kvaliteta 14 MoV 6-3 145 – 190 HBW 2.5/187.5, a u okviru standardom SRPS EN 10216-2:2014 predviđenih vrednosti za ovaj materijal.

Merenjem vrednosti tvrdoće smo dodatno potvrdili konstataciju da se radi o niskolegiranom hrom-molibdenskom čeliku za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranom vanadijumom.



Slika 5.1. Srednje vrednosti izmerenih tvrdoća na ispitivanom uzorku cevi

5.1.3. Zatezne osobine

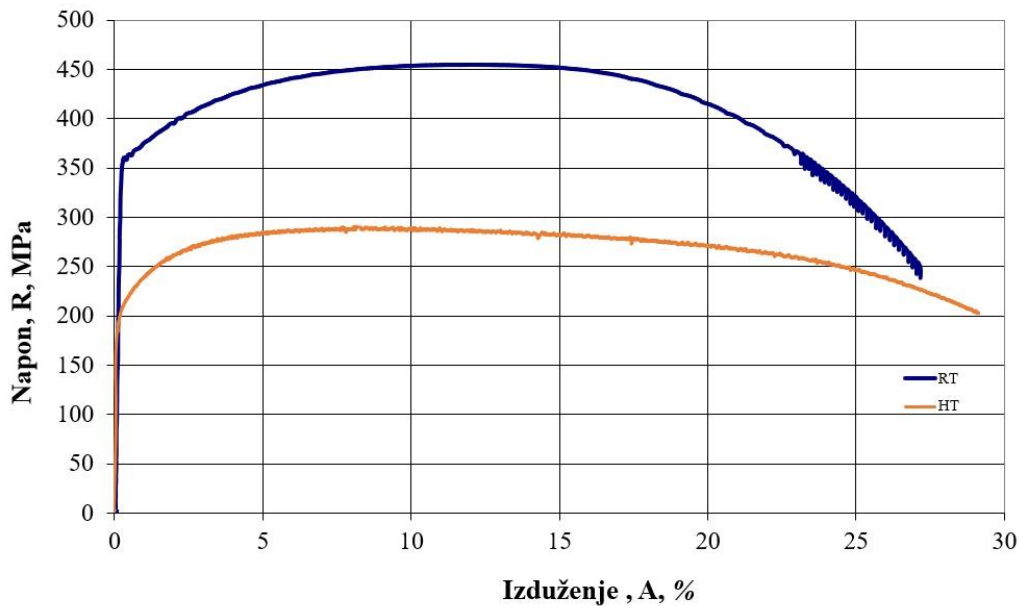
Dobijene vrednosti napona tečenja na sobnoj temperaturi (RT), su u proseku 363 *MPa* dok sa povećanjem temperature vrednost napona tečenja opada, i na radnoj temperaturi od 540 °C (HT) iznosi 215 *MPa*.

Zatezna čvrstoća ima istu tendenciju promene kao i napon tečenja. Dobijene vrednosti zatezne čvrstoće kod OM su u proseku 458 *MPa* na RT, dok sa povećanjem temperature vrednost zatezne čvrstoće opada na 300 *MPa*. Vrednosti modula elastičnosti *E* takođe opadaju sa porastom temperature, na RT iznose oko 197 *GPa*, dok je vrednost na HT 138 *GPa*.

Jasno se vidi opadanje čvrstoće i rast deformacije sa porastom temperature ispitivanja, sl. 5.2. Izduženje pri lomu na RT iznosilo je 26,8%, dok se na HT povećalo na 29,4%. Povećanje izduženja je praćeno fenomenom promene odnosa homogenog i nehomogenog izduženja.

Analizirajući dobijene rezultate ispitivanja zatezanjem na sobnoj i povišenoj temperaturi epruveta izvađenih iz uzorka novog OM datih u tabeli 3.7 i 3.8, može se konstatovati da su rezultati ispitivanja novog materijala u granicama standardom predviđenih vrednosti za legirani čelik kvaliteta 14 MoV 6-3, a u okviru standardom [5.1] predviđenih vrednosti za ovaj materijal. Dobijene vrednosti su niže od vrednosti za legirani čelik 16 CrMo 4.

Dobijeni rezultati zatezanja idu u prilog konstataciji da se radi o legiranom hrom-molibdenskom čeliku za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranim vanadijumom. Konstatacija da legirani čelik za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranim vanadijumom predstavlja optimalni odnos karakteristika legiranih čelika 14 MoV 6-3 i 16 CrMo 4, je prisutna i u nomenklaturi jednog od najvećih svetskih proizvođača debelih čeličnih limova firme DILLINGER HÜTTE GTS. Naime ova firma godišnje proizvodi blizu $2,3 \cdot 10^6$ t debelih čeličnih limova raznog kvaliteta, gde posebno mesto zauzimaju limovi i cevi namenjeni za rad na povišenim temperaturama.



Slika 5.2. Poređenje zateznih osobina uzorka OM-1 ispitano na sobnoj (RT) i na radnoj temperaturi (HT)

5.1.4. Udarne ispitivanja

Rezultati energija udara za uzorke OM izvađene u L- i T-pravcu i ispitane na sobnoj RT i radnoj HT temperaturi ilustrovani su na dijagramima na sl. 5.3.

Na osnovu dobijenih rezultata udarnih ispitivanja vidi se da sa porastom temperature ispitivanja dolazi do pada ukupne energije udara E_{uk} , sl. 3. 29 i sl. 5.3. Dobijene vrednosti ukupne energije udara, kod epruveta uzorkovanih iz L-pravca se kreću od 103 J dobijenih ispitivanjem na sobnoj temperaturi (RT) do 97 J dobijenih ispitivanjem na radnoj temperaturi od 540 °C (HT), a kod epruveta uzorkovanih u T-pravcu se kreću od 217 J dobijenih ispitivanjem na RT do 140 J dobijenih ispitivanjem na HT.

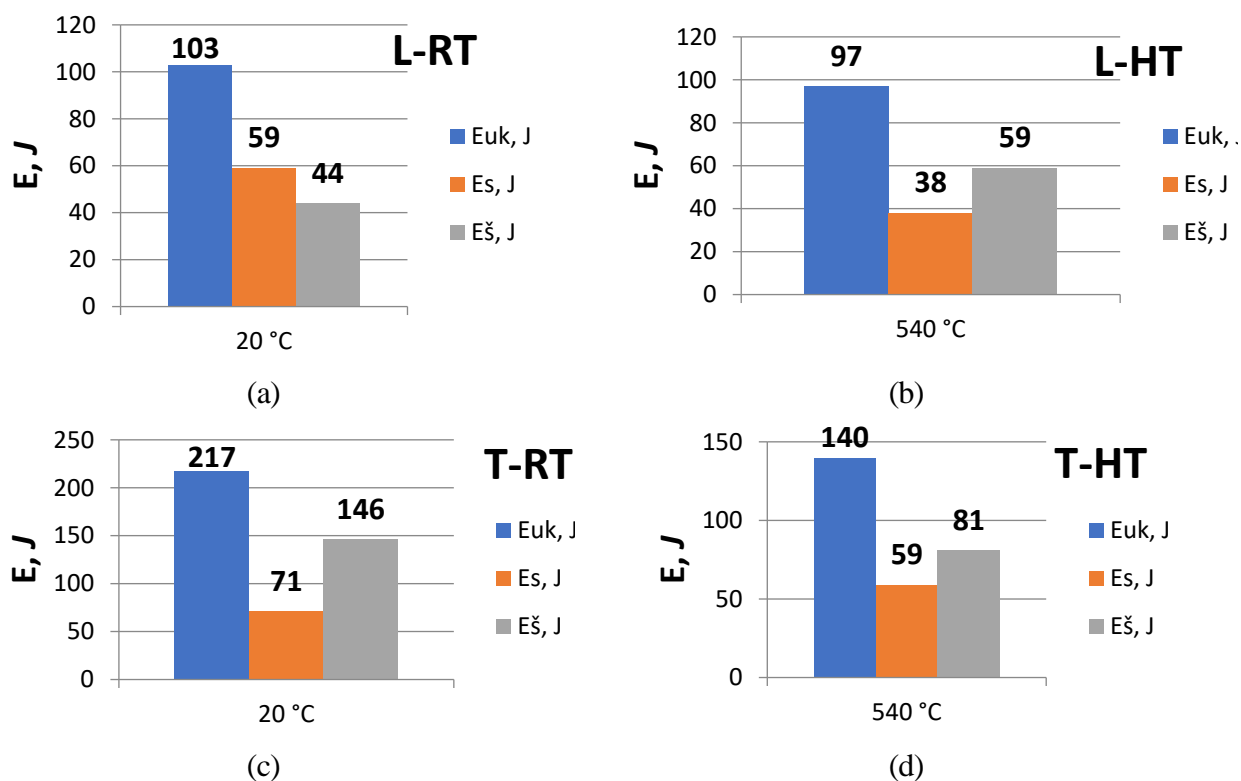
Učešće energije stvaranja prsline, E_s kod epruveta uzorkovanih u L-pravcu, se kreće od 59 J dobijenih na RT do 38 J dobijenih na HT. Vrednosti energije širenja prsline $E_{\bar{s}}$ se kreću od 44 J na RT do 59 J dobijenih na HT.

Učešće energije stvaranja prsline, E_s kod epruveta uzorkovanih u T-pravcu, se kreće od 71 J dobijenih na RT do 59 J dobijenih na HT. Vrednosti $E_{\bar{s}}$ se kreću od 146 J dobijenih na RT do 82 J dobijena na HT.

Poređenjem rezultata za uzorke izvađene iz cevi u uzdužnom L-pravcu na sobnoj RT i na radnoj HT temperaturi od 540 °C vidimo da su vrednosti ukupne energije i energije stvaranja prsline nešto veće na sobnoj nego na radnoj temperaturi dok je energija potrebna za širenje prsline nešto veća na radnoj temperaturi. Takođe je maksimalna sila na RT veća od sile na HT.

Poređenjem rezultata za uzorke izvađene iz cevi u poprečnom T-pravcu vidimo da su sve tri vrednosti energije kao i maksimalna sila, veće na sobnoj nego na radnoj temperaturi.

Takođe se može zapaziti da nema veće razlike između vrednosti dostignute maksimalne sile kod uzoraka izvađenih u cevi u dva različita pravca na obe temperature ispitivanja, sl. 3.17 do 3.28. Maksimalna dostignuta sila na RT je oko 13% veća od sile na HT što je i očekivano jer su na RT veće i čvrstoća i tvrdoća.



Slika 5.3. Uporedne vrednosti ukupne energije udara E_{uk} , energije stvarana E_s i energije širenja prsline za uzorke OM izvađene iz cevi u L-i T-pravcu, testirane na sobnoj RT i radnoj HT temperaturi

5.1.5. Žilavosti loma pri ravnoj deformaciji

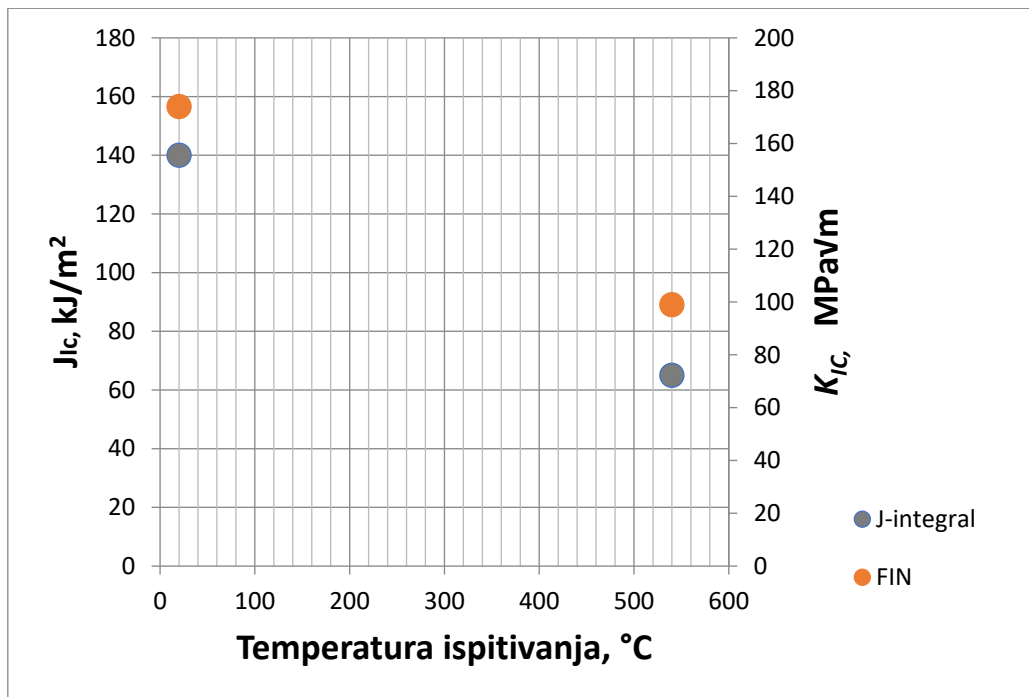
Poređenje vrednosti J_{Ic} i K_{Ic} uzoraka ispitanih na sobnoj RT i radnoj HT temperaturi od 540 °C prikazano je na sl. 5.4.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja epruveta izvađenih iz cevi izrađenih od neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti J_{Ic} - integrala, odnosno žilavosti loma K_{Ic} .

Vrednosti žilavosti loma K_{Ic} ispitanih uzoraka, tabela 3.11., kreću se od 174 $MPa\sqrt{m}$ dobijene ispitivanjem na RT i opadaju do vrednosti 99 $MPa\sqrt{m}$ na povišenoj HT. Dobijene vrednosti kritične dužine prsline, a_c , tabela 3.11, se vrlo malo menjaju kada je u pitanju RT ($a_c = 73$ mm) ili HT temperatura ($a_c = 69$ mm). To je bilo i za očekivati jer su za izračunavanje kritične dužine prsline, a_c , korišćene stvarne vrednosti napona tečenja, dobijene ispitivanjem zatezanjem.

Bez obzira što je prisutna osetna razlika dobijenih rezultata žilavosti loma, K_{Ic} na RT i HT temperaturi (K_{Ic} je za čak 43% manji na HT), dobijene vrednosti kritične dužine prsline, a_c , pokazuju da ovaj materijal, legirani hrom-molibdenski čelik za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiran vanadijumom, ima podjednako dobru otpornost i prema razvoju prsline, sa aspekta dostizanja kritične dužine prsline, a_c , kao važnog parametra u oceni ponašanja materijala u prisustvu greške tipa prsline.

Vrednosti J -integrala od $J_{Ic} = 65$ kJ/m^2 su na HT smanjene nešto više od 50% u odnosu na vrednosti na RT ($J_{Ic} = 140$ kJ/m^2), sl. 5.4., ali zajedno sa vrednostima na RT ukazuju na relativno veliku otpornost materijala na nastanak i rast prsline.



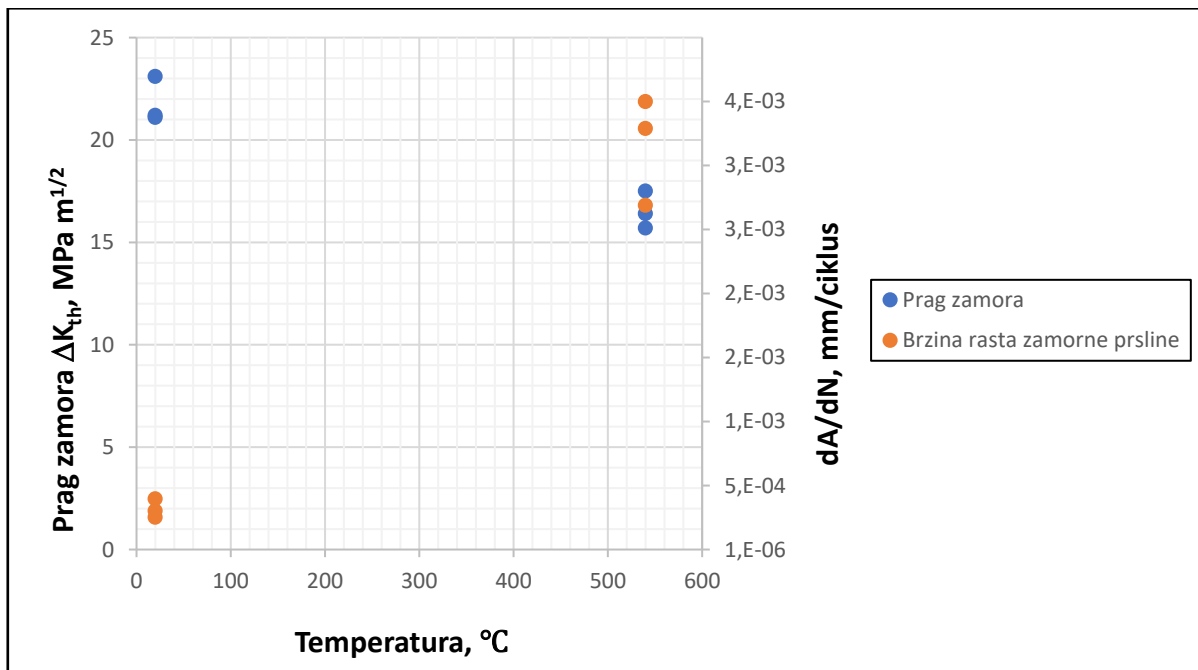
Slika 5. 4. Poređenje kritičnih vrednosti J -integrala i FIN za uzorke ispitane na sobnoj i radnoj temperaturi

5.1.6. Brzina rasta zamorne prsline

Poređenje vrednosti praga zamora ΔK_{th} i brzine rasta zamorne prsline da/dN uzoraka izvađenih iz cevi od neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, ispitanih na sobnoj (RT) i radnoj (HT) temperaturi od 540 °C prikazano je na sl. 5.5.

Uticaj mesta postavljanja zareza i inicijacije prsline, kao i temperatura ispitivanja, imaju odlučujući uticaj na vrednosti praga zamora ΔK_{th} kod legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom. Vrednosti praga zamora, ΔK_{th} se kreću od 21,1 $MPa\sqrt{m}$ na RT i opadaju do 15,6 $MPa\sqrt{m}$ na HT, tabela 3.12.

Uticaj temperature ispitivanja na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , kod epruveta sa zarezom u OM je grafički prikazan na slici 3.60. Možemo videti da sa povećanjem temperature povećava i brzina širenja zamorne prsline da/dN . Prosečna dobijena vrednost brzine rasta zamorne prsline na RT iznosi 0,317 $\mu m/cycl$, dok je na HT deset puta veća i iznosi 3,16 $\mu m/cycl$.



Slika 5.5. Uporedne vrednosti ΔK_{th} i da/dN kod OM sa porastom temperature ispitivanja

5.1.7. Metalografija

5.1.7.1. Rezultati metalografske analize na optičkom mikroskopu

Struktura novog-neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskom čeliku za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom je feritna sa perlitno-beinitnim konstituentima po granicama zrna ferita i karakteriše je nehomogena veličina zrna, sl. 3.62 od (a) do (c). Kristalna zrna su nepravilnog oblika i složene geometrije sa velikim brojem granica. U strukturi je zastupljena i značajna količina sitno disperznih karbida.

S obzirom da nije bilo moguće analizirati sastava karbida, a na osnovu istraživanja drugih autora, pretpostavlja se da je reč o M_3C i MC karbidima. M_3C karbid je u osnovi cementit Fe_3C , ali često sadrži i druge metalne komponente, posebno mangan (Mn), pri čemu je sadržaj tih elemenata kontrolisan tendencijom da se smeste u feritnu matricu i afiniteta prema ugljeniku za formiranje karbida. MC karbidi sa kubnom strukturom su uglavnom formirani sa V, Ti i Nb. [5.2, 5.3]

5.1.7.2. Rezultati analize SEM fotografija

5.1.7.2.1. Prelomne površine epruveta za udarna ispitivanja

Uporedni dijagrami udela energije stvaranja E_s i energije širenja E_s prsline u ukupnoj energiji udara E_{uk} , za uzorke izvađene iz cevi u uzdužnom L- i poprečnom T-pravcu, ispitane na sobnoj RT i radnoj HT temperaturi od 540 °C prikazano je na sl. 5.6.

Velika razlika u ukupnoj energiji udara E_{uk} uzoraka u L-pravcu od 94 J i T-pravcu od 213 J, pri ispitivanju na sobnoj temperaturi (RT) prikazanih na sl. 5.6 (a) i (c), je u saglasnosti sa makroskopskim izgledom uzoraka nakon ispitivanja, kao i mikroskopskim karakteristikama površina preloma, sl. 3.63.

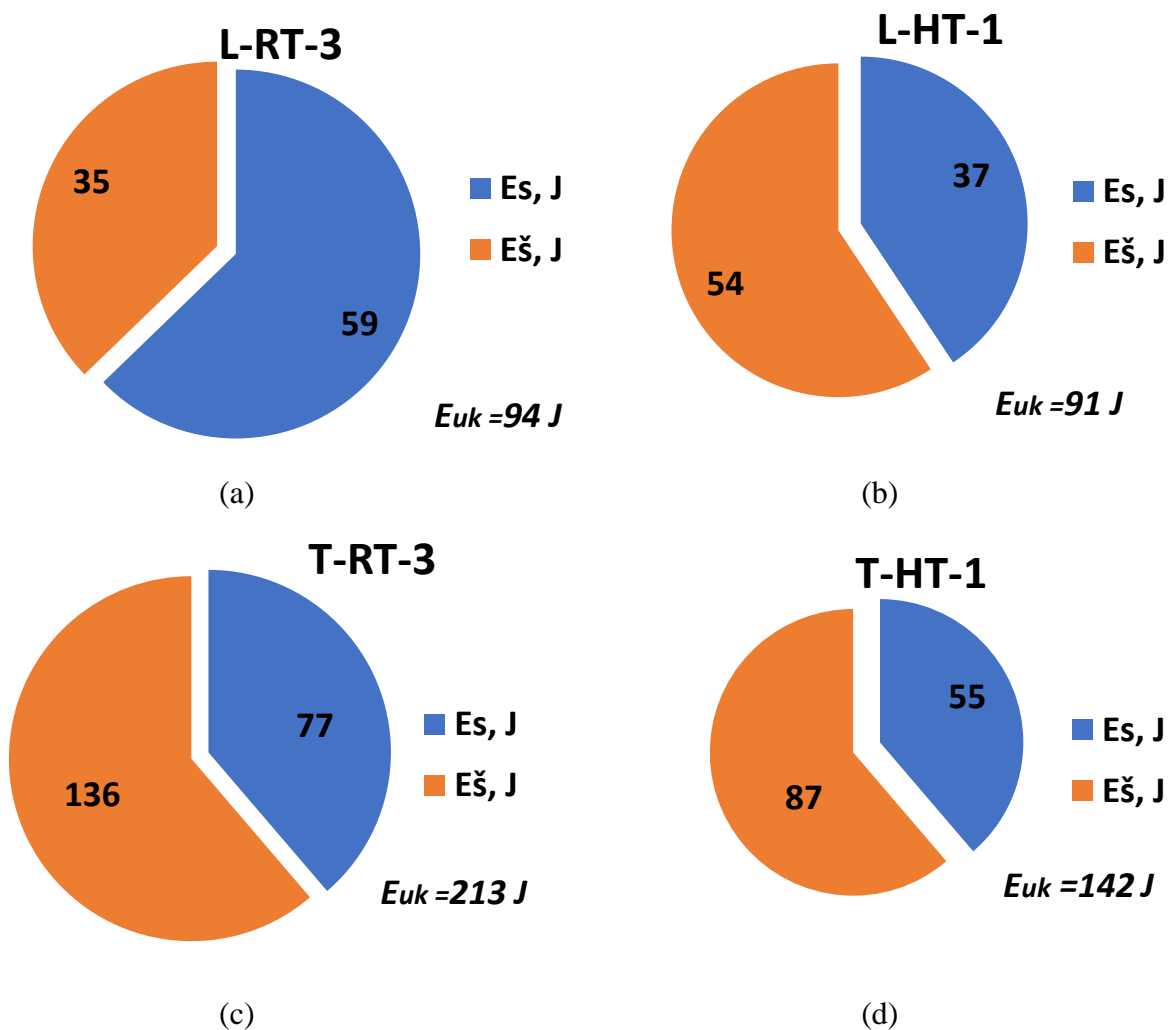
Na uzorcima gde je zarez nanet u T-pravcu cevi, uočavaju se velike usne smicanja, tj. velika plastična deformacija, sl.3.63 (a), za razliku od uzorka gde se prsline širila u L-pravcu. Na površini preloma u zoni stvaranja prsline kod oba uzorka se uočava duktilni, jamičasti lom, sl.3.63 (b). Jamice nastaju dekohezijom granične površine između čestica i osnove, a rast prsline se odvija koalescencijom jamica [5.4]. Kod epruveta u L-pravcu jamice su poligonalne, dok su kod T-pravca izdužene.

Izdužene jamice ukazuju na veću energiju loma E_s , što je i izmereno u eksperimentu (77 J u T-pravcu, naspram 59 J u L-pravcu), sl. 5.6. (a) i (c)

U zoni daljeg rasta prsline kod uzoraka u L-pravcu uočene su oblasti krtoq loma, loma cepanjem, za razliku od uzorka u T-pravcu, gde je prisutan duktilni, jamičasti lom. Ovo objašnjava razlike u iznosu energija i razlike na dijagramima zavisnosti sila-vreme i energija-vreme, gde se vidi da je energija širenja prsline E_s kod uzoraka u L-pravcu, sl. 3.17, znatno manja (strmi pad krive) od energije kod uzorka u T-pravcu, sl. 3.23.

Makroskopski izgled epruveta ispitanih na radnoj temperaturi od 540 °C (HT), sl. 3.64 (a), sa različitim usnama smicanja, kao i u slučaju uzoraka ispitanih na RT, ukazuje na veću žilavost uzorka gde je zarez nanet u T-pravcu. Razlika u ukupnoj energiji udara E_{uk} uzoraka, sl. 5.6. (b) i (d), pri ispitivanju na povišenoj temperaturi (u L-pravcu od 91 J i 142 J u T-pravcu), je u saglasnosti sa makroskopskim izgledom uzoraka nakon ispitivanja, kao i mikroskopskim karakteristikama površina preloma, sl. 3.64 (b) i (c). Površine preloma uzoraka i u L- i u T-pravcu pokazuju karakteristike duktilnog loma. Površine preloma su pokrivena jamicama sa vidljivim česticama uključaka u dnu jamica. Nehomogena raspodela veličine jamica, od najsitnijih, do krupnih, veličine i do 100 μm , je posledica nehomogene raspodele veličine uključaka i čestica sekundarnih faza u mikrostrukturi. Sitne čestice su najuočljivije na desnoj sl. 3.64 (b) koja prikazuje stvaranje prsline kod uzorka izvađenog u T-pravcu. Uočeno je da su zidovi krupnih jamica stepenasti. Ovakva morfologija zidova jamica sa kliznim stepenicama („serpentine glide“) je nastala u fazi rasta mikrošupljina usled velike plastične deformacije [5.5], a smatra se da je posledica klizanja u povoljno orijentisanim ravnima [5.6].

Na uzorcima gde je zarez nanet u L-pravcu, u zoni stvaranja prsline neposredno do zareza, leva sl. 3.64 (b), jamice su poligonalne, dok su kod uzoraka gde je zarez nanet u T-pravcu cevi, jamice plitke i izrazito izdužene desna sl. 3.64 (b). Ovo ukazuje na prisustvo smicajnog duktilnog loma, a samim tim i veću energiju potrebnu za stvaranje prsline E_s kod ovog uzorka u odnosu na uzorak sa zarezom u L-pravcu, sl. 5.6. (b) i (d). Rezultati dobijeni na instrumentiranom Charpy klatnu su to i pokazali (37 J u L-pravcu, naspram 55 J u T-pravcu).



Slika 5.6. Uporedni dijagram udela energije stvaranja (E_s) i energije širenja ($E_{\dot{s}}$) prsline u ukupnoj energiji udara za uzorke vadene iz cevi u L- i T-pravcu i ispitane na sobnoj (RT) i radnoj (HT) temperaturi od 540 °C

5.1.7.2.2. Prelomne površine epruveta za ispitivanje žilavosti loma

Oba snimljena i analizirana uzorka su ispitivana na sobnoj temperaturi. Što se tiče ova dva uzorka, isti je tip loma i ne mogu se uočiti znatne razlike. Ako se pogledaju rezultati u tabeli 3.11, vrednosti žilavosti loma su veoma bliske, kod uzorka ML-OM-1RT $K_{IC} = 172,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, a kod uzorka označenog kao ML-OM-2RT $K_{IC} = 178,6 \text{ MPa}\sqrt{m}$, sl.5.4.

U zonama I i II su prisutne linije odmora (strije), koje su izraženije u zoni II, odnosno u ovoj zoni se uočava veće rastojanje između strija jer je tokom ispitivanja bilo primenjeno veće opterećenje u zoni II. Takođe su vidljive i sekundarne prsline.

U zoni CTOD izgled loma je duktilni, jamičasti, sa jamicama znatno različite veličine. U mnoštvu malih jamica, uočavaju se velike jamice veličina je od 15 do 40 μm . Ove jamice su nastale na česticama krupnih uključaka. Uočeno je prisustvo uključaka veličine i preko 20 μm . Na zidovima ovakvih jamica su uočene tzv. klizne stepenice („serpentine glide“). Ovakva morfologija zidova jamica sa kliznim stepenicama je nastala u fazi rasta mikrošupljina usled velike plastične defomacije [5.4], a smatra se da je posledica klizanja u povoljno orjentisanim ravnima [5.5, 5.6].

5.1.7.2.3. Prelomne površine epruveta za određivanje brzine rasta zamorne prsline

Slikani su uzorci oznake OM-2RT i OM-2HT sa uvećanjem 500x. Uočeno je da je morfologija površine uzorka ispitanog na povišenoj temperaturi krupnozrnija i u zoni stvaranja i u zoni širenja prsline. Na istom uzorku uočene su i ravne fasete, sl. 3.65. Sve navedeno ide u prilog činjenice da je na povišenoj temperaturi manji otpor širenju prsline, tabela 3.11, odnosno vrednosti brzine da/dN su za red veličine veće i iznose $3,29 \cdot 10^{-3} \mu m/cycl$ kod uzorka OM-2HT u odnosu na brzinu od $0,303 \cdot 10^{-3} \mu m/cycl$ kod uzorka OM-2RT, kao što su i pokazali kvantitativni rezultati.

5.2. Rezultati numeričke analize

5.2.1. Numerički proračun J - integrala i kritične vrednosti faktora intenziteta napona

Numerički određena kritična vrednost J - integrala u slučaju epruvete za radnu (HT) temperaturu je $J_{Ic} = 55,921 \text{ kJ/m}^2$ (eksperimentom je dobijeno 65 kJ/m^2), a numerički određena kritična vrednost faktora intenziteta napona na HT je $K_{Ic} = 2892,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 91,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (eksperimentalno je dobijeno $99 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Za epruvetu simuliranu za sobnu temperaturu (RT), numerički određena vrednosti kritičnog J -integrala je $J_{Ic} = 126,7 \text{ kJ/m}^2$ (eksperimentom je dobijeno 140 kJ/m^2), a numerički određena vrednosti kritičnog FIN-a iznosila $K_{Ic} = 3374,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 106,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (eksperimentalno je dobijeno $174 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Kao što možemo videti, slaganja sa eksperimentom su dobra: dobijene vrednosti za J_{Ic} su za 14% manje nego u eksperimentu za epruvetu na HT, dok je za epruvetu na RT slaganje odlično, numerički dobijena vrednost je oko 9% manja od vrednosti dobijene eksperimentom.

Vrednost K_{Ic} dobijena numeričkom simulacijom za HT je samo 7,5% manja od eksperimentalno dobijene što je odlično slaganje. Međutim u slučaju RT, K_{Ic} dobijena numeričkom simulacijom je čak 38% manja od eksperimentalno dobijene vrednosti. Razlika se može objasniti nesavršenošću korišćenog numeričkog modela koji je zasnovan samo na elastičnim osobinama materijala, ali se generalno rezultati numeričkih simulacija mogu smatrati zadovoljavajućim.

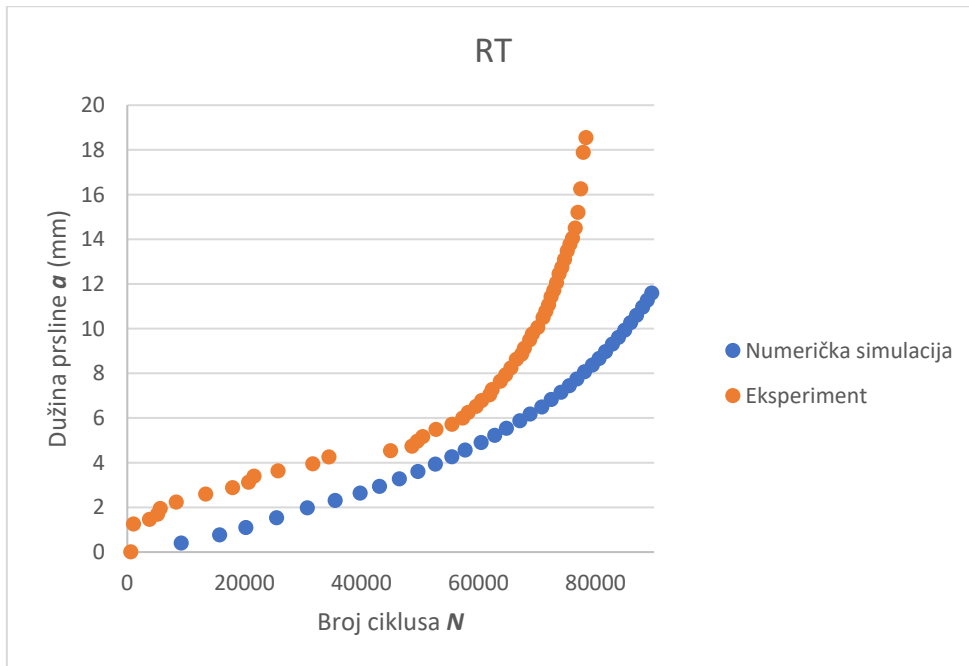
5.2.2. Numeričko predviđanje rasta zamorne prsline

Na sl. 5.7. prikazano je poređenje krivih zavisnosti $a-N$ koje su dobijene eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkim simuliranjem rasta prsline na sobnoj (RT) temperaturi kroz ispitivani materijal legirani hrom-molibdenski čelik za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiran vanadijumom, dok se na sl. 5.8 vidi isto poređenje na radnoj temperaturi (HT) od $540 \text{ }^\circ\text{C}$.

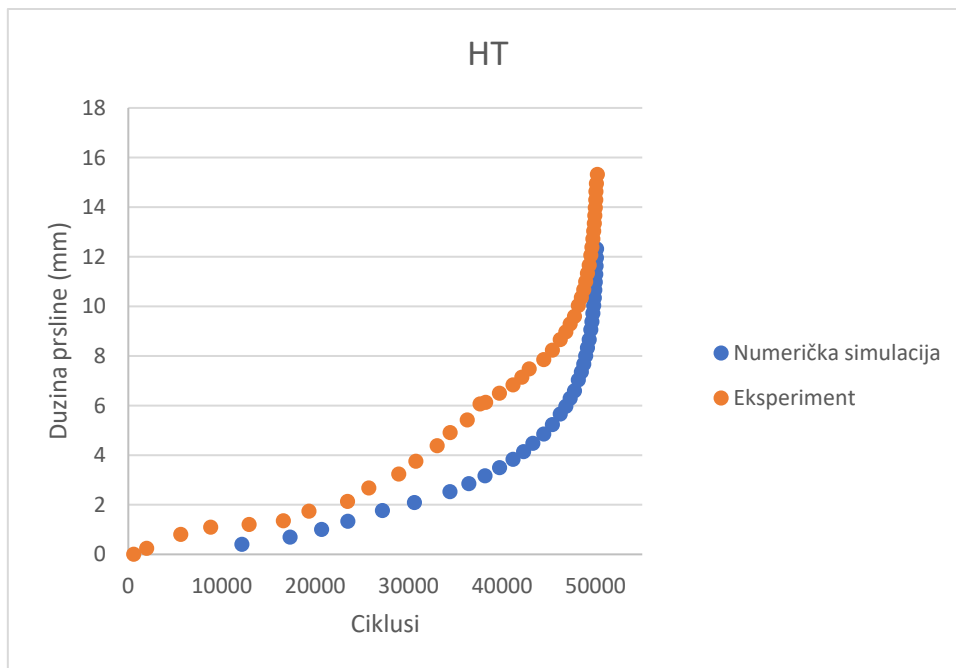
Vrednosti faktora intenziteta napona za dužinu prsline od $11,5 \text{ mm}$ u slučaju epruvete ispitivane na sobnoj temperaturi (RT) su išle do vrednosti $301 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 9,53 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, sl. 4.23, dok su u slučaju epruvete za povišene temperature (HT) za dužinu prsline od $12,3 \text{ mm}$ iznosile $4105,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 129,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, sl. 4.27.

Numerički simuliran broj ciklusa potreban za dostizanje krajnje dužine prsline je, u slučaju epruvete za RT pokazao nešto veće vrednosti od eksperimentalnih rezultata ($N_{num} = 89623$ ciklusa spram $N_{exp} = 72887$ ciklusa), sl. 4.24, oko 18 % više, dok su u slučaju epruvete za HT slaganja odlična, dobijen je gotovo isti broj ciklusa pri numeričkoj simulaciji ($N_{num} = 50130$ ciklusa i $N_{exp} = 50300$ ciklusa) kao u eksperimentu, sl. 4.28.

Broj ciklusa potreban za dostizanje određene dužine prsline na RT u slučaju numeričke simulacije je nešto veći od broja ciklusa dobijenog. Nagib krivih pri manjem broju ciklusa zamaranja na RT ($N \approx 60000$ ciklusa) je isti i u slučaju eksperimentalnog ispitivanja i u slučaju numeričke simulacije. Pri daljem povećanju broja ciklusa zamaranja pa do dostizanja kritične dužine prsline, nagib je nešto veći u slučaju eksperimenta, što se može objasniti time da je brzina zamaranja bila veća u eksperimentu nego pri simulaciji, a što je posledica mikrostrukture samog materijala koja se ne može uzeti u obzir pri numeričkoj simulaciji. Pri simuliranju za HT, nagib krivih je bio vrlo sličan i dijagram zavisnosti $a - N$ u velikoj meri odgovara eksperimentu..



Slika 5.7. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih krivih zavisnosti $a-N$ za uzorak ispitivan na sobnoj (RT) temperaturi



Slika 5.8. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih krivih zavisnosti $a-N$ za uzorak ispitivan na radnoj (HT) temperaturi

6. ZAKLJUČCI

Predmet istraživanja ove disertacije je bilo mehaničko i mikrostrukturno ispitivanje novog, neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom. To je materijal koji se koristi za izradu parovoda termoelektrana. Materijal je detaljno ispitan u pogledu ponašanja u uslovima statičkog i zamarajućeg opterećenja, na temperaturi okoline (RT) i na radnoj (HT) temperaturi od 540 °C.

Mehanička ispitivanja materijala, merenje tvrdoće, određivanje zateznih osobina na RT i HT, određivanje energije udara na RT i HT, određivanje kritičnih veličina J -integrala i faktora intenziteta napona na RT i HT, pokazala su da je cev, iz koje su izvađene epruvete za navedena ispitivanja, izrađena od materijala dobrog kvaliteta koji je pokazao i dobru otpornost na rast zamorne prsline i dobru žilavost. napomenućemo da su ispitivanja osobina žilavosti materijala rađena i u uzdužnom i u poprečnom pravcu na pravac valjanja. Parametri rasta zamorne prsline su osnov za procenu bezbednosti rada elemenata konstrukcije sa prslinom koji neće dovesti do loma u vremenskom periodu između dva uzastopna pregleda.

Na osnovu rezultata ispitivanja novog materijala i na osnovu procene preostalog veka sprovedenih u ovom radu, mogu da se izvedu sledeći zaključci:

- Poređenje zateznih osobina novog materijala na sobnoj i na radnoj temperaturi ukazuje na očekivano smanjenje zatezne čvrstoće i napona tečenja na povišenoj temperaturi. Vrednosti modula elastičnosti takođe opadaju sa porastom temperature.
- Rezultati ispitivanja energije, razdvojeni na energiju stvaranja i energiju širenja prsline, ukazuju na veći udeo otpornosti materijala na širenje prsline u slučaju i sobne i radne temperature kod epruveta uzorkovanih u poprečnom pravcu. Kod epruveta uzrokovanih u uzdužnom, je malo veći udeo otpornosti materijala na stvaranje prsline na RT, dok je na HT veći udeo otpornosti materijala na širenje prsline.
- Ispitivanje J -integrala na CT epruvetama omogućilo je uvid u otpornost materijala na stvaranje i rast prsline. Dobijeni rezultati su pokazali da je otpornost novog, neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, na stvaranje prsline (J_{Ic} vrednost) više od duplo veća na sobnoj temperaturi u poređenju sa radnom temperaturom. Takođe je osetljivost na stvaranje prsline neeksploatisanog legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, manja od čelika prethodne generacije.
- Poređenje vrednosti brzine rasta zamorne prsline na sobnoj i na radnoj temperaturi pokazuju da se brzina rasta zamorne prsline legiranog hrom-molibdenskog čelika za rad na povišenim temperaturama nove generacije dodatno legiranog vanadijumom, povećava sa povećanjem radne temperature, ali sporije nego u slučaju materijala za rad na povišenim temperaturama prethodne generacije.
- Numerička analiza je bila zasnovana na eksperimentalno dobijenim rezultatima, pre svega vezanim za mehaničke osobine materijala, granica tečenja, zatezna čvrstoća i Paris-ovim koeficijentima. Rezultati dobijeni numeričkom analizom su pokazali dobro slaganje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima J -integrala kao i brojem ciklusa za epruvete na sobnoj i povišenoj temperaturi. Ovim je verifikovan numerički pristup rešavanju problema vezanih za rast zamorne prsline i proračun kritičnog J -integrala.

Jedan od doprinosa istraživanja sprovedenih u okviru rada na tezi je i taj da ona nisu rađena u ovoj meri za konkretan čelik. Dalja istraživanja svakako treba da idu u pravcu detaljnog ispitivanja zavarenih spojeva od ovog materijala i njihovo ponašanje na povišenoj radnoj temperaturi.

7. LITERATURA

Poglavlje 1

- [1.1] S. Sedmak, Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma, Institut GOŠA, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1980.
- [1.2] A. J. McEvily and R.P. Wei, Fracture Mechanics and Corrosion Fatigue, Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure NACE-2, 1972, pp. 381.
- [1.3] V. B. Culafic, Uvod u mehaniku loma, Masinski fakultet, Podgorica, 1999.
- [1.4] Milorad M. Zrilić, Promena lokalnog pristupa na procenu preostalog veka komponenti visokotemperatureske opreme, doktorska disertacija, Beograd, 2004
- [1.5] M. Zrilić et al., Ductile Fracture Prediction of Steam Pipeline Steel, Materials Science Forum, Vol. 518, pp. 537-542, 2006.
- [1.6] M. Zrilić et al., Experimental and numerical evaluation of a steamline behavior using local approach, Metalurgija, 46(2), pp. 87-92, 2007.
- [1.7] M. Zrilić et al., Fracture toughness and crack resistance of steam pipeline steel in initial and used states, Strength of Material, 36(1), pp. 47-58, 2004.
- [1.8] B. Medjo et al., Micromechanical estimates of the critical values of J -integral for the steel of steam pipelines, Materials Science, 45(4), pp. 523-531, 2009.
- [1.9] ASTM E399-17-Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials.
- [1.10] ASTM E1290-08e1-Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement.
- [1.11] ASTM E1820-18ae1-Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- [1.12] Petar Terzić, Ispitivanje materijala, Deo I: Mehanička ispitivanja, Beograd, 1972.
- [1.13] BS 7448-1: 1997-Fracture Mechanics Toughness Tests Part 2: Method for Determination of KIC, Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials.
- [1.14] YJ Kim et al., On experimental J estimation equations based on CMOD for SE (B) specimens, Journal of testing and evaluation; 29(1), pp. 67-71, 2001.
- [1.15] MT Kirk et al., J and CTOD estimation equations for shallow cracks in single edge notch bend specimens, Journal of Testing and Evaluation; 21(4), pp. 228-38, 1993.

Poglavlje 2

- [2.1] D. Momčilović, Ispitivanje otpornosti na nastanak i rast prslina čelika 12H1MF pri dejstvu udarnog opterećenja, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [2.2] B. Grujić, Identifikacija kvaliteta i pouzdanosti materijala izloženog puzanju u termoenergetskim postrojenjima, doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1999.
- [2.3] N. Vidojević, N. Simović, Mikrostrukturna analiza niskolegiranih vatrootpornih čelika odabranog sastava, zbornik Kontrola i praćenje stanja metala i radnog veka termoblokova EPS, Beograd, 1995.
- [2.4] M. Trušulesku, T. Fleser, Uticaj strukturnog stanja na vek komponenti termoelektrane, zbornik Kontrola i praćenje stanja metala i radnog veka termoblokova EPS, Beograd, 1995.
- [2.5] Lj. Milović, Analiza integriteta zavarenih komponenata procesne opreme za povišene radne temperature, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.
- [2.6] Lj. Milović et al, Application of High-Chromium Steels in Fossil Power Plants, PROCESING 2008, 4-6 june, Subotica, Serbia.
- [2.7] L. Domocova et al., Microstructure and mechanical properties of steel grade 14MoV6-3, Materials Science Forum, 782, 137-140 (2014).
- [2.8] M. Sroka et al, Assessment of the Residual Life of Steam Pipeline Material beyond the Computational Working Time, Metals, 7(3), 82, 2017.

- [2.9] R.M. Molak et al., The effect of specimen size and surface conditions on the local mechanical properties of 14MoV6 ferritic–pearlitic steel, *Materials Science and Engineering: A*, 651, pp 810-821, 2016
- [2.10] B. Medjo et al., Micromechanical estimates of the critical values of J -integral for the steel of steam pipelines, *Materials Science*, 45(4), pp. 523-531, 2009.
- [2.11] T. Maneski et al "Numerical and experimental diagnostics of structural strength", *Structural integrity and life*, Vol. 10., (2010) pp. 3-10.,
- [2.12] Đ. Drobnjak, *Krti i duktilni lom, radni materijal-skripte*, TMF, Beograd, 1993.
- [2.13] T.L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd ed. CRC Press, 2004.
- [2.14] Burzić Z., *Teorijske i eksperimentalne osnove Mehanike loma, radni materijal-predavanja*, Tehnički fakultet Bihać, 2003.
- [2.15] I. Čamagić, *Istraživanje uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama*, doktorska disertacija, Kosovska Mitrovica, 2013.
- [2.16] Jr. J. A. Harris, *Engine component retirement for cause, Executive Summarz*, Afwal-tr-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Vol.1, Ohio, 1987.
- [2.17] G.R. Irwin, Plastic zone near a crack and fracture toughness, *Proc. 7th Sagamore Research Conference on Mechanics and Metals Behavior of Sheet Material*, Vol 4, 463-478. 1960.
- [2.18] A.A. Wells, Application of fracture mechanics at and beyond general yielding, *British Welding Journal* 11, 563-570, 1963.
- [2.19] J.R. Kraft, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol 35, 379-386, 1968.
- [2.20] S. Sedmak, *Uticaj zareza i prslina na pojavu loma pri elastičnoj i plastičnoj deformaciji*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
- [2.21] X. Fang, P. G. Charalambides, A J -integral approach in characterizing the mechanics of a horizontal crack embedded in a cantilever beam under an end transverse force, *Engineering Fracture Mechanics*, 169, 35–53 (2017).
- [2.22] J. Chattopadhyay, Improved J and COD estimation by GE/EPRI method in elastic to fully plastic transition zone, *Engineering Fracture Mechanics* 73, 1959–1979 (2006).
- [2.23] V. B. Čulafić, *Uvod u mehaniku loma*, Mašinski fakultet, Podgorica, 1999.
- [2.24] Z. Perović, *Zavarene konstrukcije*, Univerzitet Crne Gore, Štamparija OBOD Cetinje, Podgorica 2002.
- [2.25] A. Sedmak, *Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija*, Monografija, Mašinski fakultet Beograd, 2003.
- [2.26] D. Gentile et al., Use of Circumferentially Cracked Bar sample for CTOD fracture toughness determination in the upper shelf regime, *Fracture and Structural Integrity*, 30, 252-262 (2014).
- [2.27] I Čamagić et al, *Primena mehanike loma u određivanju parametara rasta zamorne prsline za karakteristične oblasti zavarenog spoja. Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije*, 3, 97-103, 2008.
- [2.28] M. Burzić et al, *Uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje zavarenog spoja legiranog čelika Č.4700. Tehnička Dijagnostika 2007; 2: 19-25.*
- [2.29] Lj. Milović et al, *Determination of Fatigue Crack Growth Parameters in Welded Joint of HSLA Steel, Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 11, No.3, 2011, str. 183-187. ISSN 1451-3749.
- [2.30] P.C Paris et al, *Critical analysis of crack propagation. Journal of Basic Engineering* 1963; 85: 528-534.
- [2.31] Lj. Milović et al, *Assessment of the behaviour of fatigue loaded HSLA welded steel joint by applying fracture mechanics parameters, Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 12, No.3, 2012, str. 175-181. ISSN 1451-3749
- [2.32] D Radaj, Sonsino C.M, Fricke W. *Fatigue Assessment of Welded Joint by Local Approaches-Second Edition*. Woodhead Publishing in materials, Cambridge, 2006.
- [2.33] ASTM E647-08, "Standard test method for measurement of creep crack growth rates", West Conshohocken: ASTM 2008, Pennsylvania, USA.

- [2.34] A. M. Grbović, Istraživanje zamornog veka nosećih strukturalnih elemenata izrađenih od super legura, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
- [2.35] D. D. Živojinović, Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura aluminijuma, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [2.36] M. Rakin et al, Primena metode konačnih elemenata u inženjerstvu materijala, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd 2014.
- [2.37] M. M, Grbović A, Softverski alati u dizajnu, Mašinski fakultet, Beograd, 2017.
- [2.38] *Aleksić B. , Grbović A., Milović Lj. , Hemer A. , Aleksić V. : Numerical simulation of fatigue crack propagation: A case study of defected steam pipeline, Engineering Failure Analysis, Volume 106, December 2019. ISSN 1350-6307*
- [2.39] *Hemer A., Milović Lj., Grbović A., Aleksić B., Aleksić V.: Numerical determination and experimental validation of the fracture toughness of welded joints, Engineering Failure Analysis, Volume 107, January 2020. ISSN 1350-6307*
- [2.40] *Aleksić B., Grbović A., Hemer A., Milović Lj., Aleksić V.: Evaluation of Stress Intensity Factors (SIFs) Using Extended Finite Element Method (XFEM), In: Proceedings of the 17th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture, Eds: Ricardo R. Ambriz, David Jaramillo, Gabriel Plascencia and Moussa Nait Abdelaziz, Springer, 2018, 355-369.*
- [2.41] *Aleksić V., Momčilović D., Aleksić B., Milović Lj., Sedmak A.: Analysis of the steam line damages, 12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2015, Banja Luka, Republika Srpska, 29.05.-30.05. 2015, Zbornik radova na CD-u, 415-420.*
- [2.42] *Aleksić B., Milović Lj., Grbović A., Hemer A., Aleksić V., Zrilić M.: Experimental and numerical investigation of the critical values of J-integral for the steel of steam pipelines, ECF 22- Loading and Environmental Effects on Structural Integrity, Serbia 2018, Procedia Structural Integrity 13, 2018, 1589-1594.*
- [2.43] H. Moustbachir et al., Experimental and numerical study of stress–strain state of pressurised cylindrical shells with external defects, *Engineering Failure Analysis*, 17, 506-514 (2010).
- [2.44] M. Allouti et al., Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 21, 40-51 (2012).
- [2.45] M.A. Guidara et al., Structural integrity assessment of defected high density poly-ethylene pipe: Burst test and finite element analysis based on J-integral criterion, *Engineering Failure Analysis*, 57, 282-295 (2015).
- [2.46] C.F. Shih et al., Energy release rate along a three-dimensional crack front, *International Journal of Fracture*, 30, 79-102 (1986).
- [2.47] R. Akbari Alashti et al., Experimental and numerical investigation of ductile damage effect on load bearing capacity of a dented API XB pipe subjected to internal pressure, *Engineering Failure Analysis*, 47, 208–228 (2015).
- [2.48] Jun Hua et al., Failure analysis based on J-integral values: A case study of hydrogen blistering defect, *Engineering Failure Analysis*, 18, 924–932 (2011).
- [2.49] D. Nowel et al., Characterisation of crack tip fields under non-uniform fatigue loading, *Fracture and Structural Integrity*, 25, 1-6 (2013).
- [2.50] L.C.H. Ricardo, Crack Propagation by Finite Element Method, *Fracture and Structural Integrity*, 43, 57-78 (2018).
- [2.51] M. Kumara et al., Nonlinear Fatigue Crack Growth Simulations using J-integral Decomposition and XFEM, 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics, *Procedia Engineering* 173, 1209 – 1214 (2017).
- [2.52] A. S. Kobayashi et al., A numerical and experimental investigation on the use of J-integral, *Engineering Fracture Mechanics*, 5, 293-305 (1973).
- [2.53] www.ansys.com

Poglavlje 3

- [3.1] SRPS EN 10216-2:2014: *Bešavne čelične cevi za opremu pod pritiskom - Tehnički zahtevi za isporuku - Deo 2: Cevi od nelegiranog i legiranog čelika sa osobinama utvrđenim za povišenu temperaturu.*
- [3.2] DIN 17175:1979-05: *Seamless Tubes of Heat-resistant Steels — Technical Conditions of Delivery.*
- [3.3] SRPS C.A1.011:2020: *Metode hemijskih analiza - Kvantitativna hemijska analiza sirovog gvožđa, livenog gvožđa, niskolegiranih čelika, visokolegiranih čelika, legura aluminijuma i legura bakra metodom optičko-emisione spektrometrije u kojoj se za pobuđivanje koristi visokonaponska kondenzovana varnica.*
- [3.4] SRPS EN 10028-2:2017: *Pljosnati proizvodi od čelika za opremu pod pritiskom -Deo 2: Nelegirani i legirani čelici sa osobinama utvrđenim za povišene temperature.*
- [3.5] SRPS EN ISO 6506-1:2014: *Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Brinelu – Deo 1: Metoda ispitivanja.*
- [3.6] SRPS EN ISO 6892-1:2017: *Metalni materijali — Ispitivanje zatezanjem — Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi.*
- [3.7] SRPS EN ISO 6892-2:2018: *Metalni materijali — Ispitivanje zatezanjem — Deo 2: Metoda ispitivanja na povišenoj temperaturi.*
- [3.8] DILLINGER HÜTTE GTS, Heavy Steel Plate From Stock, www.dillinger.de
- [3.9] WL. Server, Instrumented Charpy test review and application to tructural integrity. In: Francois D, Pineau A, editors. From Charpy to Present Impact Testing. Elsevier Science Ltd. and ESIS; 205-212 (2002).
- [3.10] SRPS EN ISO 148-1:201: *Metalni materijali – Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom – Deo 1: Metoda ispitivanja.*
- [3.11] G. Charpy, "Note sur l'essai des metaux a la flexion par choc de barreaux entaillés", Association internationale pour l'essai des materiaux - Budapest, 1901.
- [3.12] SRPS EN ISO 14556:2020: *Metalni materijali – Ispitivanje epruveta sa V-zarezom udarom Šarpijevim klatnom – Instrumentalna metoda ispitivanja.*
- [3.13] SRPS EN ISO 148-1:2017 *Metalni materijali – Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom – Deo 1: Metoda ispitivanja*
- [3.14] J. C. Radon, C. E. Turner, "Fracture Toughness Measurements by Instrumented Impact Test", Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, No. 3, p. 411-428, 1969.
- [3.15] BS 7448-1: 1991: *Fracture Mechanics Toughness Tests – Method for Determination of K_{IC} , critical CTOD and Critical J values of Metallic Materials.*
- [3.16] ASTM E1820-18: *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.*
- [3.17] T.L. Anderson, Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications, Third edition, Taylor & Francis Group, 2017.
- [3.18] ESIS Procedure for Determing the Fracture Behaviour of Materials ESIS P2-92.
- [3.19] ASTM E647-15e1: *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.*

Poglavlje 5

- [5.1] SRPS EN 10216-2:2014 : *Bešavne čelične cevi za opremu pod pritiskom — Tehnički zahtevi za isporuku — Deo 2: Cevi od nelegiranog i legiranog čelika sa osobinama utvrđenim za povišenu temperaturu*
- [5.2] „Residual Life Assessment ans Microstructure“, ECCC recommendations-Vol.6, ECCC WG1.1, 2005.
- [5.3] S.Concari, G.Mercling:“Evaluation of Microstructure Evolution and Recommendations for Residual Life Assessment“, Proceedings of ECCC Creep Conference: Creep and Fracture in High-temperature Components, 12-14 September, London, 2005..
- [5.4] *ASM Handbook*, Volume 12, *Fractography*, ASM Metals Park, Ohio, 1998.
- [5.5] *ASM Handbook*, Failure Analyses and Prevention, Vol. 11, ASM Metals Park, Ohio, 1986.

[5.6] R. H. Van Stone, T. B. Cox, J. R. Low, Jr, J. A. Psioda, Microstructural aspects of fracture by dimpled rupture, *International Metals Reviews*, Vol.30, No. 4 (1985) 157-179.

BIOGRAFSKI PODACI O AUTORU

Bojana Zečević rođena Aleksić, je rođena 4. januara 1989. godine u Tuzli. U Beogradu je završila osnovnu školu i Četvrtu beogradsku gimnaziju. Osnovne akademske studije kao i master studije završila je na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na katedri za Hemijsko inženjerstvo. Školske 2015/2016 godine je upisla doktorske studije na Tehnološko metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program Hemijsko inženjerstvo, pod mentorstvom profesorke Ljubice Milović.

U svom naučno istraživačkom radu bavi se temama iz oblasti mehanike loma, sigurnosti i integriteta konstrukcija, proračuna komponenata procesne opreme i trodimenzionalnim računskim programima za računsko projektovanje i crtanje (ABAQUS, ANSYS, CATIA, SOLID WORKS. AUTO CAD).

Od jula 2016. do decembra 2019.godine bila je angažovana na projektu TR 35011 „Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature.“

Zaposlena je kao istraživač saradnik u Inovacionom centru Tehnološko metalurškog fakulteta u Beogradu.

Član je Društva za integritet i vek konstrukcija (DIVK).

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Bojana V. Zečević

Broj indeksa 4009/2015

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom:

„UTICAJ RADNE TEMPERATURE NA OTPORNOST NA NASTANAK I RAST PRSLINA
NISKOUGLJENIČNOG MIKROLEGIRANOG ČELIKA ZA TERMOENERGETSKA
POSTROJENJA“

- nastala kao rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija ni u celini niti u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Bojana V. Zečević

Broj indeksa 4009/2015

Studijski program Hemijsko inženjerstvo

Naslov rada „UTICAJ RADNE TEMPERATURE NA OTPORNOST NA NASTANAK I RAST PRSLINA NISKOUGLJENIČNOG MIKROLEGIRANOG ČELIKA ZA TERMOENERGETSKA POSTROJENJA“

Mentor Prof. dr. Ljubica Milović, redovna profesorka Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala radi pohranjena u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu i u Digitalni repozitorijum Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.**

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci potrebni za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane doktorskog rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

„UTICAJ RADNE TEMPERATURE NA OTPORNOST NA NASTANAK I RAST PRSLINA
NISKOUGLJENIČNOG MIKROLEGIRANOG ČELIKA ZA TERMOENERGETSKA
POSTROJENJA“

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu kao i u Digitalni repozitorijum Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu a dostupnu u otvorenom pristupu, mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodniji od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

ОЦЕНА ИЗВЕШТАЈА О ПРОВЕРИ ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације **„Утицај радне температуре на отпорност на настанак и раст прслина нискоугљеничног микролегираног челика за термоенергетска постројења“**, аутора **Бојане Зечевић**, констатујем да утврђено подударање текста износи 28%. Овај степен подударности последица је цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података као и претходно публикованих резултата докторандкињиних истраживања проистеклих из њене дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те да се прописани поступак припреме за њену јавну одбрану може наставити.

У Београду, 15. јануара 2022. године

Ментор проф. др Љубица Миловић
