

---

**UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET**

**Branislav R. Đorđević**

**ŽILAVOST FERITNOG REAKTORSKOG  
ČELIKA U PODRUČJU PRELAZNE  
TEMPERATURE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Beograd, 2021.**

---

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Branislav R. Đorđević**

**TOUGHNESS OF FERRITIC REACTOR  
STEEL IN TRANSITION-TEMPERATURE  
REGION**

**DOCTORAL DISSERTATION**

**Belgrade, 2021.**

**Mentor:**

Dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor (u penziji)  
Mašinski fakultet, Beograd

**Članovi komisije:**

Dr Zoran Radaković, redovni profesor  
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Olivera Popović, redovni profesor  
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Zijah Burzić, naučni savetnik  
Vojnotehnički institut, Beograd

Dr Sreten Mastilović, viši naučni saradnik  
Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd

**Datum odbrane:**

## **PREDGOVOR**

Ova doktorska disertacija je nastala nakon višegodišnjeg istraživanja na projektima tehnološkog razvoja financiranim od strane Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat TR35011 i ugovor 451-03-68/2020-14/ 200213).

Ovim putem želim najpre da se zahvalim mentoru prof. dr Aleksandru Sedmaku, na neizmornoj pomoći i savetima tokom same izrade disertacije, kao i tokom celokupnog trajanja doktorskih studija.

Ogromnu zahvalnost ovim putem želim da izrazim dr Blagoju Petrovskom na savetima i nemejljivom doprinosu oko tumačenja eksperimentalnih rezultata, ekspertskim savetima i sugestijama tokom izrade ove doktorske disertacije.

Posebnu zahvalnost ovim putem želim da izrazim dr Sretenu Mastiloviću oko pomoći pri dodatnoj analizi i obradi, odnosno skaliranju eksperimentalnih rezultata iz sedmog poglavlja, uz čiju pomoć je analizirana tema ove doktorske disertacije podignuta na jedan viši nivo.

Kolegi Aleksandru Dimiću se zahvaljujem na pomoći oko statističke obrade podataka.

Kolegi dr Simonu Sedmaku i kolegi Mihajlu Arandeloviću se zahvaljujem na pomoći oko tehničkog uređivanja ove doktorske disertacije, kao i stručnim savetima prilikom izrade same disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem i svojoj porodici na neizmornoj podršci svih ovih godina.

Mojoj dragoj Neveni neizmerno sam zahvalan na nesebičnoj podršci i ljubavi svih ovih godina.

# ŽILAVOST FERITNOG REAKTORSKOG ČELIKA U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE

## REZIME

Tema ove doktorske disertacije je feritni reaktorski čelik 20MnMoNi 55, konkretno njegova žilavost u području prelaznog temperaturnog režima najviše zbog njegove primene u ekstremnim uslovima, odnosno niskim temperaturama. Ispitivanja su urađena na C(T) uzorcima različitih dimenzija i temperaturama  $-60$  i  $-90^{\circ}\text{C}$ , sa ciljem dobijanja krivih verovatnoća loma cepanjem ispitivanih manjih C(T) epruveta i predikcije ponašanja većih uzoraka na ispitnim temperaturama statističkim metodama (konkretno, Vejbulovom raspodelom) obrade dobijenih rezultata. Kumulativnim raspodelama verovatnoće loma cepanjem i predikcijama ponašanja većih uzoraka u funkciji parametra mehanike loma  $J_c$  direktno je prikazan uticaj veličine uzoraka na integritet konstrukcije izrađene od ovog materijala i njegovu sposobnost ili težnju ka žilavom ili krutom lomu usled prisustva prsline.

Pored šire slike ponašanja feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55 na ispitnim temperaturama  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$  preko parametara  $J_c$  i drugih analiziranih relevantnih parametara, ovom disertacijom pružen je dodatni uvid uticaja dinamičkog opterećenja pripremljenih uzoraka na dobijene rezultate preko plastične zone oko vrha prsline i analizom rasipanja dobijenih rezultata.

Dobijene su i analizirane određene zakonitosti uočenih pojava, poput potencijalne temperaturne zavisnosti Vejbulovih parametara kumulativne raspodele za C(T)50 uzorke na dvema ispitnim temperaturama. Skaliranjem određenih eksperimentalnih rezultata ispitivanja dobijena je empirijska zakonitost u cilju analize uticaja veličine geometrijski sličnih C(T) uzoraka na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$ . Cilj skaliranja je sveobuhvatno predviđanje ponašanja uzoraka većih dimenzija na osnovu ispitivanja manjih.

## KLJUČNE REČI

Feritni čelik 20MnMoNi 55, područje prelazne temperature, parametar mehanike loma  $J_c$ , verovatnoća loma, skaliranje.

**Naučna oblast:** Tehničke nauke – Mašinsko inženjerstvo.

**Uža naučna oblast:** Nauka o materijalima.

**UDK:** 620.172.24 : 669.15(043.3)

# TOUGHNESS OF FERRITIC REACTOR STEEL IN TRANSITION-TEMPERATURE REGION

## ABSTRACT

The topic of this doctoral thesis is ferritic reactor steel 20MnMoNi 55, i.e. its toughness in transition-temperature region, typically used in application for structures working at low temperature. Tests were performed on the C(T) specimens with different geometry and on -60 and -90°C in order to get cleavage fracture probabilities curves of small specimens and to predict behavior of the larger ones at specific temperatures. Method used for probability prediction is Weibull statistic method of results processing. The cumulative distributions of cleavage fracture probability, as well as obtained behaviour predictions of the larger specimens in the function of fracture mechanics parameters  $J_c$ , show the influence of specimen size effect on the integrity of real structure made of this steel, and its ability and tendency towards ductile or brittle fracture in the presence of the crack.

In addition, experimental testing in this thesis provided a broad picture of ferritic reactor steel 20MnMoNi 55 behavior at temperatures -60°C and -90°C by analyzing  $J_c$  and other relevant parameters. This dissertation provides additional insight into the influence of dynamic loading via specimens pre-cracking and plastic strain around the specimen crack tip by analyzing the obtained scattered results and parameters.

Certain relations of observed phenomena were analyzed and discussed, such as the potential temperature dependence of the Weibull parameters of the cumulative distribution for C(T)50 specimens at two temperatures. By scaling of certain experimental results with the aim of determining of size effect of geometrical similar C(T) specimens, the empirical relation for temperature of -60°C was obtained. The goal of scaling is to comprehensively predict the behavior of larger specimens based on the examination of smaller ones.

## KEYWORDS

Ferritic reactor steel 20MnMoNi 55, transition-temperature region, fracture mechanic parameter  $J_c$ , fracture probability, scaling.

**Scientific Field:** Technical Sciences – Mechanical Engineering.

**Subfield:** Materials science.

**UDC:** 620.172.24 : 669.15(043.3)

# SADRŽAJ

---

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1	Uvodna razmatranja.....	1
1.2	Ideja doktorske disertacije – metode i plan ispitivanja.....	4
1.3	Opis poglavlja disertacije .....	6
<b>2</b>	<b>ISTORIJA PROBLEMA – LOMOVI U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE.....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>KRTI LOM.....</b>	<b>11</b>
3.1	Definicija krtog loma.....	11
3.2	Faktori koji uslovljavaju prelaz iz plastičnog u krt lom feritnih materijala .....	12
3.2.1	Uticao oblika i mera konstrukcijskog dela.....	12
3.2.2	Uticao brzine opterećenja i deformacije .....	12
3.2.3	Uticao temperature .....	13
3.3	Problem krtog loma sa aspekta mehanike loma .....	15
3.3.1	Grifitovo rešenje sa aspekta mehanike loma.....	15
3.3.2	Kvazi-krti lom .....	16
<b>4</b>	<b>MEHANIKA LOMA – OSNOVE I STANDARDNA ISPITIVANJA .....</b>	<b>17</b>
4.1	Uvod .....	17
4.2	Osnovni oblici obrazovanja površine preloma .....	18
4.3	Ravno stanje deformacija .....	20
4.4	Naponsko stanje oko vrha prsline.....	21
4.5	Parameter $K$ - Faktor intenziteta napona .....	21
4.6	Parametar CTOD - Otvaranje vrha prsline .....	22
4.7	$J$ -integral .....	24
4.8	$J$ -integral primenjen u analizi početka rasta prsline .....	25
4.9	Veza $J$ -integrala i CTOD .....	26
4.10	Određivanje parametara mehanike loma po ASTM standardu kao mera žilavosti loma ....	27
4.10.1	Izbor odgovarajućeg parametra mehanike loma i obrada rezultata ispitivanja .....	28
4.10.2	Priprema C(T) uzoraka .....	29
4.10.3	Određivanje parametra $K_{Ic}$ .....	31
4.10.4	Određivanje parametra $J_c$ .....	33
4.10.5	Određivanje parametra CMOD .....	35
4.10.6	Merenje inicijalne (početne) dužine zamorne prsline nakon loma kod C(T) epruveta. ....	36
4.10.7	Napon loma C(T) epruveta.....	37
<b>5</b>	<b>OSNOVNI POJMOVI STATISTIKE I TEORIJE VEROVATNOĆE .....</b>	<b>40</b>
5.1	Statistička analiza .....	40
5.2	Osnovni statistički pojmovi .....	41
5.2.1	Statistički skup .....	41
5.2.2	Jedinice i obeležja posmatranja.....	41
5.3	Statistički pokazatelji.....	42
5.4	Definicija verovatnoće.....	42
5.4.1	Klasična definicija verovatnoće – Laplas 1812.....	42
5.4.2	Statička definicija verovatnoće (von Mises 1931).....	42
5.4.3	Aksiomska definicija (Kolmogorov 1933).....	43
5.5	Matematički modeli zakona raspodele .....	43
5.5.1	Raspodele prekidnog karaktera .....	43
5.5.2	Raspodela neprekidnog karaktera .....	44

5.5.3	Vejbulova raspodela .....	44
5.6	Metode određivanja raspodele za određeni skup podataka .....	45
5.6.1	Papir verovatnoće za Vejbulovu raspodelu .....	46
5.6.2	Veličine ranga i njihove raspodele .....	47
5.6.3	Analitičko određivanje parametara Vejbulove raspodele .....	47
5.6.4	Metoda najmanjih kvadrata ili regresiona analiza.....	48
5.7	Područje poverenja .....	48
5.8	Statistički testovi.....	49
5.8.1	Test Kolmogorov-Smirnov .....	49
<b>6</b>	<b>PREGLED REFERENTNE LITERATURE .....</b>	<b>52</b>
6.1	Opisivanje lomova čelika u prelaznom režimu primenom koncepta LEML.....	53
6.2	Opisivanje lomova čelika u prelaznom režimu primenom koncepta EPML.....	53
6.3	Prikaz Herensove studije .....	54
6.4	Prikaz Landesove studije .....	57
6.5	Statističko tumačenje rezultata u području prelazne temperature .....	60
6.6	Uticaj stepena ometenosti deformacije (gubitka graničnih uslova).....	64
6.7	Uticaj veličine strukture i skaliranje .....	66
<b>7</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEO I VEROVATNOĆE LOMA.....</b>	<b>68</b>
7.1	Čelik 20MnMoNi 55 .....	69
7.2	Priprema C(T) epruveta za eksperimentalna ispitivanja.....	69
7.3	Metoda statističke obrade rezultata .....	70
7.4	Prvi deo studije .....	72
7.4.1	Ispitivanje C(T)50 epruveta na temperaturi -60°C sa dve debljine.....	72
7.4.2	Verovatnoća loma C(T)50 epruveta na -60°C – uticaj debljine.....	74
7.4.3	Verovatnoća loma C(T)100 i C(T)200 epruveta na -60°C.....	75
7.4.4	Ispitivanje C(T)100 i C(T)200 epruveta na temperaturi -60°C.....	75
7.4.5	Ostali rezultati prvog dela studije – ispitivanja C(T)50 epruveta manje debljine.....	76
7.4.5.1	Dijagrami sila-CMOD uzoraka manje debljine .....	76
7.4.5.2	Ostali parametri ispitivanja C(T)50 manje debljine .....	82
7.5	Drugi deo studije .....	83
7.5.1	Ispitivanje C(T)50 epruveta na temperaturi -90°C.....	83
7.5.2	Verovatnoća loma C(T)50, C(T)100 i C(200)200 epruveta na -90°C i ispitivanje C(T)200 epruvete – uticaj veličine uzoraka .....	83
<b>8</b>	<b>ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA .....</b>	<b>85</b>
8.1	Analiza krivih verovatnoća loma cepanjem .....	85
8.2	Diskusija uticaja brzine deformisanja na dobijene rezultate .....	87
8.3	Diskusija uticaja unosa zamorne prsline na dobijene rezultate .....	88
8.4	Uticaj temperature na parametre $r_c$ i $z_c$ .....	89
8.5	Skaliranje eksperimentalnih rezultata (uticaj veličine C(T) uzoraka).....	90
8.5.1	Predloženi postupak skaliranja rezultata ispitivanja C(T) epruveta.....	90
8.5.2	Skaliranje rezultata ispitivanja na -60°C čelika 20MnMoNi 55 .....	95
<b>9</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>98</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>100</b>



## Spisak relevantnih skraćenica i oznaka u doktorskoj disertaciji

$A$	normalizovano rastojanje ispred vrha prsline (iz glave 7)
$A_0$	površ ravne prsline
$a$	zbir mašinski unete prsline i zamorne prsline na epruveti
$a_0$	inicijalna dužina zamorne prsline na epruveti
$\Delta a$	prirast dužine prsline
$B$	debljina epruvete
$B_{net}$	neto debljina C(T) epruvete (bez bočnih zareza)
$b_0$	inicijalna dužina ligamenta epruvete
$\beta$	parametar razmere Vejbulove kumulativne raspodele
$\beta_c$	korektivni faktor (iz glave 6)
$\beta_{Ic}$	korektivni faktor (iz glave 6)
C(T)	kompaktna epruveta za zatezanje
CMOD	otvaranje usta vrha prsline
CTOD	otvaranje vrha prsline
$E$	Jangov modul elastičnosti
EPML	elasto-plastična mehanika loma
$F(K)$	funkcija raspodele verovatnoće loma uzoraka ili kumulativna Vejbulova raspodela (iz glave 5)
$\gamma$	parametar položaja Vejbulove kumulativne raspodele
$i$	redni broj ispitivanog uzorka
$J$ -integral	Rajsov konturni integral oko vrha prsline
$J_c$	vrednost $J$ -integrala usled nestabilnog rasta prsline kojoj prethodi neznatan stabilan rast iste
$J_{ssy}$	vrednost $J$ -integrala u uslovima srazmerno malog tečenja
$J_{II}$	prevojna tačka
$K$	faktor intenziteta napona
$K$	promenljiva ili slučajna veličina veličina (iz glave 5)
$K_c$	kritična vrednost faktora intenziteta napona
$K_{Ic}$	kritična vrednost faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacija
$K_{min}$	minimalna (donja granična) vrednost faktora intenziteta napona (iz glave 6)
$\Delta K$	opseg $K$ -faktora (opseg faktora intenziteta napona)
$\kappa$	parametar optimizacije skaliranja (iz glave 8)
LEML	linearno-elastična mehanika loma
$n$	ukupan broj ispitivanih uzoraka
$n$	koeficijent ojačanja (iz glave 4 i 6)
$P(J_c)$	verovatnoća loma cepanjem pri nekoj vrednosti $J_c$ C(T) epruvete
$R_{p0,2}$	konvencionalni napon tečenja (iz glave 4)
RSD	ravno stanje deformacija
RSN	ravno stanje napona
$r_c$	rastojanje od vrha inicijalne zamorne prsline do mesta inicijacije loma
$S$	nagib Vejbulove kumulativne raspodele (iz glave 8)
$S_*$	zajednički nagib kumulativnih raspodela (iz glave 8)
SE(B)	epruveta sa bočnim zarezom namenjena za savijanje u tri tačke (Šarpi epruveta)
$\sigma_{0,2}$	konvencionalni napon tečenja (iz glave 6)
$\sigma_f$	napon loma
$\sigma_F$	napon ojačanja (iz glave 4)

$\sigma_u$	zatezna čvrstoća (iz glave 6)
$\sigma_Y$	napon tečenja (iz glave 7)
$\sigma_v$	zatezna čvrstoća (iz glave 7)
$T$	temperatura
$\theta$	parametar oblika Weibulove kumulativne raspodele
$\theta_*$	nezavisni parametar Weibulove raspodele (iz glave 8)
$v$	brzina zadavanja opterećenja – brzina deformacije
$W$	efektivna širina ispitivane epruvete
$z_c$	rastojanje parametra $r_c$ (mesta inicijacije loma) od srednje ose debljine ispitivanog uzoraka (iz glave 6, 7)
$\zeta$	parametar optimizacije skaliranja (iz glave 8)
$\Xi(\beta)$	funkcija oblika (iz glave 8)

# 1 UVOD

---

## 1.1 UVODNA RAZMATRANJA

Pri projektovanju konstrukcija i radnih mašina posebna pažnja usmerena je ka bezbednosti istih, kao i da posledice otkaza ne budu katastrofalne. Generalno sve konstrukcije, mašine itd. moraju biti projektovane i izrađene u skladu sa tim da garantuju sigurnost u radu, odnosno eksploataciji. Razvijeni i implementirani standardi, većina njih kao obavezni, kao i pravilnici za projektovanje, konstruisanje, izbor materijala za izradu konstrukcije (koji predstavlja vrlo važan korak pri projektovanju, kao i poznavanje istih), preporuke u samoj eksploataciji, poznavanje radnih uslova, odnosno radne temperature, radnih opterećenja itd., donekle mogu pružiti osnovnu traženu sigurnost konstrukcije u radu prilikom projektovanja. Međutim, i pored svih preduzetih mera preporuka, proračuna i primena odgovarajućih standarda ipak može doći do neželjenog otkaza ili loma u eksploataciji. Problem upotrebe konstrukcija u uslovima niskih temperatura (diktiran spoljašnjim uslovima) je veoma složen i iskazuje se kroz sve faze radnog veka, počev od projektnog zadatka, preko projektovanja i konstruisanja, izrade i ispitivanja, pravilne eksploatacije i održavanja, sve do isteka projektnog veka sa ciljem da se izbegnu gore navedeni nepredviđeni otkazi.

Nadogradnjom prethodno rečenog, iz prakse je poznato da poznavanje osnovnih mehaničkih karakteristika materijala, poput zatezne čvrstoće, napona tečenja, procentualnog izduženja, kontrakcije, tvrdoće, udarne žilavosti itd., nisu često dovoljne informacije da se u različitim radnim uslovima konstrukcije predvidi hoće li (preciznije, može li) doći do loma, a i ako do loma dođe, da li će to biti plastični ili krto lom. Isti feritni čelik, primenjen u različitim konstrukcijskim oblicima i delovima može pri nekim radnim uslovima pokazati žilavo ponašanje, dok u drugim radnim uslovima pokazuje krto. U kojoj meri treba da se promene uslovi da bi se prešlo od žilavog do krto loma materijala zavisi najpre od svojstva samog materijala, odnosno od njegove osetljivosti na promenu veličina koje određuju radne uslove. Ako se posmatra jedan feritni materijal, onda uslovi prelaza od žilavog do krto loma zavise od oblika i mera konstrukcijskog dela, brzine dejstva opterećenja i brzine deformacije i od radne temperature.

Imajući u vidu karakteristike feritnih materijala, poznato je da karakterizacija žilavosti loma ovih materijala u području prelazne temperature predstavlja vrlo težak zadatak, najpre što je potrebno rezultate ispitivanja u laboratorijskim uslovima preneti na realne konstrukcije i predvideti ponašanje tih materijala na realnim konstrukcijama u realnim radnim uslovima. Lomovi realnih konstrukcija mogu biti izazvani iznenadnim događajima i obično su povezani sa mikromehanizmom loma cepanjem, kao najopasnijeg tipa loma. Ukoliko se ovakvi lomovi opisuju nekim od parametara mehanike loma, poput  $J$ -integrala ili faktora intenziteta napona  $K$ , poznato je da povećanjem temperature i ovi parametri imaju veće vrednosti. Međutim, sa ovim je i rasipanje ovih parametara veće (čak i naglo) i zavisi od veličine, debljine i geometrije dela. Rezultati žilavosti loma u određenim laboratorijskim uslovima toliko mogu varirati da ih je prosto nemoguće predvideti sa tačnom sigurnošću. Često se ovakvi podaci, sa ovakvom prirodom, predstavljaju i objašnjavaju uz pomoć statistike u formi statističke verovatnoće. Ovakav pristup ima i svoja ograničenja u pogledu predviđanja i proračuna bezbednosti i pouzdanosti konstrukcije koji je sastavljen od materijala čiji je rad u ovom osetljivom temperaturnom intervalu problematičan. Prilikom projektovanja i konstruisanja struktura ili se bira odgovarajući materijal (koji se u zadatim radnim uslovima ne nalazi u osetljivom temperaturnom području) ili se, ukoliko to nije moguće, radni uslovi (po mogućstvu)

prilagođavaju tako da materijal nije zahvaćen ovim osetljivim temperaturnim područjem. Međutim, ni ovo nekad nije moguće. Tokom rada reaktora, ili brodova, mogu se dostići visoke radne temperature, visok nivo radnih napona, dok okolna temperatura može biti vrlo niska. Sve ovo zahteva bolje razumevanje ili odgovarajuću karakterizaciju prirodu prelazne temperature i žilavosti loma za određeni materijal.

Konstrukcije izrađene od feritnih čelika imaju primenu i u režimu prelazne temperatura kada je moguć krt lom konstrukcije, odnos prelaz iz žilavog u krt lom. U tom području može doći do nestabilnog rasta prsline. Zbog toga je neophodno, sa aspekta pouzdanosti i integriteta konstrukcije izrađenih od feritnih materijala, odrediti žilavost loma u ovom osetljivom području. Jedan od osnovnih zahteva pri projektovanju i dimenzionisanju bilo koje inženjerske konstrukcije je da u periodu predviđenog vremena eksploatacije ne dođe do nekog vida oštećenja usled koga će ta konstrukcija izgubiti funkcionalnost. Znači, do gubitka konstrukcijske celine može doći na različite načine. Međutim, najsloženiji i najopasniji način je onaj koji je u načelu opisan i pomenut ranije kao krti lom. Žilavost loma čelika u prelaznom temperaturnom režimu i karakterizacija istih je dugi niz godina opisivana i objašnjavana primenom naučne discipline mehanike loma uz primenu drugih disciplina, poput numeričkih metoda, statistike (discipline koja se bavi razvojem metoda prikupljanja, opisivanja i analiziranja podataka) sa ciljem donošenja adekvatnih zaključaka.

Posebna pažnja godinama posvećuje se proučavanju ponašanja feritnih čelika namenjenih za rad na niskim temperaturama, kao što je slučaj u ovoj disertaciji. Rasipanje podataka koji se tiču žilavosti loma u prelaznom temperaturnom režimu, opisivanje, kao i tumačenje i karakterizacija tih podataka, predstavlja glavni izazov u definisanju domena primene ispitivanog feritnog čelika, jer pojedinačne vrednosti nekog parametra mehanike loma (npr.  $K$  ili  $J$ -integrala) dobijene ispitivanjem jednog ili vrlo malog broja uzoraka nisu pouzdane ni merodavne u karakterizaciji tog materijala. Prethodno pomenuto rasipanje vrednosti nekog parametara pri istim uslovima ispitivanja (temperatura, brzina deformisanja itd.) traži dodatno tumačenje i zahteva uključivanje i drugih naučnih disciplina osim mehanike loma.

Kao i u ovoj studiji i u studijama ranije, istraživači su „ograničeni“ određenom količinom informacija, odnosno rezultata ispitivanja na osnovu kojih se mogu donositi zaključci ili usvojiti određeni modeli. Primenom statističkih modela zajedno sa mehanikom loma u raznim studijama sa ovom temom pružili su donekle bolji uvid u sliku šta se dešava u feritnim materijalima u prelaznom režimu temperatura. Neki predloženi i razmatrani modeli su zasnovani na ideji prisustva slabog mesta u frontu prsline mašinskog dela ili ispitivane epruvete zbog kojeg može doći do loma. O ovoj temi će biti nešto više reči u sledećim poglavljima ove disertacije. Međutim, i dalje postoje brojna pitanja na temu kako objasniti prirodu loma u pojedinim slučajevima, kao i verovatnoću loma u konstrukciji ili još važnije, predikciju kada će doći do loma u ovom osetljivom temperaturnom području, odnosno kraju radnog veka konstrukcije.

Lom predstavlja završnu fazu razvoja deformacije, a uzroci nastanka i delimičnog razvoja prsline u konstrukcijama mogu biti različiti. Ovi uzorci mogu biti prisutni u svim fazama tehnološke prerade materijala, izrade samog dela ili eksploataciji. Tokom eksploatacije konstrukcije ili radne mašine prsline u materijalima mogu biti izazvane različitim uslovima koji mogu dovesti do krtog loma, ili izazvane zamornim opterećenjem, odnosno dejstvom nekog promenljivog opterećenja usled dužeg vremenskog perioda na visokim temperaturama itd. Veliki broj različitih uticaja i pojava vezanih za razvoj loma uticali su na različite klasifikacije lomova koji dovode do otkaza neke konstrukcije ili opreme u mašinskim konstrukcijama, poput dizalica, opreme pod pritiskom, reaktorima, zavarenim spojevima tih konstrukcija itd. Osnovna podela je na krt i žilav lom, koji se u literaturi može naći i pod nazivom plastični lom. Ovi lomovi obuhvataju i uticaj deformacija koje prethode lomu. U ovoj podeli mogu se razlikovati dva granična slučaja, tačnije, slučaj u kome lom nastaje kada je deformacija potpuno elastična i tada je lom potpuno krt. Krtom lomu odgovara prelomna površina koja nastaje cepanjem i u uslovima ravnog stanja deformacija (skraćeno RSD). Drugi (ekstremni) slučaj predstavlja lom nastao posle potpune plastične deformacije, gde se javlja suženje poprečnog preseka do potpunog razdvajanja dela, dok prelomna površina ne postoji. Treba reći da oba granična uslova u praksi ne postoje i lomovima u praksi prethode i elastična i plastična

deformacija, u većoj ili manjoj meri. Ovakvi mešoviti lomovi karakterišu se žilavošću, tačnije sposobnošću materijala ili mašinskog dela da se suprostave razvoju krtog loma.

U opisivanju da li je lom krt ili žilav koriste se epruvete sa prslinom koje se ispituju u laboratorijskim uslovima. Poznato je da se koriste principi mehanika loma, u kojoj su definisani pojmovi, poput RSD i žilavosti loma, bez kojih nije moguće izvršiti adekvatne studije u ovom polju. Mehanika loma je teorijska disciplina u kojoj se matematičkom analizom kompleksne promenljive u mehanici kontinuuma izvode osnovni izrazi za kontinuum sa greškom, odnosno prslinom. Time je omogućeno da se definiše najpoznatiji parametar mehanike loma, a to je faktor intenziteta napona (prethodno pomenut parametar  $K$ ), a ovime unos dužine prsline u poznate izraze koje definišu napon i deformacije u teoriji elastičnosti. Na taj način se sem homogenog kontinualnog tela razmatraju i diskontinuiteti i njegov uticaj na odgovor opterećene realne konstrukcije. Upravo taj pristup je obezbedio praktičnu primenu mehanike loma i mesto za njene principe u oceni integriteta konstrukcija. Kako se razmatranja mehanike loma odnose na homogeni kontinuum, a realni objekti su oblikovane konstrukcije od materijala nehomogene mikrostrukture, to je bilo potrebno uvoditi dalja uprošćenja za prelaz sa teorijskog na praktični pristup u analizi prsline pod opterećenjem. Ovo sve je konačno pružilo potporu da se uvedu standardna ispitivanja mehanike loma, tačnije ispitivanje standardizovanih epruveta sa prslinom i da se dobijeni rezultati praktično koriste. Ovakvim pristupom omogućeno je uvođenje  $J$ -integrala, integrala nezavisnog od putanje integracije oko vrha prsline o kome će biti reči nešto kasnije u ovoj disertaciji i koji je i u ovom istraživanju korišćen kao pogodan parametar. ASTM standardi po čijim kriterijumima su urađena ispitivanja i u ovoj studiji pružaju korake i metode za određivanje i tumačenje parametara mehanike loma. Takođe, ovi standardi pružaju informacije o potrebnoj opremi za sprovođenje samih ispitivanja, u ovom konkretnom slučaju, ispitivanja na lom. Svi ASTM standardi za ispitivanja na lom imaju skoro identične definisane stavke koji se tiču:

- Pripreme uzoraka (koji uključuje način izrade, površinsku obradu, kao i unošenje zamorne prsline)
- Eksperimentalne postavke i potrebna instrumentacija
- Procedure ispitivanja i testiranja
- Procene dobijenih rezultata ispitivanja
- Provere validnosti dobijenih rezultata
- Forme finalnog izveštaja dobijenih rezultata

Glavni cilj ispitivanja u laboratorijskim uslovima je nalaženje povezanosti dobijenih rezultata sa konkretnom konstrukcijom, tačnije strukture izložene realnim uslovima opterećenja, a time i domen primene određenog materijala u zadatim uslovima eksploatacije. Uslovi eksploatacije mogu biti diktirani temperaturom, opterećenjem, prirodom opterećenja, agresivnošću sredine itd. Laboratorijskim uslovima je moguće donekle simulirati te radne uslove kojima konstrukcija ili oprema može biti izložena tokom radnog veka. Gore pomenuti laboratorijski uslovi kojima se simuliraju radni uslovi mogu dovesti do krtog ili žilavog loma materijala i izvršiti na taj način odgovarajuću karakterizaciju dobijenih rezultata.

Žilav lom materijala je mehanizam loma koji je praćen najpre prisustvom inicijalne prsline i postepenim rastom prsline spajanjem (preciznije sjedinjavanjem) mikroprsline i praznina u samom materijalu. Žilav lom kao pojava više ima prirodu „procesa“ nego „trenutnog događaja“, kao što je to slučaj sa krtim lomom. Za razvoj plastične deformacije i nastanak žilavog loma potrebno je vreme. Prethodno rečeno podrazumeva termin „proces“, najpre stoga što je praćen stabilnim rastom prsline, a čitav taj proces može biti završen u stabilnim uslovima, za razliku od krtog koji je praćen nestabilnim. Nestabilni krti lom se razvija veoma brzo i može se reći da ima prirodu „trenutnog događaja“, pod određenim uslovima čak i trenutno. Žilav lom se, zbog svoje prirode procesa koji se odvija u određenom vremenskom intervalu, opisuje krivama (a ne tačkama, kao što je slučaj sa krtim lomom). Kod oba tipa lomova uočena je zakonitost opšteg karaktera, npr. prelaz od stabilnog u kritično stanje. Primenom mehanike loma potrebno je odgovarajućim parametrom mehanike loma okarakterisati prirodu žilavog i krtog loma materijala.

Uticaji koji definišu karakterizaciju loma, a time i izbor odgovarajućeg i merodavnog parametra mehanike loma, mogu se podeliti u sledeće stavke:

- 1) Ponašanje materijala tokom deformacije:
  - Linearno-elastično ili elasto-plastično ponašanje, koji utiče na
  - Izbor odgovarajućeg parametra loma
- 2) Ponašanje materijala tokom loma:
  - Krto ili žilavo, koji ima uticaja na
  - Određivanje tipa loma
- 3) Uticaj graničnih uslova (eng. *constraint effect*) tokom deformacije:
  - Ravno stanje napona (skraćeno RSN) ili ravno stanje deformacija (podsećanja radi, skraćeno RSD), koji određuje
  - Vrednosti žilavosti loma

U tabeli 1.1 je grafički prikazana matrica koja opisuje prethodne uticaje na izbor merodavnog parametra mehanike u opisivanju prirode loma. Kao što je od ranije poznato, u oblasti elasto-plastičnog ponašanja materijala merodavan parametar je faktor intenziteta napona  $K$ , dok su u oblasti elasto-plastičnog ponašanja merodovni  $J$ -integral i parametar otvaranja vrha prslina CTOD, kao i  $J$ - $R$  kriva. Problem izbora merodavnog parametra se dodatno usložnjava u području prelazne temperature, naročito kod feritnih materijala, upravo zbog gore pomenutog rasipanja vrednosti dobijenih rezultata. Uz to kada se doda priroda loma u prelaznom režimu, može se javiti i krt, ali i žilav lom, pa je potrebno voditi računa o izabranom parametru za karakterizaciju loma. Brojne studije su urađene na ovu temu, neke od njih će biti prikazane i objašnjene u budućim poglavljima ove disertacije.

Tabela 1.1 Matrica ponašanja materijala tokom deformacije/loma i izbor merodavnog parametra mehanike loma

Ponašanje materijala tokom loma	Ponašanje materijala tokom deformacije	
	<i>krt</i>	<i>žilav</i>
Linearno-elastično	$K_{Ic}$	$K_{Ic}$ , $K$ - $R$ kriva
Elasto-plastično	$J_c$ , $CTOD_c$	$J_{Ic}$ , $J$ - $R$ kriva, $CTOD_m$

Glavni fokus svih ovih studija koji se tiču feritnih čelika, kakav je i čelik koji je predmet ove studije, se ticao njihovih karakteristika i ponašanja u prelaznom režimu temperatura sa ciljem određivanja i procene integriteta konstrukcija izređenih od ovih čelika i odrediti mogućnosti, ali i ograničenja njihove primene na niskim temperaturama, preciznije u području prelazne temperature. Pored toga, dosta studija se ticalo na temu istraživanja mehanizama koji mogu biti okidač pojedinih lomova takođe sve u službi određivanja domena primene pojedinih feritnih čelika u prelaznom režimu. Iako je urađeno dosta u ovom polju, izvedeni zaključci za pojedine materijale su nepotpuni, ograničavajući ili u određenim slučajevima nedovoljni, što je uslovljeno količinom podataka i potencijalnom nemogućnošću adekvatnog tumačenja istih upravo zbog ovih ograničenja.

## 1.2 IDEJA DOKTORSKE DISERTACIJE – METODE I PLAN ISPITIVANJA

Pre samog teksta i sadržaja disertacije, potrebno je istaći studije dva istraživača u ovoj oblasti koji su predstavljali ključnu inspiraciju za izradu ove doktorske disertacije. To su studije Herensa i Landesa (kao prvih autora u svojim studijama) o kojima će biti više reči u daljem tekstu. Pojedini parametri korišćeni u eksperimentalom delu su uvedeni od strane Herensa u njegovoj studiji na temu ponašanja loma upravo čelika koji je predmet ove studije u prelaznom temperaturnom režimu. Druga studija koja je imala važan uticaj na formiranje teme i izradu ove disertacije je studija Landesa na temu uticaja veličine epruveta od feritnih čelika u prelaznom režimu u funkciji parametara mehanike loma, parametara  $K$  i  $J$ -integrala. U svojoj studiji predložio je model koji objašnjava prirodu rasipanja

dobijenih rezultata u prelaznom režimu, tačnije području prelazne temperature. Po jednom od kriterijuma, lom cepanjem nastaje na mestima „najslabije karike u lancu“, tačnije na mestima oštećenja u mikrostrukturi materijala ispred vrha prsline. Upravo je ovaj model i korićen u ovoj disertaciji, jer objašnjava fenomen efekta veličine ispitivanih uzoraka i obrade rezultata primenom statističke analize. Ovakav pristup predstavlja lokalni pristup lomu cepanjem i u suštini pretpostavlja da nestabilnost jedne čestice u materijalu, odnosno lokalno prekoračenje čvrstoće, može izazvati potpuni lom.

Ugrubo se može reći da ova doktorska disertacija predstavlja nadogradnju gorepomenutih studija, a u ovoj studiji predstavljeno je predviđanje ponašanja i rezultata žilavosti loma većih epruveta na osnovu ispitivanja manjih na različitim niskim temperaturama feritnog čelika u prelaznom temperaturnom režimu, sa ciljem smanjenja troškova i cene laboratorijskih ispitivanja. Naravno, prethodna rečenica odaje utisak jednostavnosti izrade i sprovođenja ispitivanja u ovoj disertaciji, time i primena jednostavnih metoda, ali to nije tako. Potrebno je stoga najpre objasniti u kratkim crtama šta je urađeno u ovoj studiji.

U ovoj doktorskoj disertaciji pristupilo se prvo ispitivanju lomova C(T)50 epruveta i na osnovu ispitivanja ovih epruveta na različitim temperaturama  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$  stepeni pretpostavljeno je ponašanje tj. lom većih uzoraka, tačnije C(T)100 i C(T)200 na istim temperaturama. Materijal od kojeg su izrađene epruvete je feritni reaktorski čelik komercijalnog naziva 20MnMoNi 55 (oznake 1.6310). Ovo predviđanje ponašanja većih uzoraka je urađeno na osnovu statističkih podataka, tj. Vejbulove raspodele verovatnoće i prikaza eksperimentalno dobijenih podataka u funkciji parametra  $J_c$  dobijenih eksperimentima. U ovoj studiji izabrani merodavni parametar mehanike loma  $J_c$  u funkciji loma cepanjem u području prelazne temperature se može smatrati slučajnom promenljivom veličinom (što je iskorišćeno u statističkoj obradi i tumačenju), jer vrednost ovog parametra dobijena eksperimentalnim ispitivanjima varira i na istim ispitnim temperaturama pri istim uslovima ispitivanja. Za ove „slučajne“ veličine primenjeni su pojmovi i zakoni matematičke teorije verovatnoće.

Statistički dobijene verovatnoće loma tj. krive koje predstavljaju predikciju su direktno „poređene“ sa dobijenim vrednostima  $J_c$  dobijene ispitivanjem loma cepanjem većih C(T) epruveta. Direktno poređeni parametar dobijen ovim ispitivanjima, koji je kasnije i obrađen primenom alata statističke verovatnoće u uslovima loma cepanjem, je merodavni parametar  $J_c$  zbog poteškoća određivanja  $K_{Ic}$  ovog mikrolegiranog čelika prema odgovarajućem standardu ASTM E399. Detaljnije o ovoj temi će biti reči u samom doktoratu. Verovatnoća loma po teoriji „najslabije karike u lancu“ dobijene su Vejbulovom dvo-parametarskom raspodelom. Dobijene distribucije verovatnoće loma ispitivanjem uzoraka na  $-60^{\circ}\text{C}$  poslužile su kao osnova za dalju statističku obradu. Ta obrada je imala za cilj uvođenje eksplicitno i sistematski uticaja veličine (eng. *size effect*) ispitivanih C(T) uzoraka u Vejbulove krive verovatnoće loma. Ideja je bila dobijanje funkcije, odnosno empirijskog izraza verovatnoće loma za sve veličine uzorka, ne samo dimenzije ispitivanih.

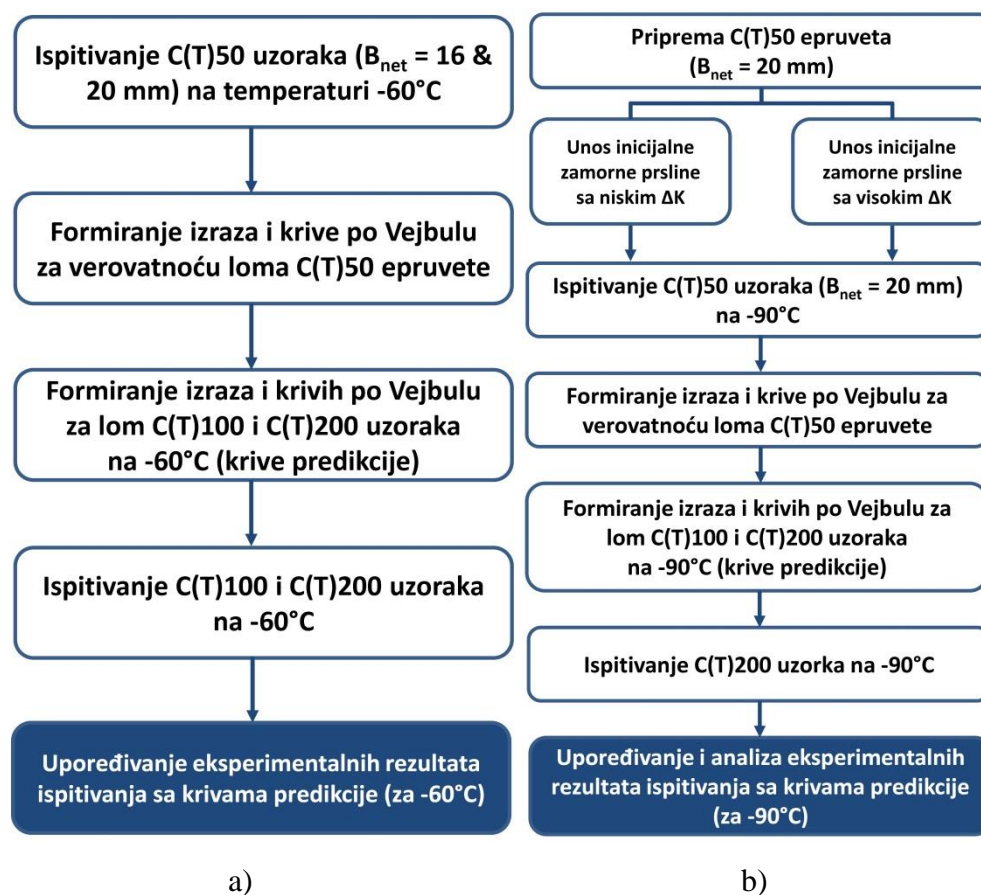
Pored gore pomenutog, analizirani su i ostali uticaji koji doprinose (usporavaju ili ubrzavaju) krtom lomu ovog materijala. Sile tokom ispitivanja su zadate u uslovima kontrolisanog pomeranja (eng. *displacement rate*) i ovaj uticaj kroz različite vrednosti zadate brzine deformacije je analiziran na krt lom cepanjem analizom odgovarajućih parametara  $J_c$ , CMOD,  $r_c$ ,  $z_c$ . Takođe je analiziran i faktor uticaja unošenja zamorne prsline na C(T) epruvetama i njihov uticaj na merodavne parametre, jer je kod određenih epruveta broj ciklusa kao i vrednosti praga  $\Delta K$  prilikom unošenja zamorne prsline bio veći, a kod nekih manji.

Plan ispitivanja i uopšte plan celokupne studije se može predstaviti sledećim algoritmima prikazanim na slici 1.1. Cela studija se može podeliti u dve grupe. Na slici 1.1a prikazan je plan prvog dela ispitivanja, gde je cilj bio predviđanje ponašanja većih uzoraka C(T) epruveta, tačnije, verovatnoću vrednosti parametra  $J_c$  pri lomu cepanjem, a kasnije ih uporediti sa eksperimentalnim rezultatima na temperaturi ispitivanja od  $-60^{\circ}\text{C}$ . U tu svrhu prvo je urađeno ispitivanje C(T)50 uzoraka, a kasnije i većih C(T)100 i C(T)200 u cilju poređenja sa predikcijom dobijene Vejbulovom raspodelom. Na slici 1.1b je prikazan plan drugog dela ove studije u kojoj je cilj bio predvideti ponašanje većih C(T) epruveta na osnovu ispitivanja manjih i porediti ih sa predikcijom, ali na ispitnoj temperaturi od  $-90^{\circ}\text{C}$ . Kao što je rečeno, inicijalne zamorne prsline su na nekim C(T)50

uzorcima namenjenih za ispitivanje na  $-90^{\circ}\text{C}$  epruvetama unete sa visokom vrednošću praga  $\Delta K$  ( $\Delta K = 1230 \text{ Nmm}^{-3/2} = 38,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) i niskim brojem ciklusa, dok su na nekim inicijalne zamorne prsline unete sa niskom vrednošću  $\Delta K$  ( $\Delta K = 492 \text{ Nmm}^{-3/2} = 15,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) i velikim brojem ciklusa zamaranja. Obe studije su izvedene na lom cepanjem prema odgovarajućem ASTM 1820 standardu [1]. Nalaženje veza između dobijenih rezultata ispitivanjem C(T) epruveta na dve različite temperature je takođe zahtevala posebnu pažnju. Detaljnija objašnjenja u vezi same pripreme uzoraka kao i sam tok ispitivanja će biti predstavljen u eksperimentalnom delu ove disertacije.

Treba istaći da je dodatna obrada rezultata prvog dela studije skaliranjem kumulativnih raspodela i izrada procedure skaliranja u cilju dobijanja kumulativnih verovatnoća loma za sve veličine C(T) uzoraka zahtevala posebnu pažnju i predstavljena je posebnim poglavljem u okviru glave koja se tiče analize i diskusije rezultata.

Za pojedine termine i izraze u disertaciji navedena je odgovarajuća anglosaksonska terminologija u zagradi i u kurzivu, što se može videti i u prethodnim poglavljima ove glave.



Slika 1.1 Plan i program istraživanja; a) plan ispitivanja C(T)50 epruveta na  $-60^{\circ}\text{C}$ , predviđanje za C(T)100 i C(T)200 epruvete i upoređivanje sa eksperimentalnim rezultatima ispitivanja C(T)100 i C(T)200 na  $-60^{\circ}\text{C}$ ; b) plan ispitivanja C(T)50 epruveta na  $-90^{\circ}\text{C}$  - zamorne prsline unete sa visokim pragom  $\Delta K$  i niskim  $\Delta K$ ; predviđanje za C(T)100 i C(T)200 epruvete i upoređivanje sa eksperimentalnim rezultatima ispitivanja C(T)100 i C(T)200

### 1.3 OPIS POGLAVLJA DISERTACIJE

Pored uvodnih razmatranja, obrazloženja ideje i inspiracije za izradu ove disertacije i opisa primenjenih naučnih metoda u ovoj studiji koji su predstavljeni u prvoj glavi, ova doktorska disertacija je podeljena u ukupno devet logičkih glava koji se nadovezuju i dopunjuju jedna drugu.

U drugoj glavi opisana je kratka istorija problema krutih lomova na niskim temperaturama i neophodnost uključivanje akademske i inženjerske zajednice u rešavanje problema ove prirode.



U trećoj glavi predstavljene su teorijske osnove i definicije krtog i žilavog loma, kao i razlozi za klasifikaciju, uslova nastajanja itd. Objašnjeni su i faktori koji uslovljavaju prelaz iz žilavog u krt lom feritnih materijala, kao i definiciju krtog loma sa aspekta naučne discipline mehanike loma.

Četvrta glava pruža informacije o osnovnim principima mehanike loma, ali i postupaka i prikaz delova korišćenih standarda tj. načine određivanja parametara mehanike loma iz eksperimentalnog dela ove disertacije i ostalih merodavnih parametara. Pored toga, dati su i kratki opisi standarda po kojima se ovi parametri i određuju.

U petom poglavlju prikazani su osnovi statističke analize i teorije verovantoće, alata koji je upotrebljen u analizi i diskusiji rezultata eksperimentalno dobijenih rezultata. Prikazane su i objašnjene metode određivanja raspodele (prvenstveno Vejbulove) za određeni skup podataka, u ovoj konkretnoj studiji „slučajnih veličina“, kojim su predstavljeni upravo rezultati  $J_c$  eksperimentalnih ispitivanja. Osnovi regresione analize i metode primene su takođe prikazane u ovom poglavlju.

Šesta glava sadrži pregled literature sa ovom problematikom i njoj su prikazana dosadašnja istraživanja ove pojave prelazne temperature i karakterizacija iste za pojedine feritne čelike primenom naučne discipline mehanike loma. Posebna pažnja je data dvema studijama, koje su na početku ove disertacije i pomenute kao inspiracija ove disertacije – studije Landesa i Herensa. Prikaz studija sa statističkim tumačenjem i interpretacijom podataka ispitivanjem u prelaznom temperaturnom intervalu je takođe dat u ovoj glavi, kao i problematika uticaja stepena ometenosti deformacije. Pored toga, dat je i kratak prikaz radova i studija koji se tiču uticaja veličine struktura u Vejbulovoj statističkoj obradi, kao i skaliranja.

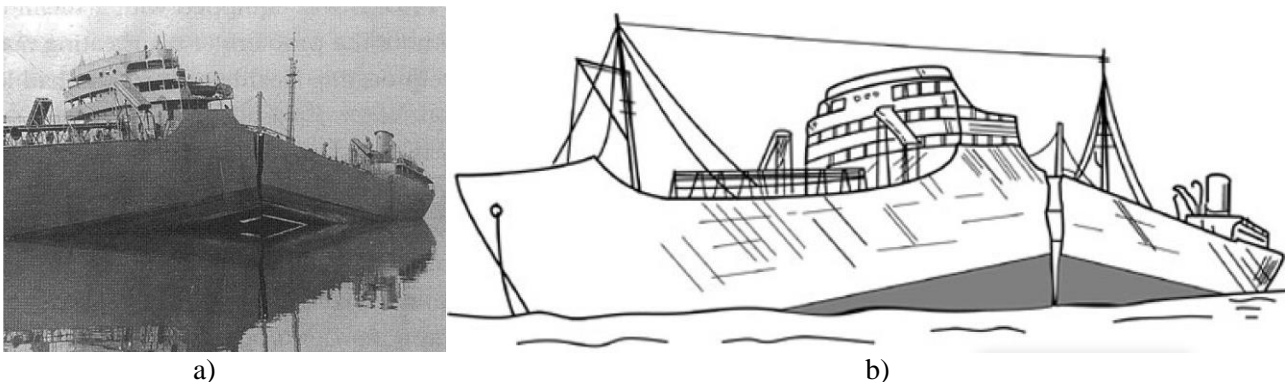
U sedmoj glavi prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja, kao i metode statističke obrade podataka sa ciljem dobijanja krivih verovantoće loma (kumulativnih raspodela) i predikcije verovatnoće loma cepanjem  $C(T)$  epruveta većih epruveta Vejbulovom dvo-parametarskom raspodelom u funkciji parametra  $J_c$ . Pored toga, dat je prikaz eksperimentalne postavke, pripreme uzoraka  $C(T)$  od ispitivanog feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55. Ispitivanja su urađena na dvema temperaturama  $-60^\circ\text{C}$  i  $-90^\circ\text{C}$  i prikaz rezultata celokupne studija je podeljen u ove dve grupe. Pored toga, dat je prikaz ostalih važnih parametara.

U cilju dobijanja odgovarajućih zaključaka, neophodno je, kao i u svakoj studiji, uraditi odgovarajuću analizu i diskusiju dobijenih rezultata, kao što je urađeno u osmom delu ove disertacije. Urađena je odgovarajuća diskusija dobijenih eksperimentalnih rezultata, kao i kriva verovatnoće loma cepanjem dobijene dvo-parametarskom Vejbulovom kumulativnom raspodelom i ostalih merodavnih parametara dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima. U posebnoj poglavlju ove glave predstavljen je originalni postupak skaliranja krivih iz prvog dela studije i ovom poglavlju je suštinski prikazana analiza uticaja veličine  $C(T)$  epruveta, odnosno geometrijski sličnih uzoraka (eng. *geometrically similar structures*) u funkciji parametra  $J_c$  na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ . Cilj skaliranja je dobijanje predviđanja verovatnoće loma za proizvoljnu veličinu  $C(T)$  epruvete. Diskusija u ovoj glavi je podeljena u nekoliko poglavlja.

U devetoj glavi dati su zaključci ove studije na osnovu predloženog načina obrade podataka, pouzdanosti dobijenih krivi i ostalih merodavnih parametara.

## 2 ISTORIJA PROBLEMA – LOMOVI U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE

Problem pojave krtog loma konstrukcija pri niskim temperaturama je odavno predmet istraživanja, ali se nije mogao dugo vremena opisati adekvatnim naučnim metodama. Postepenim razvojem nauke i pojedinih naučnih disciplina stvorili su se uslovi za odgovarajuće tumačenje i rešavanje problema lomova na niskim temperaturama. Jedan od prvih problema u industriji koji je uključio široku akademsku zajednicu, a ticao se istraživanju lomova na niskim temperaturama je lom brodova tipa Liberty. Od 4694 brodova ovog tipa koji su izrađeni zavarivanjem, pre i za vreme II Svetskog rata, kod 233 je došlo bukvalno do preloma broda na dva dela (slika 2.1), dok je 1289 je pretrpelo teška oštećenja. Jedan primer loma ovog tipa broda je dat na slici 2.1 koji se dogodio 16. januara 1943. u samom pristaništu nakon uspešne probe na otvorenom moru. Treba napomenuti da je more bilo mirno, temperatura vode je bila  $4,5^{\circ}\text{C}$ , a temperatura vazduha  $-3,5^{\circ}\text{C}$ . Lomovi ovih brodova bili su krti sa veoma malom ili skoro nikakvom plastičnom deformacijom. U početku se smatralo da je uzrok lomova brodova veća krtost zavarenih spojeva u odnosu na konstrukcije spojenih zakovcima ili da je došlo do zakaljivanja materijala blizu vratova [2, 3]. Međutim, detaljnijom analizom utvrđeno je da je pravi uzrok, pored uticaja zavarivanja i zaostalih napona, i nedovoljna niska prelazna temperatura žilavosti limova čelika od kojih su napravljeni brodovi. Dok su limovi havarisanih brodova imali prelaznu temperaturu od  $15$  do  $70^{\circ}\text{C}$ , kod limova nehavarisanih brodova ta ista se kretala između  $15$  i  $55^{\circ}\text{C}$  [4, 5]. Nakon ovoga, tačnije nakon 1943. godine došlo je do promena u hemijskom sastavu čelika limova za izradu brodova (snižen je sadržaj ugljenika, dok je sa druge strane povećan sadržaj mangana), što je dovelo do sniženja prelazne temperature žilavosti na vrednosti od  $-25$  do  $+25^{\circ}\text{C}$ . Na osnovu studija lomova ovih brodova usvojena je kao preporuka za kvalitet nekog čelika temperatura koja odgovara udarnoj žilavosti od  $20\text{ J}$  kao najviša konzervativna vrednost ( $20\text{ J Cv}$ ), koja je kasnije ušla u standarde za projektovanje konstrukcija i za metalurške analize čelika. Usledilo je kasnije i detaljno istraživanje uticaja legirajućih elemenata na mehaničke karakteristike, posebno žilavost, ali i ostalih uticaja poput veličine zrna, termičke obrade, postupka umirivanja čelika itd. Ove izmene dovele su do smanjenja broja havarija brodova ovog tipa. Naknadno su ova istraživanja i preporuke imala uticaj na istraživanja potonuća Titanika 1912. godine, ali i uticaj istraživanja lomova drugih konstrukcija koji su izloženi niskim temperaturama.



Slika 2.1 a) Prikaz loma broda Liberty u luci; b) ilustracija loma ovog broda na pola [3, 4]

Oprema namenjena za rad pod pritiskom je tokom eksploatacije izložena različitim radnim i atmosferskim uslovima, od radnog pritiska do temperature, uticajima korozije itd. koji mogu izazvati pojavu krtog lom. Jedna od prvih katastrofa posuda pod pritiskom zabeležena je u Bostonu (SAD), u januaru 1919. Samo četiri godine nakon izrade i puštanja u rad, ogroman rezervoar za proizvod melase je pukao i izazvao talas visine 8 m ovog proizvoda od šećera (slika 2.2). Nakon odgovarajuće istrage došlo se do sledećih zaključaka i razloga za izbijanje ove katastrofe: loša proizvodnja samog materijala i rezervoara, mala žilavost materijala, odnosno čelika, i sam dizajn rezervoara [6]. Međutim u ovom periodu, na samom početku 20. veka nije se znalo za pojam prelazne temperature materijala, što to je zapravo bio i pravi razlog, jer su istraživanja u ovoj oblasti tek počela sa lomovima gore opisanih brodova *Liberti*.

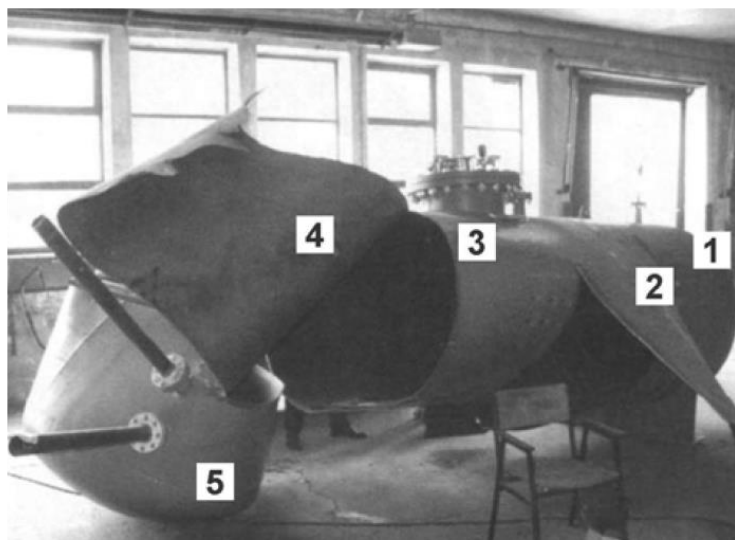


Slika 2.2 Poplava usled krtog loma rezervoara za skladištenje melase u januaru 1919. izazvana i neodgovarajućom prelaznom temperaturom korišćenog materijala za izradu skladišta [6]

Noviji pristupi u izradi materijala, promena hemijskih sastava čelika doveli su do smanjenja broja katastrofa posuda pod pritiskom, ali ne i do katastrofalnih posledica. Jedan od primera koji se može izdvojiti je nesreća u Južnoafričkoj Republici 1973. Naime, došlo je do eksplozije rezervoara za amonijak čija je radna temperatura bila oko ambijentalne. Pre toga sam rezervoar je podvrgnut reparaturnom zavarivanju pojedinih šavova u blizini dna u cilju eliminisanja prslina i potencijalne koncentracije napona. Međutim, tokom same izrade ovog rezervoara (koja uključuje i zavarivačke aktivnosti) nije adekvatno urađena termička obrada otpuštanja. Kasnija istraživanja i ispitivanja osnovnog materijala rezervoara su pokazala da isti ima slabu žilavost u području prelazne temperature, neposredno iznad ambijentalne temperature [6]. Tokom eksploatacije, curenje amonijaka na dancu je izazvalo hlađenje materijala koje je doveo do krtog loma i eksplozije dna posude [6, 7]

Među interesantnije studije koje se mogu izdvojiti ubrajaju se studije [8, 9] u kojima su predstavljene analize loma dve posude pod pritiskom usled različitih spoljašnjih uslova. Mehanizmi lomova za ova oba slučaja su različiti, prva posuda je imala krt, a druga posuda žilav lom, iako su obe posude napravljene od feritnih materijala i više manje bili podvrgnuti istim eksploatacionim uslovima. Obe posude su imale istu debljinu omotača, koja je bila mala što odgovara RSN, a materijali od kojih su napravljene (Nioval 47 i S355J2G3) imaju dovoljnu specifičnu plastičnost na niskim temperaturama. Do krtog loma je došlo kod rezervoara za skladištenje prirodnog gasa osnovnog materijala S355J2G3 (slika 2.3). Inspekcijom je utvrđeno da je do krtog loma došlo zato što je ova (podzemna) posuda namenjena za skladištenje prirodnog gasa tokom rada bila izložena

temperaturama nižim od nulte žilavosti u prelaznom režimu (u ovom slučaju  $-20^{\circ}\text{C}$ ). Tačnije, nije poštovan zahtev da temperatura ispitivanja probnim pritiskom bude dovoljno visoka u odnosu na prelaznu temperature nulte plastičnosti, pa su se osnovni metal i zavareni spojevi našli u situaciji neizbežnog krtoeg ponašanja. U ovim uslovima i najmanja koncentracija napona dovodi do loma. Ovo je uzrokovalo inicijaciju krtoeg loma i nestabilan rast prlsine u uslovima RSD, koji je preduslov za pojavu krtoeg loma, jer plastične deformacije skoro da nije bilo. Do loma je došlo u donjem delu posude pod zemljom, zbog nižih temperatura u tom delu u odnosu na gornji.



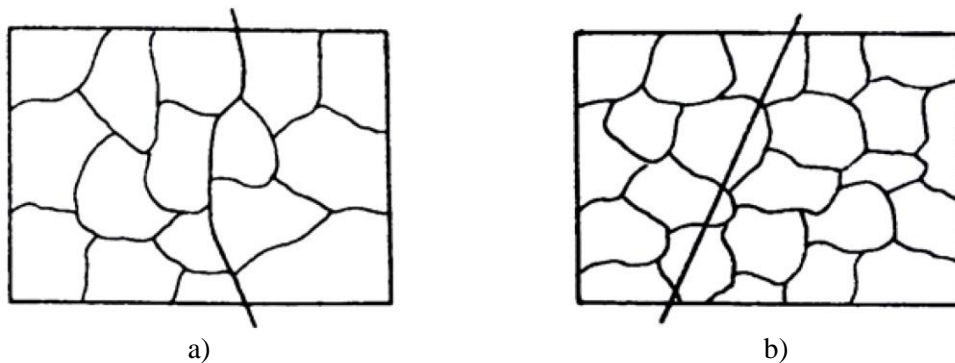
Slika 2.3 Prikaz krtoeg loma podzemnog rezervoara za skladištenje prirodnog gasa [8]

Usledio je i čitav niz drugih studija u cilju razumevanja zašto su se neke katastrofe desile, sa glavnim ciljem da se iste izbegnu ili preduprede. Studije u ovoj oblasti su pokazale da je neophodno, pored pristupa „studije slučaja“ (eng. *case study*) i istraživanja uzroka lomova, istražiti šta je uticalo na to, odnosno šta je ubrzalo proces nestabilnog rasta prlsine. Pored toga, potrebno je i dodatno ispitivanje samih materijala, unapređenje istih i posebno ispitivanja materijala primenom principa mehanike loma, jer je upravo lom ono što želi da se izbegne prilikom puštanja u rad. U tu svrhu definisani su mnogobrojni standardi u cilju ispitivanja parametara mehanike loma. Pored toga, paralelno je tekao razvoj standarda koji se tiču preporuka odabira materijala u zavisnosti od namene i radnih uslova, bilo da li su u pitanju posude pod pritiskom, dizalice ili vratilo radne mašine itd. Specijalno, za posude pod pritiskom, rezervoara i rad istih na niskim temperaturama, poznati su brojni standardi poput EN 13455, EN 14620 ili drugi [10-12] u kojima su date razne preporuke za izbor materijala izrade posuda u zavisnosti od radne temperature, radnog fluida itd, ali i ograničenja primene, što je nekad najvažnije. Primena ovih standarda ima za cilj i obezbeđivanje integriteta konstrukcija, poput rezervoara za skladištenje amonijaka, namenjen za rad na veoma niskim temperaturama [13]. U rešavanju ovih problema, tačnije problema krtoeg loma i ponašanja materijala u području prelazne temperature, je uključena statistička metoda manipulacije podataka, odnosno rezultata ispitivanja. Prve studije ovog tipa beleže se 70ih godina 20. veka o kojima će biti reči kasnije. Dakle, paralelnim razvojem standarda, definisanjem metoda mehaničkih ispitivanja i standardnih ispitivanja mehanike loma materijala, ali i studije slučaja lomova, uz uključivanje drugih „nestandardnih“ naučnih metoda (poput statistike) sa ciljem tumačenja rezultata ispitivanja materijala, je jedino moguće unaprediti feritne materijale. Povratkom na početak poglavlja, to je upravo bio slučaj sa feritnim čelikom brodova tipa Liberti, a analiza je prosto nametnula potrebu za promenom hemijskog sastava korišćenog čelika. Pored toga, ovakav pristup uslovio je potrebu definisanja domena primene feritnih čelika u području niskih temperatura kroz preporuke standarda ili pravilnika, dok prelazni temperaturni režim i dalje iziskuje posebnu pažnju za mnoge materijale.

## 3 KRITI LOM

### 3.1 DEFINICIJA KRTOG LOMA

Krti lom nastaje pri vrlo maloj ili nikakvoj plastičnoj deformaciji materijala. Po pravilu krti lom nastaje usled trenutnog širenja prsline. Krti lom se karakteriše vrlo niskim nivoom utrošene energije za njegov nastanak. Za krti lom je karakteristično potpuno odsustvo plastičnih deformacija pa samim tim i disipacije energije koje ih prate. Jedna od osnovnih razlika između žilavog i krtog loma je što kod krtog loma širenje prsline nije uslovljeno plastičnom deformacijom, dok je kod žilavog loma obrnuto. Pri rasprostiranju centralne prsline mora da postoji znatna plastična deformacija da bi lom bio žilav, dok kod krtog loma ovo ne mora da bude slučaj. Krti lom se javlja, po pravilu, u unutrašnjosti kristalnih zrna, a širi se duž kristalografske ravni pojedinih zrna polikristala koja se naziva ravan loma [4]. Pojava krtog loma u metalnim materijalima zavisi, kako od strukturne građe metala i hemijskog sastava, tako i od eksploatacionih uslova. Tu se mogu ubrojiti prvenstveno radna temperatura konstrukcije ili radne mašine, nivo i priroda opterećenja, ali i uticaj zavarivanja, prisustvo ili odsustvo koncentratora napona itd. [4, 14-21]. Sa inženjerske tačke gledišta, pod krtim lomom podrazumeva se lom koji proističe iz minimalne plastične deformacije i naziva se krti lom [4, 5, 15, 22]. Snižanjem radne temperature priroda loma kod većine metalnih materijala se menja u smislu povećanja njegove krtosti. Ovaj veoma složeni proces definisan je područjem prelazne temperature. Krti lom može nastati po granicama kristalnog zrna, poznat kao interkristalni lom, ali može da se širi i kroz sama kristalna zrna (slike 3.1).



Slika 3.1 Ilustracija: a) interkristalni; b) transkristalni lom [4]

Krtom lomu, pored sniženja temperature, doprinose uslovi opterećenja, npr., povećanje brzine deformacije. Svi ovi faktori doprinose pojavi krtog loma. O ovoj temi će biti reči nešto kasnije u ovoj disertaciji.

Neke od generalnih makroskopskih karakteristika krtog loma koje se mogu uočiti na ispitivanim uzorcima ili nekoj realnoj konstrukciji su:

- lomu prethodi neznatni plastična deformacija
- rast prsline je brz, a lom je ponekad praćen i praskom
- prelomna površina uzorka je ravna i upravna na pravac delovanja sile
- struktura loma je kristalasta sa velikim brojem ravni sa svetlim refleksijama

- pri ispitivanju zatezanjem, lomu ne prethodi stvaranje vrata (eng. *necking*) na epruveti očljiv vizuelnom inspekcijom
- karakteristične strelaste šare (eng. *chevron marks*) mogu se uočiti na prelomnoj površini ispitivanog uzorka ili realne konstrukcije.

Generalno, između krtog i žilavog loma nije moguće povući neku oštru granicu s obzirom na to da u svakom lomu postoji izvesni nivo neke plastične deformacije. Činjenica je da u realnim uslovima kod metalnih materijala, čak i na niskim temperaturama, praktično nema čisto krtog loma te bi se lom ovog tipa preciznije mogao nazvati kvazi-krti lom [4, 20, 22-24]. Žilavi lom se karakteriše intenzivnom plastičnom deformacijom u svim etapama loma i može nastati pri naponu iznad napona tečenja, što zavisi od materijala. Do ovakovog loma lako dovode procesi plastične deformacije [15, 19]. Žilavi lomovi su generalno transkristalni jer se prslina kreće kroz kristalna zrna [4, 25, 26]. Potrebno je naglasiti da žilavom (plastičnom) lomu konstrukcije ili radne mašine nije potrebno da prethodi i širenje prslina.

## 3.2 FAKTORI KOJI USLOVLJAVAJU PRELAZ IZ PLASTIČNOG U KRT LOM FERITNIH MATERIJALA

Struktura materijala, a pre svega feritnih čelika, je takva da je njihov krt lom zavisi eksploatacionih uslova kojim su izloženi, prvenstveno opterećenja. Kod većine konstrukcijskih materijala feritne kristalne strukture pojavi krtog loma pogoduju uslovi poput sniženje temperature i/ili povećanja brzine deformisanja. Jedan isti materijal koji ima različitu primenu u različitim eksploatacijskim uslovima može se ponašati plastično ili krto, a to zavisi od radnih uslova uključujući i okruženje. Ono što je godinama tema mnogobrojnih studija je to u kojoj meri i na koji način promena radnih uslova utiče na promenu prirode loma. Generalno, promena prirode loma zavisi od samih osobina materijala (primer, materijal koji je tema ove disertacije, tačnije čelik 20MnMoNi 55), odnosno od njegove osetljivosti na promenu tih osobina usled promenu temperature. Uslovi pod kojima feritni čelici, menjaju prirodu loma iz plastičnog (žilavog) u krto zavise od:

- oblika i mera konstrukcijskog dela ili ispitivane epruvete
- brzina dejstva opterećenja i brzine deformacije radnog dela ili ispitivane epruvete
- od radne ili ispitivane temperature

### 3.2.1 Uticaj oblika i mera konstrukcijskog dela

Kao što je poznato, raspodela i veličina napona pri određenom spoljašnjem opterećenju zavise od koncentracije napona i od veličine plastične zone. RSN odnosno RSD pogoduju plastičnom ili krtom lomu, respektivno. Jedan od načina za uspostavljanje RSD je izrada epruvete za ispitivanje sa odgovarajućom potrebnom debljinom. Može se reći da je RSD (što se odnosi i na RSN) diktiran uslovima geometrije uzoraka. Epruvete mogu biti različitih oblika o čemu će biti više reči u sledećim poglavljima. Što je debljina epruvete veća uslovi RSD su izraženiji i pogoduju krtom lomu, što se odražava na merodavne parametre ili merene parametre loma u konkretnom slučaju ispitivanja. Može se reći da oblik epruvete ima uticaja na prirodu loma (žilav ili krt).

### 3.2.2 Uticaj brzine dejstva opterećenja i deformacije

Promena brzine ispitivanja u izvesnim slučajevima može uticati na promenu nekih mehaničkih svojstava materijala ili na promenu parametara mehanike loma. U standardnim ispitivanjima, određivanje osnovnih mehaničkih karakteristika, ali i parametara mehanike loma, mogu se razlikovati dve tehnike zadavanja opterećenja, tačnije, brzine procesa pri deformaciji:

1. Promenom opterećenja sa vremenom, tačnije konstantnim prirastom sile. Ako su u toku procesa deformacije male, brzina promene opterećenja se može predstaviti relacijom (3.1).

$$V_s = \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.1)$$

2. Promenom deformacije sa vremenom, tačnije konstantnim prirastom deformacije. U ovom slučaju ako je izduženje malo u poređenju sa početnom, brzina čeljusti po kojoj se zadaje promena opterećenja se može predstaviti relacijom (3.2).

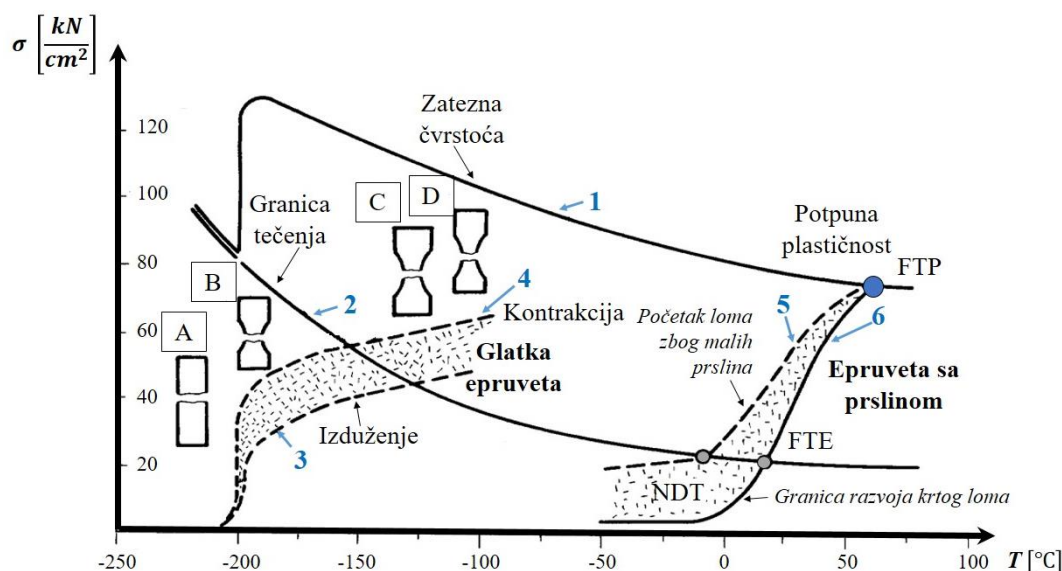
$$V_k = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.2)$$

Svi materijali menjaju izvesna mehanička svojstva sa promenom brzine deformisanja. U zavisnosti od ove promene, materijali se mogu podeliti na one koji nisu osetljivi (odnosno, promene svojstava su skoro minorne sa stanovišta praktične primene) na promenu brzine ispitivanja i one kod kojih se mehaničke osobine vidno menjaju. Ovo je još više izraženo promenama parametara mehanike loma. Za većinu konstrukcijskih materijala može se reći da povećanje brzine deformisanja pogoduje pojavi krtog loma, tako da nema dovoljno vremena (ili mesta, ili oboje) da se plastična deformacija iskaže. Pojava krtog loma je često praćena simultanim dejstvom velike brzine deformisanja u uslovima snižene temperature.

### 3.2.3 Uticaj temperature

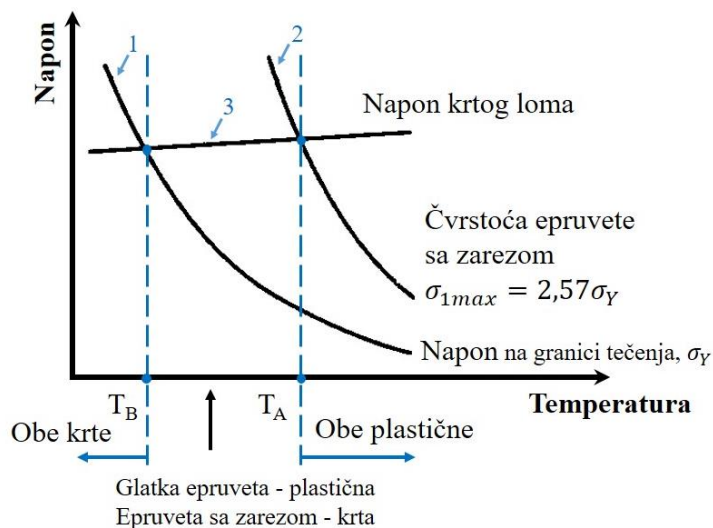
Uticaj temperature na lom konstrukcija je dugo kroz istoriju bio nepoznanica i tek razvojem odgovarajućih naučnih disciplina došlo je do istraživanja u ovom polju. Ova istraživanja intenzivirana su tokom i nakon II svetskog rata, jer su pojedini lomovi doveli do potrebe da se prouči i uticaj temperature na ponašanje čelika ili njihovih zavarenih konstrukcija. Rezultati brojnih ispitivanja u tom periodu omogućili su da se oforme dijagrami zavisnosti mehaničkih karakteristika od temperature. Jedan takav dijagram za konstrukcioni meki čelik, kakav je korišćen za izradu brodova, prikazan je na slici 3.2. Kriva 1 na dijagramu pokazuje promenu zatezne čvrstoće sa promenom temperature, dok kriva 2 pokazuje promenu napona tečenja. Može se videti da je karakter promene ove dve veličine sličan sve do veoma niske, prelazne temperature. Sa snižavanjem temperature povećavaju se i zatezna čvrstoća i napon tečenja. Promenu izduženja i kontrakcije predstavljene su krivama sličnih oblika, odnosno krivama 3 i 4, respektivno. Na temperaturi od oko  $-200^{\circ}\text{C}$  i jedna i druga veličina imaju vrednosti nula, čime je dobijen potpuno krti lom glatke epruvete koja se na nešto višoj temperaturi od ove još uvek lomila plastično (lomovi označeni na slici B, C i D).

U prisustvu malih prslina u konstrukciji ili epruveti, krti lom će početi da se javlja na osetno višim temperaturama (krive 5 i 6). Na ovim krivama su označene i karakteristične tačke temperaturnog prelaza. Tačka označena kao NDT (eng. *nil ductility transition* - NDT temperatura) određuje temperaturu ispod koje se u prisustvu prsline može pojaviti samo krti lom [23]. Tačka označena kao FTE (eng. *fracture transition elastic*) označava najvišu moguću temperaturu za nestabilni razvoj prsline koji dovodi do krtog loma. Iznad te temperature pri naponima nižim od napona tečenja neće doći do loma, a pri višim naponima razvoj prsline je stabilan [24]. FTP tačka na dijagramu (eng. *fracture transition plastic*) predstavlja prelaznu temperaturu plastičnosti iznad koje je moguć samo plastični lom, čak i u prisustvu prsline.



Slika 3.2 Promena mehaničkih svojsta običnog mekog čelika sa temperaturom: kriva 1. zatezna čvrstoća, 2. napon tečenja, 3. izduženje, 4. kontraktija, 5. početak loma u prisustvu malih prslina, 6. granična kriva krtog loma

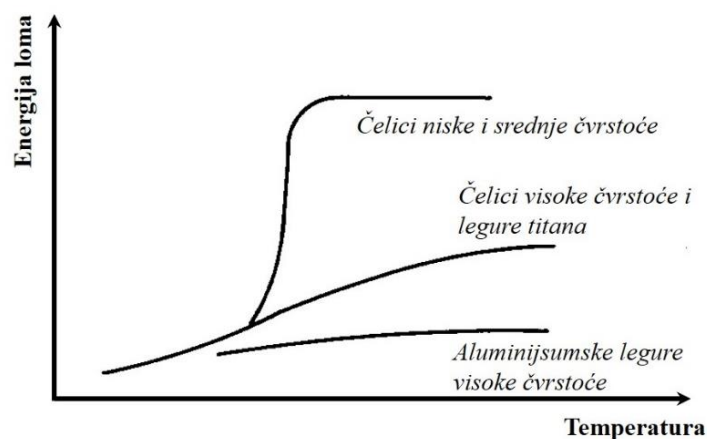
Objašnjenje prelaza iz plastičnog u krt lom dao je Orovan i deo ove studije se može naći u literaturi, poput [23]. Orovanova teorija je prikazana grafički na slici 3.3. U svojoj studiji polazi od postavke da je lom cepanjem, ili krti lom, zavisian od veličine napona tečenja, pa je zbog toga epruveta sa prslinom ili zarezom u većoj meri sklona krtom lomu od glatke na određenoj temperaturi. Napon pri lomu epruvete sa zarezom malo zavisi od temperature, kao što je prikazano na krivom 3 i u preseku sa krivom 1 za napon tečenja glatke epruvete i krivom 2 za maksimalni napon u plastičnoj zoni zarezane epruvete dobijaju se prelazne temperature. Temperatura  $T_A$  odgovara temperaturi NDT, dok temperatura  $T_B$  odgovara temperaturi krtog loma glatke epruvete sa prethodne slike 3.2. Iako je ovim modelom Orovan zanemario mnoge faktore koji utiču na prelaz čvrstoće on je poslužio kao ilustracija i dobar temelj za neke osnovne zakonitosti.



Slika 3.3 Orovanova teorija krtog loma [23]

Promena energije loma udarnim ispitivanjima na različitim materijalima (čelicima i legurama) je prikazana na slici 3.4. Ova udarna ispitivanja je prvobitno uveo i definisao Pelini da bi kasnije postala standardna po ASTM-u E208 [27]. Čelici niske i srednje čvrstoće imaju izraženu prelaznu temperaturu. Kod čelika visoke čvrstoće i kod legura titana ona je manje izražena. Za legure aluminijuma visoke čvrstoće usvaja se da ne postoji prelazna temperatura, jer se u širokom dijapazonu temperatura mehaničke karakteristike ovih materijala veoma malo menjaju.



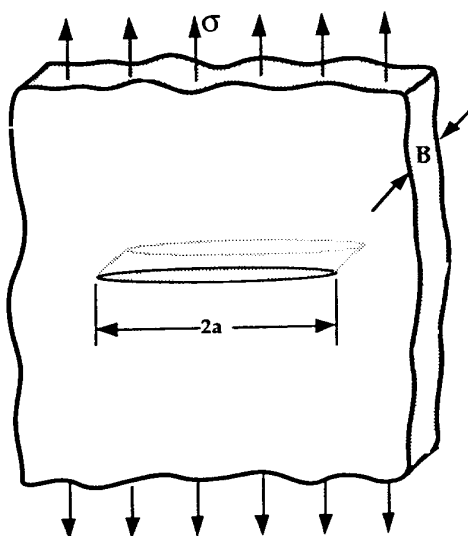


Slika 3.4 Zavisnost energije loma od temperature za određene materijale [24]

### 3.3 PROBLEM KRTOG LOMA SA ASPEKTA MEHANIKE LOMA

#### 3.3.1 Grifitovo rešenje sa aspekta mehanike loma

Jedno od predloga rešavanja problema krog loma dao je Grifit [28] za ploču sa centralnom prslinom opterećenu jednoosnim zatezanjem (slika 3.5). Ovo predstavlja prvo rešenje krtog loma koristeći naučnu disciplinu mehaniku loma odakle se i svi kasnije problemi žilavosti loma generalno rešavaju. Naime, Grifit je za problem sa slike 3.5 predložio rešenje potrebno za nestabilan rast prsline, tj. krti lom.



Slika 3.5 Šema Grifitovog problema [22]

Dimenzije ploče su znatno veće od dužine prsline, osim debljine  $B$ , koja je dovoljno mala u cilju obezbeđivanja RSN. Analizirajući porast dužine prsline za inkrementalno malu veličinu  $da$ , Grifit je utvrdio da će prsline nestabilno da raste ako je oslobođena potencijalna energija,  $-dII$  jednaka radu potrebnom za nastanak novih površina prsline  $dW_s$  što se može predstaviti relacijom (3.3).

$$-\frac{d\Pi}{da} = \frac{dW_s}{da} \quad (3.3)$$

Rad  $dW_s$  je jednak jediničnoj površinskoj energiji  $\gamma_s$  pomnoženoj odgovarajućom površinom. Grifit je primenio naponsku analizu Inglisa da bi pokazao da za potencijalnu energiju ploče važi

relacija (3.4) u čijem izrazu figuriše i potencijalna energije ploče bez prsline  $\Pi_0$ . Na taj način se odgovarajući inkrement potencijalne energije  $d\Pi$  može predstaviti relacijom (3.5).

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} \quad (3.4)$$

$$d\Pi = -\frac{\pi\sigma^2 2adaB}{E} \quad (3.5)$$

Svođenjem inkrementa potencijalne enerigije  $d\Pi$  i rada  $dW_s$  na inkrement dužine prsline  $da$ , kao i prethodno objašnjenog Grifitovog kriterijuma za nestabilni rast prsline tj. relacije (3.3), dobija se izraz (3.6). Leva strana ovog izraza predstavlja brzinu oslobađanja energije, dok je desna otpornost materijala na stabilan/nestabilan rast prsline. Na osnovu svih gore opisanih izraza, napon potreban za nestabilan rast prsline (odnosno, krta lom) se može može predsaviti izrazom (3.7).

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma_S \quad (3.6)$$

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_S}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

Teorija po kojoj je Grifit dobio ovo rešenje pruža dobro objašnjenje za čvrstoću idealno krta materijala, ali njena primena na žilave materijale sa izraženom duktilnošću nije praktična. Većina metalnih materijala nije krta i prethodno rešenje zahtevalo je odgovarajuće modifikacije.

### 3.3.2 Kvazi-krta lom

Idelno krta lomovi ne postoje u praksi, jer u svim slučajevima postoji mala plastična deformacija. Irvin je sa saradnicima [29] eksperimentima na epruvetama sa centralnim prslinama izrađenim od legure aluminijuma debljine 0,8 mm dobio kritičnu vrednost napona u obliku (3.8), pri čemu je energija loma  $G_c$  mnogo veća od površinske energije materijala  $2\gamma_S$ . Došlo se do zaključio da se značajna energija troši na razvoj plastične deformacije oko vrha prsline.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} \quad (3.8)$$

Grifitov kriterijum kvazi-krtog loma može se proširiti uvođenjem energije potrebne za rad plastične deformacije  $\gamma_p$  koja prethodi nestabilnom razvoju prsline, pa se dobija izraz (3.9). Kada je ispunjen uslov da je  $\gamma_p + 2\gamma_S$  mnogo veće od  $2\gamma_S$ , tada približno važi izraz (3.10).

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E(2\gamma_S + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (3.9)$$

$$\sigma_c \cong \sqrt{\frac{E\gamma_p}{\pi a}} \quad (3.10)$$

Ovi kriterijumi ne mogu da se primene na analizu lokalnog ponašanja, jer su zasnovani na globalnom pristupu. Iz ovog razloga, dalji razvoj mehanike loma bio je usmeren na naponsku analizu oko vrha prsline i uvođenje odgovarajućih lokalnih parametara u oblasti linearne elastičnosti [14, 22]. Grifitov kriterijum kvazi-krtog loma (3.10) se ne može primeniti na feritnim čelicima zbog toga što se čak i na relativno niskim temperaturama odlikuju izraženom plastičnom deformacijom. Bez obzira na to, Grifitov energetski kriterijum je poslužio kao dobra osnova za kasniji razvoj linearno-elastične (LEML) i elasto-plastične mehanike loma (EPML).

## 4 MEHANIKA LOMA – OSNOVE I STANDARDNA ISPITIVANJA

U ovom biće predstavljeni neki osnovni pojmovi mehanike loma, kao i opis nekih od standardnih parametara mehanike loma i relacije koje ih povezuju. Za određivanje parametara mehanike loma postoje standardne procedure koje pružaju informacije o načinu pripreme uzoraka, samom toku ispitivanja, prikaza i obrade rezultata.

Prikazani su najvažniji delovi standarda (tj. načina izračunavanja parametara mehanike loma) korišćenih u ovoj disertaciji za statička ispitivanja loma cepanjem C(T) uzoraka. Takođe su dati i diskutovani standardi po kojima se ovi proračuni obavljaju. Svaki novi podnaslov sa opisanim parametrom mehanike loma pružiće i definicije istog, načine proračuna; poput faktora intenziteta napona  $K$ , parametra CTOD,  $J$ -integrala itd. Suština ovog poglavlja, pored pružanja teorijske osnove i definisanja osnovnih parametara mehanike loma, je i pružanje informacija o proračunu parametara mehanike loma koji se tiču ove disertacije, poput parametra  $J_c$  i CMOD. Pored toga biće prikazan i način nestandardnog određivanja napona loma C(T) epruveta koji je korišćen u eksperimentalnom delu ove disertacije i ostalih merodavnih parametara.

### 4.1 UVOD

Mehanika loma je naučna disciplina koja se bavi problemima prslina i njihovog uticaja na ponašanje materijala i konstrukcija. Mehanika loma, koja je prvobitno nazvana mehanikom prslina, je počela svoj razvoj početkom 20. veka radovima Inglisa koji su se bavili problemima koncentracije napona [30] i Grifita o brzini oslobađanja energije [28]. Pedesetih godina 20. veka Irvin [31, 32] je postavio temelje LEML uvođenjem parametara faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti. U to vreme ova relativno mlada naučna disciplina beleži prve značajne praktične uspehe objašnjenjem lomova, poput brodova tipa Liberti o kojima su izvedene brojne studije i analize [22, 33, 34]. Dalji razvoj mehanike loma obuhvatio je njeno proširenje na elasto-plastičnu oblast analizom plastične zone ispred vrha prslina [33, 35] i uvođenjem novih parametara mehanike loma poznatih kao otvaranja vrha prslina [36] i  $J$ -integral [37]. Nakon toga usledio je razvoj mehanike loma u još nekim važnim oblastima primene kao što su zamor, puzanje i korozija itd.

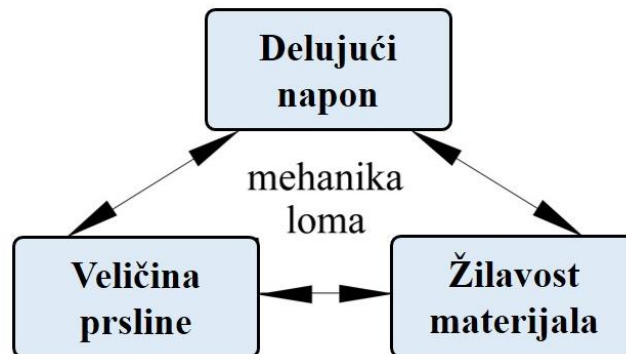
Razvoj mehanike loma i mogućnost njene praktične primene na konstrukcije potrebno je upoznati iz najmanje tri aspekta:

- 1) teorijskog
- 2) eksperimentalnog
- 3) eksploatacijskog

Teorijski razvoj mehanike loma je zasnovan na proučavanju prslina u materijalima (koji mogu biti homogeni, nehomogeni, anizotropni itd.) i definisanju njihovih parametara. Eksperimentalna ispitivanja su omogućila razvoj standarda za određivanje parametara mehanike loma ispitivanjem epruveta sa prslinama i time i ovaj aspekt ima svoje značajno mesto. Iskustvo u ispitivanjima je pružilo potrebnu vezu da se ostvareni rezultati kasnije primene u analizi lomova u eksploataciji, kao i u oceni radnog veka komponente sa prslinom, ali i u projektovanju konstrukcija.

Praktična primena mehanike loma se od samog početka zasnivala na dvojakom tumačenju njenih parametara. Naime, sa jedne strane oni uzimaju u obzir opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući geometriju prslina, a s druge strane prirodno svojstvo materijala, odnosno njegovu

otpornost na rast prslina [22]. Na taj način je nastao klasični trougao mehanike loma (slika 4.1). Time je omogućeno da mehanika loma postane jedan od temelja u inženjerskoj primeni na izučavanje integriteta i veka konstrukcija [38, 39]. Drugim rečima, mehanika loma je postala disciplina koja se pored analize lomova bavi i time kako da se lomovi preduprede.

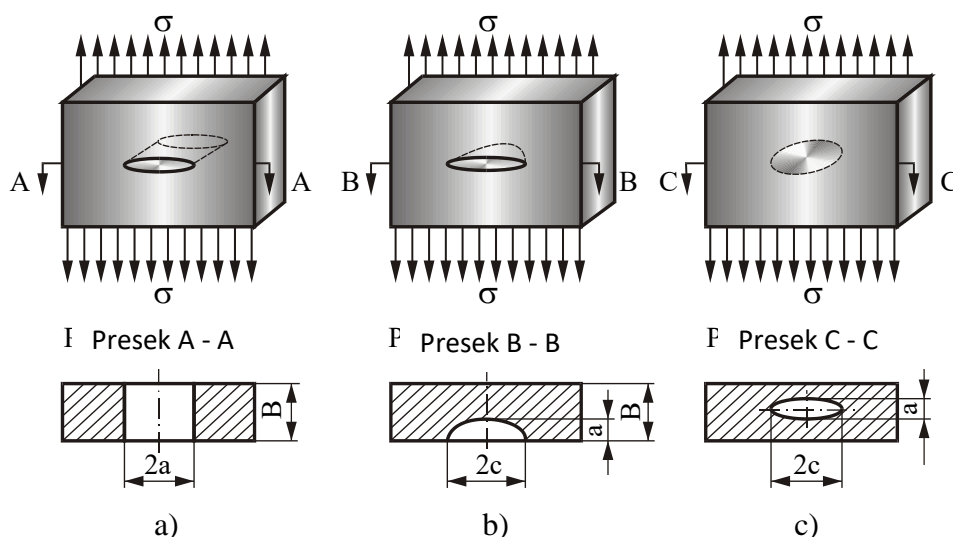


Slika 4.1 Trougao mehanike loma [22]

Mehanika loma se može ugrubo podeliti na dve oblasti, a to su LEML i EPML. LEML se koristi za određivanje rasta prsline u materijalu uz osnovnu pretpostavku da su naponi u materijalu većinom u zoni linearno-elastične deformacije. Prilikom rasta prsline, pretpostavlja se da je tokom celog procesa plastična deformacija lokalizovana u maloj oblasti na vrhu prsline. U teoriji LEML, zanemaruje se činjenica da se javljaju plastične deformacije (oko vrha prsline), odnosno, smatra se da je veličina plastične zone oko vrha prsline zanemarljivo mala u odnosu na dužinu prsline i debljinu ploče u kojoj se prsline nalazi. Pokazalo se kasnije da pojava plastične zone oko vrha prsline ne može biti zanemarena, pa stoga, bez obzira da li je lom krt ili žilav, plastična zona oko vrha prsline utiče na lom. Kada se u području vrha prsline pojavi plastična zona značajne veličine, nije više moguće jednoznačnim parametrom opisati polje napona i deformacija, kao što je to bio slučaj sa faktorom intenziteta napona  $K$ , niti je moguće njenim kritičnom vrednošću definisati žilavost loma materijala. Zato je potrebno uvođenje parametara koji nisu ograničeni linearno-elastičnim ponašanjem materijala. Tako se došlo do novih parametara EPML kao što su otvaranje vrha prsline (CTOD) iz koje je kasnije izašao parametar otvaranje usta vrha prsline (CMOD) i  $J$ -integral. Pored ove dve osnovne podele, mehanika loma se može primeniti u slučajevima statičkih i dinamičkih opterećenja.

## 4.2 OSNOVNI OBLICI OBRAZOVANJA POVRŠINE PRELOMA

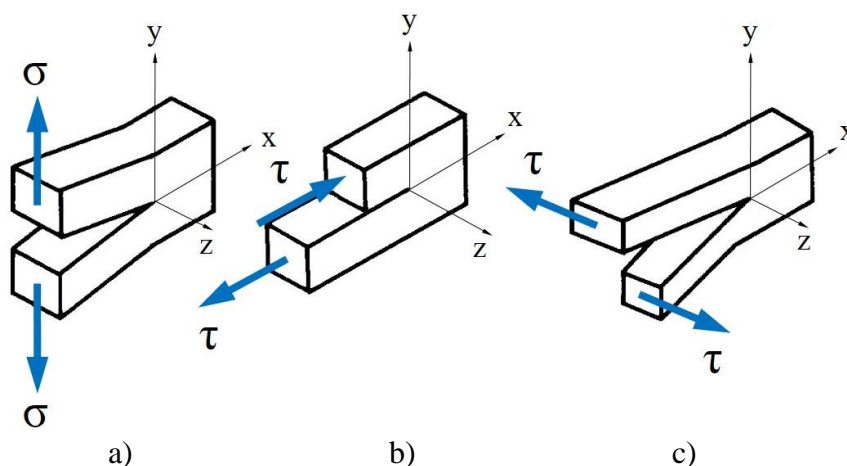
Prsline predstavljaju šupljinu u telu obrazovanu bez uklanjanja materijala i ograničenu sa dve naspramne površine (ili lica) čije je rastojanje neuporedivo manje od dimenzija njene površine [22, 24]. Zajednička konturna linija površine prsline naziva se čelo (ili front) prsline (slika 4.2). Kako su stvarne prsline najčešće nepravilne po obliku, na slici 4.2 su prikazane najkarakterističniji oblici ravanske prsline idealizovanog čela koji se usvajaju u teorijskim razmatranjima. Tako se, npr., čelo središnje prolazne prsline (slika 4a) idealizuje kao prava linija, površinska prsline kao poluelipsa (slika 4b), a čelo skrivene (unutrašnje) prsline kao elipsa (slika 4c).



Slika 4.2 Osnovni oblici ravnanske prsline; a) prolazna, b) polueliptična, c) eliptična [22]

Razdvojene površine prsline predstavljaju neopterećene granice napregnutog tela i zbog toga raspodela napona u blizini vrha prsline zavisi od oblika obrazovanja površine preloma.

Irvin je pokazao da postoje tri osnovna oblika pomeranja jedne površine prsline ka drugoj i da se njima opisuje ponašanje prsline u svim naponskim stanjima. Na slici 4.3 prikazani su osnovni oblici pomeranja koji obuhvata vrh prsline.



Slika 4.3 Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma: a) Oblik I – cepanje, b) Oblik II – klizanje, c) Oblik III - smicanje [14]

Gore prikazani oblici pomeranja vrha prsline, koja leži u  $xz$ -ravni, mogu se opisati na sledeći način:

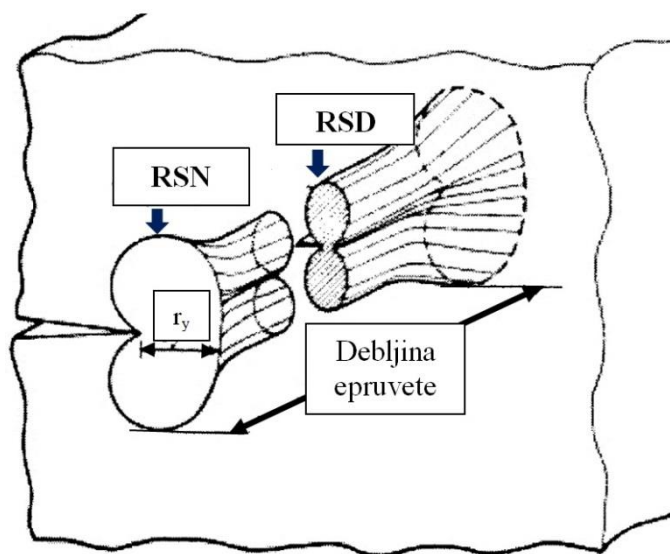
- Oblik I - razvoj prsline cepanjem, koji izaziva lom cepanjem (slika 4.3a) određen je pomeranjem površina prsline tako da se one otvaraju simetrično u odnosu na prvobitnu ravan prsline.
- Oblik II - razvoj prsline klizanjem, koji izaziva lom klizanjem (slika 4.3b) se odnosi na lokalnu deformaciju pri kojoj jedna površina klizi po drugoj u istoj ravni, ali u suprotnim smerovima.
- Oblik III - razvoj prsline smicanjem, koji izaziva lom smicanjem (slika 4.3c) i predstavlja slučaj lokalne deformacije pri kojoj se površine smiču jedna po drugoj duž čela prsline tako da su tačke materijala, koje su pre razvoja prsline bile u istoj vertikalnoj ravni, nakon razvoja prsline raspoređene po različitim vertikalnim ravnima.

Najopasniji lomovi nastaju pri razvoju prsline cepanjem (oblik I) i oni predstavljaju najopštiji vid lomova, te iz tog razloga ovaj razvoj prsline je i najviše proučavan u literaturi. U okviru ove disertacije u eksperimentalnom delu lomovi ispitivanih epruveta nastaju upravo ovim oblikom razvoja

prslina, pa su u daljem tekstu prikazani parametri mehanike loma za ovaj oblik loma (u daljem tekstu „lom cepanjem“).

### 4.3 RAVNO STANJE DEFORMACIJA

Ravno stanje deformacija (u budućem delu teksta RSD) je takvo stanje gde je gradijent deformacije neposredno ispred vrha prsline vrlo strm, a deformacija je koncentrisana i time lako dolazi do razvoja prsline [14]. Na slici 4.4 dat je izgled plastične zone ispred vrha prsline na ploči konačne debljine  $B$ . Mala zona plastične deformacije u sredini odgovara uslovima RSD, dok se na bočnim površinama može videti plastična deformacija koja odgovara uslovima RSN. Uslov RSD je definisan debljinom epruvete koja se ispituje i o tome će biti više reči u daljem tekstu ovog poglavlja. Uslov je takav da debljina uzorka mora da bude dovoljna da se čitav noseći poprečni presek nalazi u RSD [24]. Opterećenje raste linearno do neke kritične vrednosti kada dolazi do krtog loma. U cilju uvođenja i definisanja plastične zone oko vrha prsline uvodi se Irvinova korekcija poluprečnika plastične zone kao najjednostavniji način da se unese mala plastičnosti u analizi ponašanja materijala oko vrha prsline [22]. Za RSN poznati su uslovi tečenja po nekom od kriterijuma (Treska, Von Mizes itd.), tačnije definisan je razlikom dva glavna napona oko vrha prsline. Više o tome se može naći u literaturama, tačnije u knjigama [14, 23, 24]. Ako je debljina ispitivanog uzorka takva da ne mogu da se uspostave ni uslovi RSN ni RSD, dolazi do prelaznog oblika loma koji ne odgovara u potpunosti ni jednom ni drugom definisanom specijalnom slučaju naponsko-deformacionog stanja.



Slika 4.4 Plastične zone ispred vrha prsline u ploči ili epruveti debljine  $B$ ; mala plastična deformacija u sredini odgovara RSD, velika plastična deformacija na bokovima odgovara RSN [22]

Generalno, uslov potreban za RSD se svodi na ispunjavanje zahteva „dovoljne debljine“. Ova zavisnost je prikazana relacijom (4.1) i propisana standardom [40], ukoliko se uslov RSD određuje preko kritične veličine faktora intenziteta napona  $K_{Ic}$  (o kome će biti reči) i napona tečenja  $\sigma_{YS}$ . Međutim, ceo problem se može zapravo predstaviti i pojednostaviti geometrijskom zavišnošću u cilju ispunjavanja uslova RSD, prikazane relacijama (4.2) za epruvete namenjene za savijanje, odnosno (4.3) za epruvete namenjene za zatezanje. Zavisnost se svodi na odnos karakterističnih dimenzija epruveta, odnosno (efektivne) širine epruvete ( $W$ ) i debljine epruvete ( $B$ ). Ova zavisnost je definisana gorepomenutim standardom [40].

$$B_{\min} \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (4.1)$$

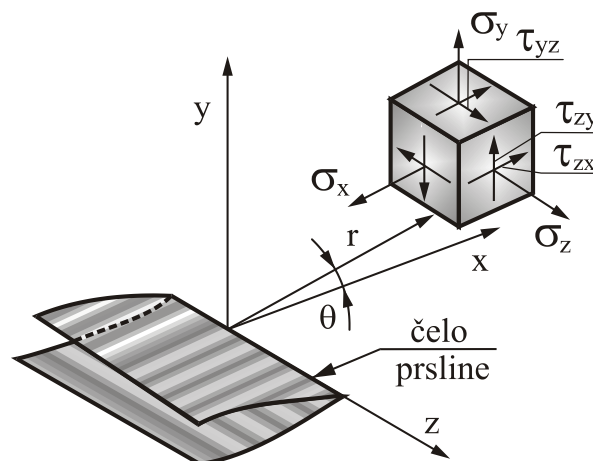
$$1 \leq W/B \leq 4 \quad \text{Za epruvete namenjene za savijanje} \quad (4.2)$$

$$2 \leq W/B \leq 4 \quad \text{Za epruvete namenjene za zatezanje} \quad (4.3)$$

#### 4.4 NAPONSKO STANJE OKO VRHA PRSLINE

Za određivanje komponentata napona i pomeranja oko vrha prsline koriste se funkcije kompleksne promenljive. One za različite oblike razvoja prsline imaju različite matematičke izraze [24]. Naponsko stanje u blizini vrha prsline u opštem slučaju (odnosno, za slučaj korišćenja Dekartovog koordinatnog sistema) prikazano je na slici 4.5. Za sva prethodno opisana tri oblika razvoja prsline problem se svodi na ravan problem teorije elastičnosti [24], naponi i pomeranja nisu funkcija koordinate  $z$  (preciznije, uvođenja pretpostavki da su napon i pomeranje po debljini zanemarljivi), pa se jednačine ravnoteže mogu predstaviti sledećim izrazima (4.4).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} \end{aligned} \quad (4.4)$$



Slika 4.5 Komponente napona ispred čela prsline u prostornom sistemu pravougljih koordinata [22]

#### 4.5 PARAMETER $K$ - FAKTOR INTENZITETA NAPONA

Na slici 4.5 mogu se videti komponente napona u blizini vrha prsline u prostornom sistemu pravougljih koordinata [23, 28]. Rešavanjem jednačina 4.4 i uvođenjem Erijeve funkcije napona [23] i uzimajući da je u pitanju problem ploče sa prslinom opterećena na zatezanje [14, 24], dobijaju se izrazi za komponente napona (4.5).

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_y &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_z &= \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) - RSD \\ 0 - RSN \end{cases} \\ \tau_{xy} &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{2\theta}{2} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Ovi izrazi koji opisuju komponente polja napona ispred čela prsline za  $r \ll a$ , u izotropnom linearno-elastičnom materijalu, se mogu izraziti u tenzorskom obliku (4.6).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (4.6)$$

gde je  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$  - faktor intenziteta napona, a  $f_{ij}(\theta)$  - funkcija ugla.

Ovo predstavlja poznati Vestergardov model [41] koji omogućuje povezivanje polja napona lokalizovanog oko čela (vrha) prsline sa globalnim graničnim uslovima.

Iz izraza 4.5 se može uočiti da će naponi na vrhu prsline težiti beskonačnosti kada  $r \rightarrow 0$  i da su oni proizvodi geometrijskog člana  $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$  i faktora  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ , koji je jednostavna funkcija udaljenog napona  $\sigma$  i dužine prsline  $a$ . Otuda faktor  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$  određuje veličinu singulariteta elastičnih napona u polju oko čela prsline. Ovaj faktor intenziteta napona za oblik I otvaranja prsline ima oblik dat izrazom (4.7).

$$K_I = C \sigma \sqrt{a} \quad (4.7)$$

i izražava se jedinici u  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$  ili  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ . Konstanta  $C$  (geometrijski faktor) za dvoosni slučaj zatezanja iznosi  $C = \pi^{1/2}$ .

Ukoliko je poznato polje napona  $\sigma_{ij}$  u okolini vrha prsline, tada se na osnovu prethodne jednačine faktor intenziteta napona može napisati u opštem obliku (4.8) [14]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sigma_{ij} \sqrt{2\pi r} f_{ij}(\theta) \right\} \quad (4.8)$$

ili ako se zna napon u ravni prsline  $\sigma_y(r, \theta=0)$  kao (4.9):

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sigma_y \sqrt{2\pi r} \right\} \quad (4.9)$$

Za oblike otvaranja prsline II i III dobijaju se slični zapisi. Faktor intenziteta napona u potpunosti opisuje polje napona, deformacija i pomeranja u okolini vrha prsline tj. u takozvanoj  $K$ -dominantnoj zoni. Faktor intenziteta napona predstavlja najznačajniji parametar u LEML.

## 4.6 PARAMETAR CTOD - OTVARANJE VRHA PRSLINE

Kao što je rečeno na početku poglavlja, za rešavanje problema u oblasti EPML uveden je parametar otvaranje vrha prsline (eng. *crack tip opening displacement*), odnosno CTOD. Vels [36] je u svom radu pokušao da izmeri vrednost  $K_{Ic}$  kod konstrukcionih čelika i primetio da je došlo do izraženog razdvajanja površina prsline pre loma, što je praćeno zatupljivanjem oštrog vrha prsline



usled plastične deformacije. Zatupljenje vrha prsline proporcionalno je žilavosti materijala i Vels je predložio uvođenje novog parametara naziva - otvaranje vrha prsline. Ovaj parametar predstavlja merilo žilavosti loma materijala. CTOD je našao veliku primenu, jer može jednostavno da se odredi, čak i u komplikovanim problemima.

U oblasti srazmerno malog tečenja (eng. *small scale yielding* – ssy), po modelu koji je predložio Irvin (slika 4.6a), može se uspostaviti veza između parametara CTOD i  $K_I$ . Za prslinu u neograničenoj ploči ravnomerno opterećenoj na jednoosno zatezanje i za uslove RSN, vrednost CTOD se određuje relacijom (4.10).

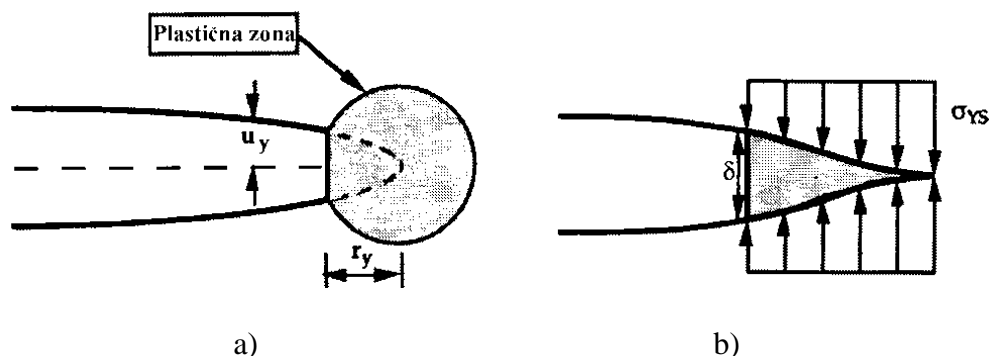
$$\delta_t = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} \quad (4.10)$$

U izrazu (4.10) CTOD je predstavljen oznakom  $\delta_t$ , a u literaturi se može nekad i naći obeležavanje  $\delta_5$  koji je uveo Švalbe po svojoj metodi merenja. Irvinova relacija (4.10) predstavlja veliko uprošćenje. Dagdejlov model trake popuštanja (eng. *strip yield model*) (slika 4.6b), koji uzima u obzir i pritisne napone koji dostižu i nivo napona tečenja, daje realnije rezultate [22], a CTOD se računa pomoću relacije (4.11).

$$\delta_t = \frac{8\sigma_{YSA}}{\pi E} \ln \sec \left( \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{YS}} \right) = \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} \left[ 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{YS}} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.11)$$

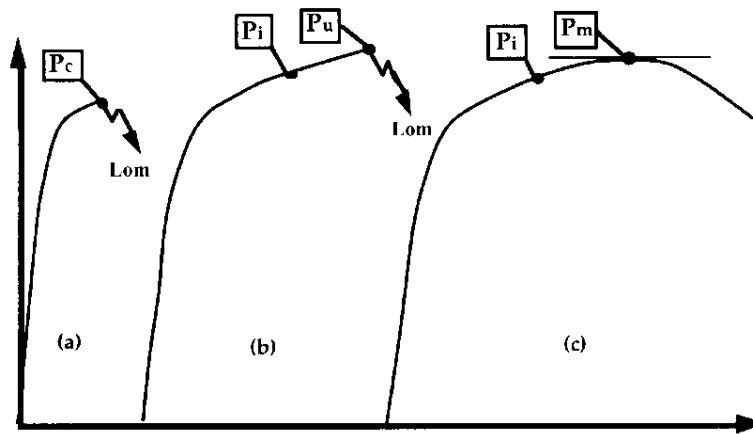
Za elastični-idealno plastični materijal (bez očvršćavanja) u uslovima RSN, izraz (4.11) se svodi na izraz (4.12). Parametar  $m$  je bezdimenzionalna veličina koja ima vrednost 1 za uslove RSN i idealno plastični materijal, dok se vrednost kreće u rasponu od 1 do 2,6 za materijal koji ojačava.

$$\delta_t = \frac{K_I^2}{m\sigma_{YS} E} = \frac{G}{m\sigma_{YS}} \quad (4.12)$$



Slika 4.6 Modeli otvaranja prsline: a) Irvinov model, b) Dagdejlov model trake popuštanja [22]

Za razliku od LEML, u domenu EPLM dostizanju kritične vrednosti parametara, npr. CTOD, može prethoditi stabilni rast prsline. U tom slučaju lom je žilav, a ne krt. Karakteristične zavisnosti sile i parametara otvaranja usta prsline (eng. *crack mouth opening displacement*, odnosno CMOD) su prikazane na slici 4.7. Ovaj parametar predstavlja zbir plastične i elastične deformacije i meri se na površini prsline ispitivanog uzorka. Nestabilni rast prsline se u eksperimentima manifestuje pojavom strmoglavih padova (eng. *pop-in*) na očitavanjima sa mernih uređaja. U ovom slučaju parametri se označavaju indeksom „c” (slika 4.7a) za  $\Delta a$  (prirast dužine prsline) manje od 0,2 mm, odnosno indeksom „u” (slika 4.7b) za  $\Delta a$  veće od 0,2 mm. Indeks „m” na slici 4.7c označava da je maksimalna sila prvi put dostignuta u punoj plastičnosti, a indeks „i” inicijaciju (stabilnog) rasta prsline, kao karakterističnu pojavu koja prethodi lomu [22]. Osim kriterijuma krtog loma, koji je uslovljen pojavom nestabilnog rasta prsline, moguća je analiza stabilnog rasta prsline pod dejstvom nekog opterećenja, odnosno uvođenja krive otpornosti materijala na rast prsline (tzv. R-kriva), koja se predstavlja kao zavisnost CTOD od prirasta dužine prsline  $\Delta a$ .



Slika 4.7 Tipične zavisnosti sila – CMOD [14, 22]

Osim uobičajenih definicija i merenja, u upotrebi se češće može naći Švalbeova definicija za CTOD, odnosno  $\delta_5$  [42], tačnije metod za direktno određivanje CTOD.

## 4.7 J-INTEGRAL

Parametar CTOD, iako ima široku primenu poseduje jednu manu, a to je nedostatak teorijske osnove. Principi LEML se mogu 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 javlja pri naponima koji su znatno ispod napona tečenja i u uslovima RSD. U slučaju RSN udeo plastične deformacije je veći, međutim, veličina plastične zone na vrhu prsline je i dalje zanemarljivo mala u odnosu na dužinu same prsline. U ovim uslovima se primenjuju izrazi modifikovane LEML, tzv. *R*-krive. Ukoliko je veličina plastične zone velika u odnosu na dužinu prsline, tada principi LEML više ne važe, već se moraju primeniti metode i principi EPML. Rajs je predložio upotrebu integrala nezavisnog od konture (oko vrha prsline) za karakterizaciju rasta prsline u nelinearno–elastičnom slučaju ponašanja materijala. Ovaj parametar je nazvan *J*-integral i definisan je izrazom (4.13).

$$J = \oint_S \left( W dy - \vec{T}_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (4.13)$$

U izrazu (4.13) figurišu se sledeće veličine:

*S* - proizvoljna zatvorena kontura integracije (u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu)

$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$  - gustina deformacijske energije ( $\sigma_{ij}$  i  $\varepsilon_{ij}$  predstavljaju tenzore napona i deformacije, respektivno)

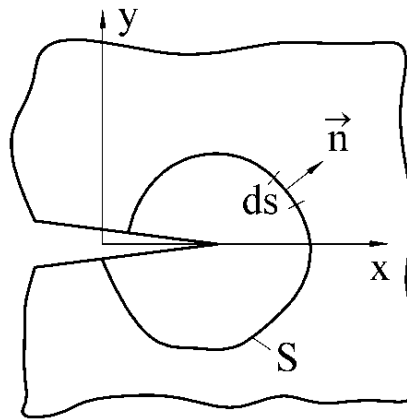
$\vec{T}_i = \sigma_{ij} \vec{n}_j$  - vektor zatezanja na konturi *S*

$\vec{u}_i$  - vektor pomeranja

$\vec{n}_j$  - jedinični vektor normalan na konturu *S*

*ds* - element dužine luka po krivoj *S*

*S* u prethodnoj relaciji predstavlja konturu koja obuhvata vrh prsline (slika 4.8) [22]. Integracija po ovoj konturi se vrši u pozitivnom matematičkom smeru. Ono što je važno u Rajsovoj studiji je to što je pokazao da je vrednost *J*-integrala nezavisna od izbora konture integracije [37]. U prethodnom delu teksta pomenuti vektor zatezanja predstavlja napon normalan na konturu integracije *S* (eng. *traction*).

Slika 4.8 Kontura integracije konturnog  $J$ -integrala oko vrha prsline [43]

Vrednost  $J$ -integrala ekvivalentna je brzini oslobađanja energije kroz konturu oko vrha prsline koja napreduje kroz nelinearno-elastičan materijal. Za linearno-elastičan materijal brzina oslobađanja energije tj. sila razvoja prsline se određuje izrazom (4.14), dok se za nelinearno-elastično ponašanje materijala može koristiti uopšteni izraz (4.15).

$$\mathcal{G} = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (4.14)$$

$$J(\equiv \mathcal{G}) = -\frac{d\Pi}{dA} = -\frac{d(U_a - W_p)}{dA} \quad (4.15)$$

$\Pi$  u izrazu (4.14) predstavlja potencijalnu energiju sistema, dok  $A$  predstavlja površinu prsline. U izrazu (4.15) veličina  $U_a$  predstavlja deformacionu energiju tela sa prsline, a  $W_p$  predstavlja rad svih spoljašnjih sila. Pored energetske prirode,  $J$ -integral predstavlja parametar intenziteta napona i karakteriše polje napona i deformacija u okolini vrha prsline.

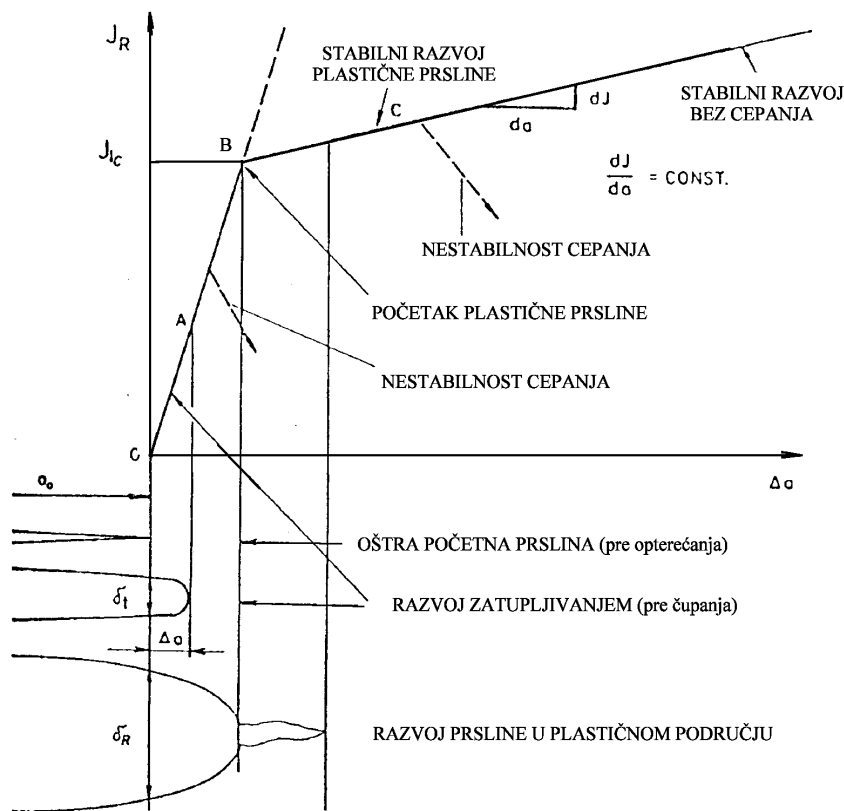
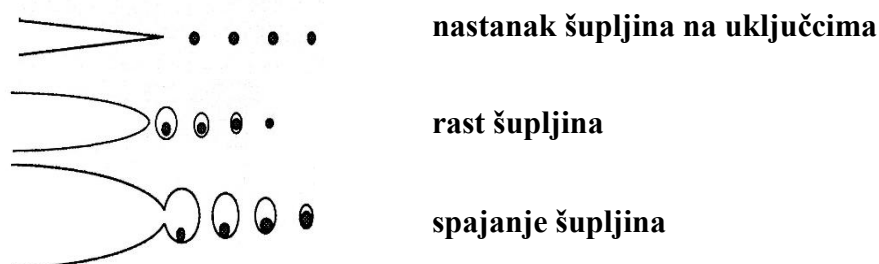
Sažeto,  $J$ -integral ima tri bitne odlike na kojima se zasniva njegova primena u mehanici loma, a to su:

1. Nezavisnost od putanje integracije, što omogućava jednostavno numeričko, analitičko ili eksperimentalno određivanje.
2. Mogućnost opisa elasto-plastičnog polja napona i deformacije oko vrha prsline, analogno ulozi faktora intenziteta napona u opisu odgovarajućih linearno-elastičnih polja.
3. Mogućnost identifikacije sa brzinom oslobađanja energije, što znači da se može tumačiti i kao energetski parametar.

## 4.8 $J$ -INTEGRAL PRIMENJEN U ANALIZI POČETKA RASTA PRSLINE

Pri stabilnom rastu prsline, ponašanje nekog elasto-plastičnog materijala može se opisati  $R$ -krivom, koja predstavlja zavisnost  $J-\Delta a$  (slika 4.9) gde  $\Delta a$  predstavlja priraštaj dužine prsline. Ova zavisnost,  $J-\Delta a$ , predstavlja zapravo otpornost materijala na rast prsline. Ako u telu postoji početna prsline sa oštrim vrhom, njen rast u uslovima plastičnog loma se odvija u više faza: početno zatupljivanje oštrog vrha i prividni porast dužine prsline, stabilni rast prsline i nestabilni rast prsline. U početnoj fazi prsline se samo otvara, što odgovara vrlo strmoj liniji zavisnosti  $J-\Delta a$ . U odgovarajućoj tački dijagrama, kada se dostigne opterećenje potrebno za stabilan rast prsline, nagib krive  $J-\Delta a$  se menja. To znači da je dalje otvaranje prsline povezano sa porastom dužine prsline. Sledeća faza u razvoju plastičnog loma je stabilni rast prsline. Ovo pojava zahteva porast opterećenja sve dok se ne dotigne opterećenje i dužina prsline koja uzrokuje da stabilni rast pređe u brzi nestabilni lom. Gore opisani proces može da se tumači i na mikromehaničkom nivou. Ovaj proces se sastoji od nastanka

šupljina na uključcima neposredno ispred vrha prsline, rastu šupljina i spajanju istih (slika 4.10). Ovakvo tumačenje predstavlja osnovu lokalnog pristupa u analizi žilavog loma. Poseban slučaj predstavlja određivanje parametra  $J_{Ic}$  koji se smatra svojstvom materijala i zapravo je ekvivalentan kritičnom faktoru intenziteta napona  $K_{Ic}$ . Jedna od uvedenih metoda je ispitivanje žilavosti loma žilavih materijala za koje je praktično nemoguće zadovoljiti uslov RSD i odrediti parametar  $K_{Ic}$ .

Slika 4.9. Dijagram  $J-\Delta a$  [22]

Slika 4.10 Grafički prikaz nastanka i rasta šupljina [22]

## 4.9 VEZA $J$ -INTEGRALA I CTOD

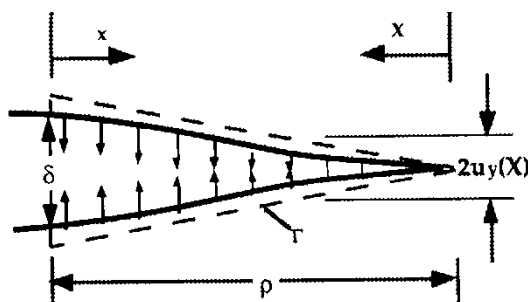
Ako se za putanju integracije izabere sam vrh prsline kao što je ilustrovano na slici 4.11,  $J$ -integral se računa uz pomoć relacije (4.16).

$$J = \int_{\Gamma} \sigma_{yy} \frac{\partial u_y}{\partial x} ds \quad (4.16)$$

Ostali članovi jednačine (4.13) postaju nule, uz uslov da je  $\rho \gg \delta$ , koji povlači sa sobom  $dy = 0$ , dok vektor zatezanja po  $\rho$  na konturi  $S$  ima samo  $y$  komponentu. Ako se koordinatni sistem pomeri u vrh zone trake popuštanja, tako da je  $X = \rho - x$ , dobija se relacija (4.17).

$$J = 2 \int_0^{\rho} \sigma_{yy}(X) \frac{\partial u_y(X)}{\partial X} dX = \int_0^{\delta} \sigma_{yy}(\delta) d\delta \quad (4.17)$$

gde je  $\delta = 2u_y(X=\rho)$  [22].



Slika 4.11 Kontura integracije oko vrha prsline [14]

Ako se u skladu sa modelom trake popuštanja uzme pretpostavka da je  $\sigma_{yy} = \sigma_{YS}$ , dobija se uprošćena relacija (4.18). Ova relacija važi za idealno plastični materijal i uslove RSN. Ako bi se uzelo u obzir i ojačanje materijala potrebna je određena korekcija prethodnog izraza uvođenjem koeficijenta  $m$  i time se dobija izraz (4.19). Koeficijent  $m$  zavisi od naponskog stanja (uslova RSN ili RSD) i ojačanja materijala u plastičnom području, kao što je definisano u izrazu (4.12).

$$J = \sigma_{YS} \delta_i \quad (4.18)$$

$$J = m \sigma_{YS} \delta_i \quad (4.19)$$

## 4.10 ODREĐIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA PO ASTM STANDARDU KAO MERA ŽILAVOSTI LOMA

Parametri mehanike loma se određuju prema standardima. Američko društvo za testiranje i materijale (*ASTM International*, ranije poznat kao *American Society for Testing and Materials*) pruža lepezu standarda za određivanje svakog parametra mehanike loma, poput  $K$ ,  $J$ -integrala, CTOD itd. Prvi ASTM koji se odnosi na mehaniku loma je bio je standard ASTM E399 „Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma pri ravnoj deformaciji metalnih materijala“ objavljen 1987. godine. Istovremeno je Birtanska institucija za standarde (*British Standard Institution – BSI*), objavila svoj standard na istom polju. Nešto kasnije je BSI objavio predlog standarda za određivanje otvaranja prsline, usvojen pod nazivom BS 5762, koji je kasnije objedinjen sa standardom BS 5447 i pretočen u BS 7448 [22]. No, ovde neće biti više mesta o istoriji i razvoju standarda za određivanje parametara mehanike loma. U ovom delu biće prikazani standardi i metode korišćene za određivanje parametara mehanike loma ispitivanjem uzoraka koji su prikazani u eksperimentalnom delu ove disertacije.

Relevantni standardi za određivanje parametara mehanike loma eksperimentalnim ispitivanjima, prvenstveno u ovoj disertaciji, su sledeći ASTM standardi:

- ASTM E399-12e3 - „Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials“ [40], koji pruža standardni postupak za određivanje faktora intenziteta napona loma u linearno-elastičnoj oblasti za oblik I otvaranja prsline
- ASTM E1820-16 - „Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness“ [1], koji pruža standardni postupak ispitivanja za merenje žilavosti loma
- ASTM E1290-07e3 – „Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement“ [44], koji pruža standardni postupak za određivanje goreopisanog parametra otvaranja vrha prsline (CTOD)

- ASTM E1921-17a – „Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range“ [45], koji pruža standardni postupak za određivanje određenih parametara  $K_{Ic}$ ,  $J_c$  feritnih čelika u području prelazne temperature

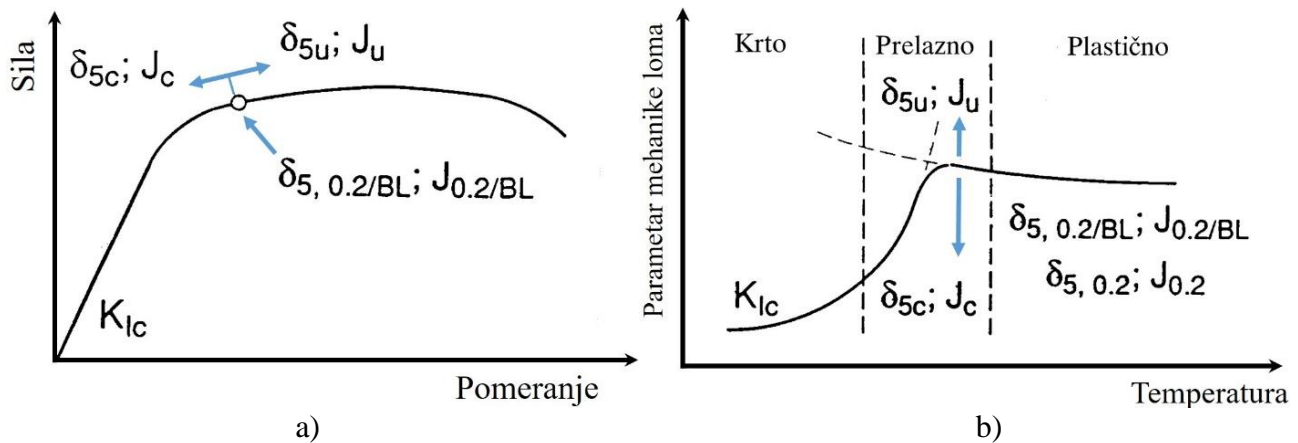
Postoje mnogobrojne zajedničke odlike eksperimentalnog određivanja parametara mehanike loma, posebno pri određivanju njihovih kritičnih vrednosti, što zapravo predstavlja svojstvo samog materijala. Tendencija objedinjavanja određenih standarda tokom godina opravdana je istim oblicima ispitivanih epruveta, sličnim postupcima ispitivanja i istom pristupu tumačenja dobijenih rezultata. Svi gore pomenuti standardi imaju određena preklapanja, recimo ASTM E1820 objedinjuje merenje žilavosti loma kao kritične vrednosti bilo kog od tri osnovna parametra mehanike loma ( $K_{Ic}$ ,  $CTOD_{Ic}$  ili  $J_c$ ) i na taj način je objedinio delimično standarde ASTM E399, E1290 i E1737, odnosno stariji standard za određivanje  $J_c$ . Standard ASTM E1921 obuhvata delove standarda E399 i E1820. Standardima ASTM E1921 i ASTM 1820 moguće je odrediti parametar  $J_c$  i oba pružaju metod za određivanje ovog parametara. Jedina razlika je što ASTM E1820 ima određene limite tj. uslove pod kojima se može odrediti  $J_c$ . Prilikom određivanja ovog parametra kod feritnih čelika mora se uzeti u obzir i uticaj veličine ispitivanih uzoraka na žilavost loma cepanjem (oblik I sa slike 4.3). Ovo je naročito izraženo u području prelazne temperature u čiju svrhu je i namenjena primena standarda ASTM E1921. Standard koji objedinjuje i pojašnjava terminologiju za sve ove standarde i koji je takođe korišćen kao referentni u ovoj disertaciji je ASTM E1823 [46].

U daljem tekstu ovog poglavlja biće prikazani određeni delovi standarda koji su poslužili za određivanje parametara određenih u eksperimentalom delu ove disertacije. Iz gore pomenutih standarda u eksperimentalnom delu ove studije određeni su parametri poput  $J_c$ , CMOD, a prikazan je i metod za merenje dužine zamorne prsline na ispitivanim uzorcima, napon loma i drugih merodavnih veličina.

#### **4.10.1 Izbor odgovarajućeg parametra mehanike loma i obrada rezultata ispitivanja**

Eksperimentalnom određivanju merodavnog parametra mehanike loma nužno prethodi njegova sama identifikacija u zavisnosti od vrste materijala i radnih uslova kojima je isti izložen. Za nestabilni lom merodavni parametri se mere u tački nestabilnosti ili u njenoj neposrednoj blizini, dok je za stabilni rast prsline potrebno odrediti krivu otpornosti, tj. promenu vrednosti  $J$  ili CTOD sa porastom prsline (odnosno  $\Delta a$ ). Nekad nije moguće pre ispitivanja oceniti da li će se lom epruvete odvijati nestabilno ili stabilno. Dijagramom sila-pomeranja na slici 4.12a pokazano je koji parametar mehanike loma treba uzeti za merodavan prilikom ispitivanja, uzimajući u obzir dijagram sila-pomeranje, pri čemu oblici ovih dijagrama zavise od materijala i dimenzija ispitivanog uzorka. U eksperimentalnom programu koji je deo ove disertacije, temperatura ispitivanja uzoraka takođe utiče na izbor merodavnog parametra mehanike loma, zbog prelaznog temperaturnog režima. Dijagram izbora merodavnog parametra mehanike loma u zavisnosti od temperature je prikazan na slici 4.12b.

U obe prethodno pomenute slike, indeks "0,2" se odnosi na zatupljivanje i rast prsline od 0,2 mm, dok "0.2/BL" na toliki rast posle zatupljivanja vrha prsline. Indeks "5" u označavanju parametra  $\delta$  (podsećanja radi, CTOD) pokazuje oznaku ovog parametra po Švalbeu pomenutom u poglavlju 4.6 glave 4 ove disertacije.

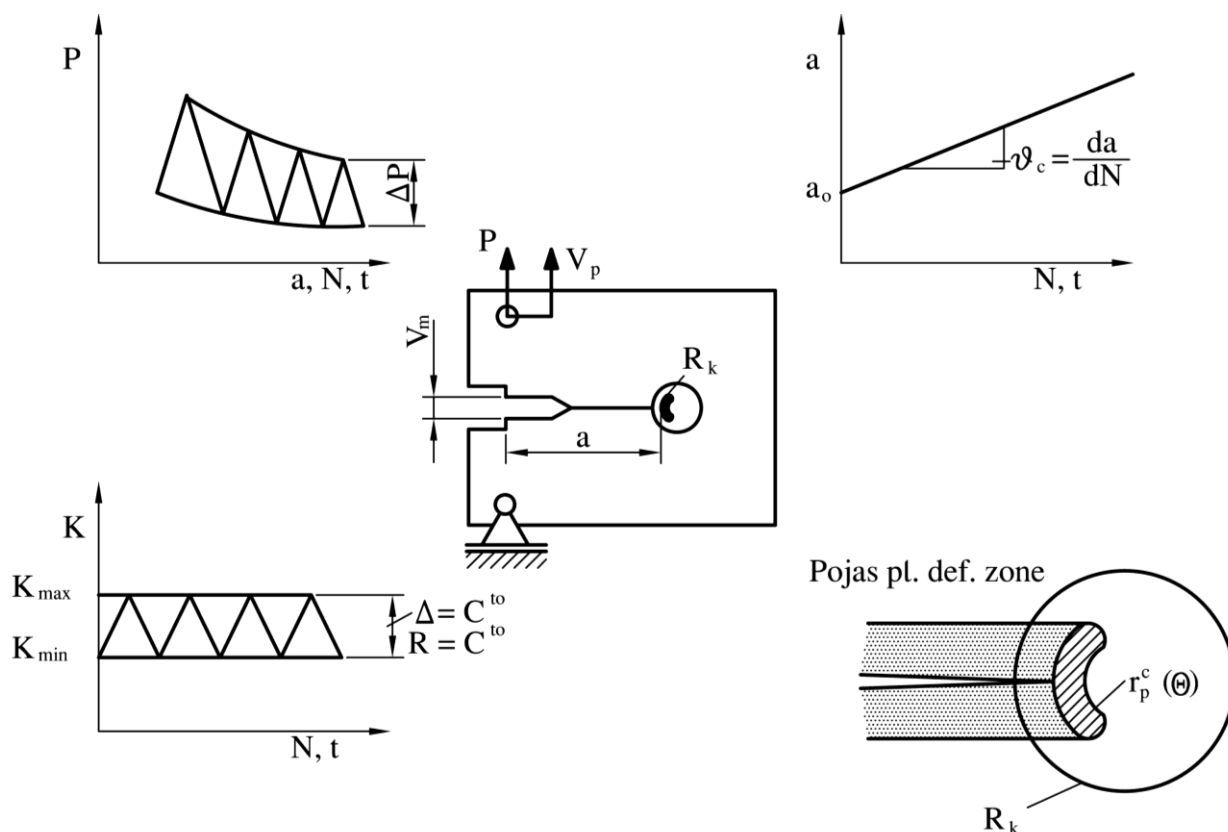


Slika 4.12 a) Izbor merodavnog parametra mehanike loma; b) Uticaj temperature na izbor merodavnog parametra mehanike loma [47, 48]

#### 4.10.2 Priprema C(T) uzoraka

U cilju određivanja parametara mehanike loma (kao mere žilavosti loma) na C(T) epruvetama korišćenim u ovoj disertaciji, potrebno je, pre samog ispitivanja, uneti zamornu prslinu u skladu sa preporukama odgovarajućih standarda [1, 40, 49]. Vrednost opsega  $\Delta K$  ili  $K$ -faktora utiče na veličinu plastične zone oko vrha prsline, kao i na samu veličinu prsline. Iz tog razloga potrebno je pratiti uputstva iz pomenutih standarda u cilju dobijanja merodavnih rezultata ispitivanja. Broj ciklusa zamaranja prilikom unosa inicijalne zamorne prsline zavisi od više faktora, poput veličine ispitivanih uzoraka, debljine istih itd. Uopšte uzev, preporuka za malu veličinu zamorne prsline je da broj ciklusa zamaranja bude u opsegu  $[10^4, 10^5]$  [50], ali gornja granična vrednost tog opsega za C(T) epruvete ide i do  $10^6$  ciklusa novijim preporukama ASTM E1820 [1]. Potrebna sila pri zamaranju C(T) epruveta, u cilju stvaranja zamorne prsline, je definisana gore pomenutim standardima. Zbir dužine mašinski unetog zareza i inicijalne zamorne prsline je tako definisan da je odnos  $a/W$  (odnos zbira mašinski unete prsline i zamorne prsline prema širini epruvete) treba biti u rasponu  $[0,45, 0,70]$  za određivanje  $J$ -integrala, dok je za određivanje parametra  $K_{Ic}$  taj raspon uži i konzervativniji  $[0,45, 0,55]$ . Smatra se da previsoka amplituda napona, a s tim u vezi premali broj ciklusa, neće dati dovoljno oštru prslinu, dok će sa premalom amplitudom i prevelikim brojem ciklusa potencijalno doći do strukturnih promena u samom materijalu [4], pa je potrebno biti oprezan prilikom izbora broja ciklusa i vrednosti sile.

U ovom poglavlju će u najkraćim crtama, iz akademskog ugla, biti objašnjem koncept i značaj opsega  $K$ -faktora i cilju stvaranja zamorne prsline. Koncept  $K$ -faktora predstavlja zapravo koncept linearno-elastične mehanike loma i primenjuje se u određivanju rasta prsline pri zamoru. Kao ilustracija procesa, na slici 4.13 može se videti prikaz unošenja zamorne prsline, a u ovom slučaju, inicijalne zamorne prsline pri konstantnoj vrednosti opsega  $K$ -faktora, odnosno  $\Delta K$ , na C(T) epruveti. Ovaj tip opterećenja se u eksploatacionim uslovima ne pojavljuje, a opterećenje se zadaje silom. Međutim, ovaj koncept je interesantan pri eksperimentalnim ispitivanjima i moguće ga je ostvariti na kompjuterski upravljanim pulzatorima, kao što je slučaj u ovoj disertaciji sa ispitivanim C(T)50, 100 i 200 epruvetama. Treba uočiti da nepromenljivost opsega  $\Delta K$  tokom rasta prsline ne znači i nepromenljivost opterećenja  $F(P)$  ili pomeranja  $V_p$ . Naprotiv, da bi se to ostvarilo opterećenje mora da se po određenoj zakonitosti smanjuje tokom rasta prsline [51].



Slika 4.13 Ilustracija rasta zamorne prsline pri konstantnom opsegu  $\Delta K = \text{const.}$  i uslovima ograničenog tečenja [43, 51]

Kako svaki ciklus zamora formira odgovarajuću plastičnu zonu ispred vrha prsline  $r_p^c(\theta)$ , što se može videti sa slike 4.13, sa rastom prsline iza njenog vrha ostaje pojas plastične deformacije materijala. Ukoliko je plastična zona  $r_p^c(\theta)$  istovremeno i unutar  $K$ -dominantne zone singulariteta  $R_k$ , ispunjen je uslov male zone tečenja  $r_p^c(\theta) < R_k$ , pa vrednost  $K$ -faktora za razmatrani ciklus zamora na jedinstven način opisuje polje napona na vrhu tekuće prsline. Brzina rasta prsline se može izraziti u obliku (4.20).

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, R) \quad (4.20)$$

gde je:  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  opseg  $K$ -faktora, dok je  $R = K_{\max}/K_{\min}$ , njegov odnos.

Veličina plastične zone zavisi samo od vrednosti  $K_{\max}$  i  $K_{\min}$  i na taj način se implicitno uzima u obzir uticaj plastične zone i pratećeg plastičnog pojasa na brzinu rasta prsline. Ukoliko  $K_{\max}$  i  $K_{\min}$  variraju tokom ciklusa zamora, brzina rasta za tekući ciklus može zavisiti i od nivoa opterećenja, nekom vrednošću  $\chi$ . U tom slučaju prethodni izraz (4.20) se dopunjuje, pa ima oblik (4.21).

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, R, \chi) \quad (4.21)$$

Kada je u pitanju uređaj za nanošenje zamorne prsline na ispitivani uzorak, bitno je da isti omogući ravnomeran raspored opterećenja po čitavoj debljini ispitivanog uzorka, u ovom slučaju C(T) epruvete. Oprema za nanošenje zamorne prsline mora biti takva da omogući jednaku raspodelu napona po debljini uzorka. Ako ovaj uslov nije ispunjen, razvoj prsline nije uniforman. Generalno je praksa da se unos zamorne prsline radi na pulzatoru.



Iz prethodnog dela teksta može se zaključiti da je rast prsline pri zamoru, u ovom slučaju inicijalne zamorne prsline, veoma složen proces koji zavisi od niza promenljivih kao što su, intenzitet efektivnog polja napona na vrhu prsline definisan  $K$ -faktorom, tip i oblik opterećenja, radna sredina, mehaničke i metalurške karakteristike materijala itd. Na ovaj način se mogu se odrediti i Parisovi koeficijenti, parametara mehanike loma pri zamornom opterećenju, a neki primeri se mogu naći u radovima i studijama [39, 43, 52]

### 4.10.3 Određivanje parametra $K_{Ic}$

Mera žilavost loma materijala u uslovima RSD se određuje se parametrom  $K_{Ic}$  čiji je pun naziv „kritična vrednost faktora intenziteta napona u uslovima RSD“. Žilavost loma u uslovima RSD predstavlja zapravo najmanju otpornost materijala na rast prsline. Ovaj parametar je moguće odrediti prema odgovarajućoj standardizovanoj proceduri ASTM E399 [40] ispitivanjem epruveta sa zarezom i zamornom prsline propisane dužine.

Za određivanje ovog parametra prema standardu mogu se koristiti:

- epruvete za savijanje silom u tri tačke tzv. Šarpi epruvete (SE(B))
- kompaktna epruveta za zatezanje C(T)
- kompaktna epruveta za zatezanje oblika diska DC(T)
- specijalni tip lučnih epruveta za savijanje zatezanjem A(T).

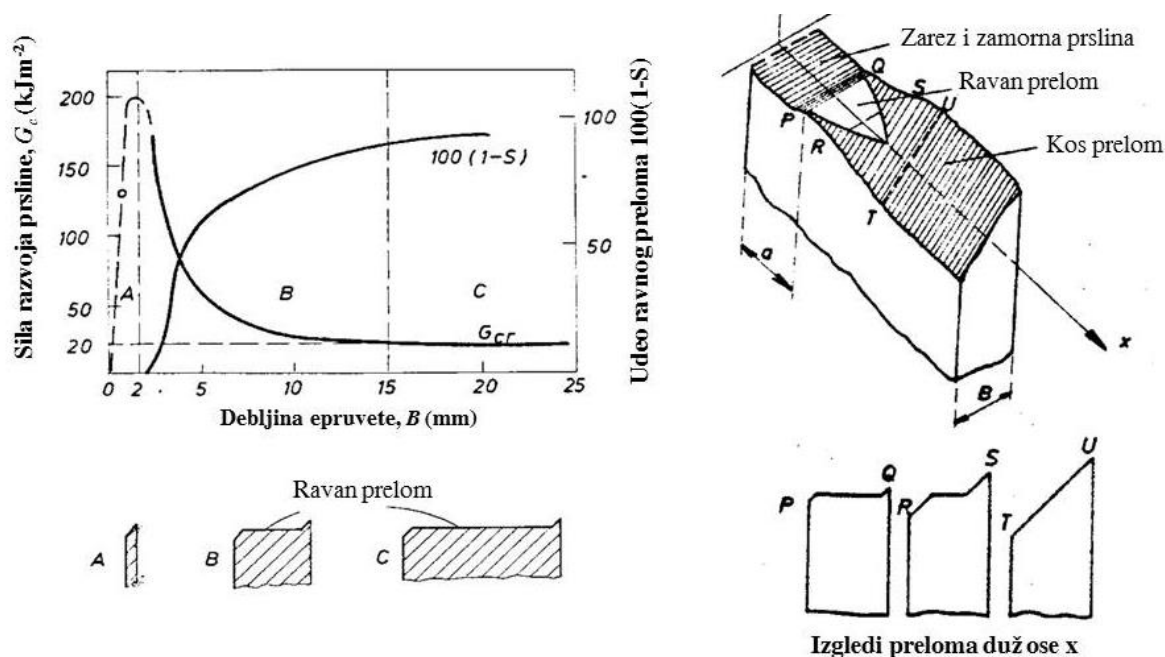
Prikaz svih ovih epruveta je dat u standardu [40]. Epruveta SE(B) se pokazala najjednostavnijom za ispitivanje i određivanje ovog parametra zbog načina opterećivanja (tačnije, savijanja) i široku primenu je našla u ispitivanju zavarenih spojeva [43, 52-54], ali C(T) epruveta omogućava značajnu uštedu materijala kao i primenu manje sile prilikom ispitivanja [14, 22]. Priprema epruveta za ispitivanje obuhvata i unos zamorne prsline prema propisanom postupku i uz ograničenja od kojih je najvažniji da faktor intenziteta napona pri zamaranju bude najviše  $0,8K_{Ic}$ .

Ključni uslov za uspostavljanje RSD je dovoljna debljina ispitivanog uzorka, koja je propisana ovim standardom i na osnovu podataka utvrđenih iskustveno se može predstaviti izrazom (4.1).

Navedeni izraz definiše minimalnu potrebnu debljinu epruvete za uspostavljanje RSD. Ukoliko uslovi RSD nisu ispunjeni, odnosno ako je debljina manja od  $B_{min}$ , materijal će pokazati veću otpornost na rast prsline. Podsećanja radi, zavisnost se može svesti i na geometrijsku prikazana relacijama (4.2) i (4.3) za tipove SE(B) i C(T) epruveta, respektivno.

Tri karakteristične oblasti na dijagramu zavisnosti žilavosti loma od debljine uzoraka mogu se videti na slici 4.14. Ove tri oblasti označene su sa A, B i C i one predstavljaju, respektivno:

- Oblast A (male debljine epruvete) - žilavost loma raste sa povećanjem debljine i uspostavljeno je RSN. Prelomna površina je kosa.
- Oblast B (srednje debljine epruvete) - žilavost loma se smanjuje sa povećanjem debljine, na bočnim površinama je uspostavljeno stanje RSN koje ka sredini prelazi u RSD, prelom je delimično ravan, a na bočnim površinama je kos.
- Oblast C (velike debljine epruvete) - uspostavlja se konstantna veličina žilavosti loma koja odgovara RSD, površina loma je pretežno ravna.



Slika 4.14 Promena žilavosti loma i udela ravnog preloma sa debljinom epruvete - šematski prikaz i izgled površine preloma pri prelaznom obliku loma [22, 23]

Postupak ispitivanja prema standardu ASTM E399 u cilju dobijanja parametra  $K_{Ic}$  je sledeći:

- Epruveta se kvazi-statički opterećuje do loma, brzinom od 0,55 do 2,75 MPa·m/s.
- Beleži se zavisnost sila - CMOD. Sila se direktno očitava sa kidalice, a CMOD meri posebnim uređajima (čiji je postupak prikazan poglavlju 4.10.5).
- Izračunava se  $K_Q$  prema formulama datim u prilogu, pri čemu se koristi sila  $P_Q$  koja se određuje sa dijagrama sila – CMOD. Za kompaktnu epruvetu C(T),  $K_Q$  se izračunava korišćenjem izraza (4.22).

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{\sqrt{BB_N} \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.22)$$

gde je

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.866 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^6\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

$P_Q$  – sila očitana sa dijagrama

$B$  – debljina epruvete

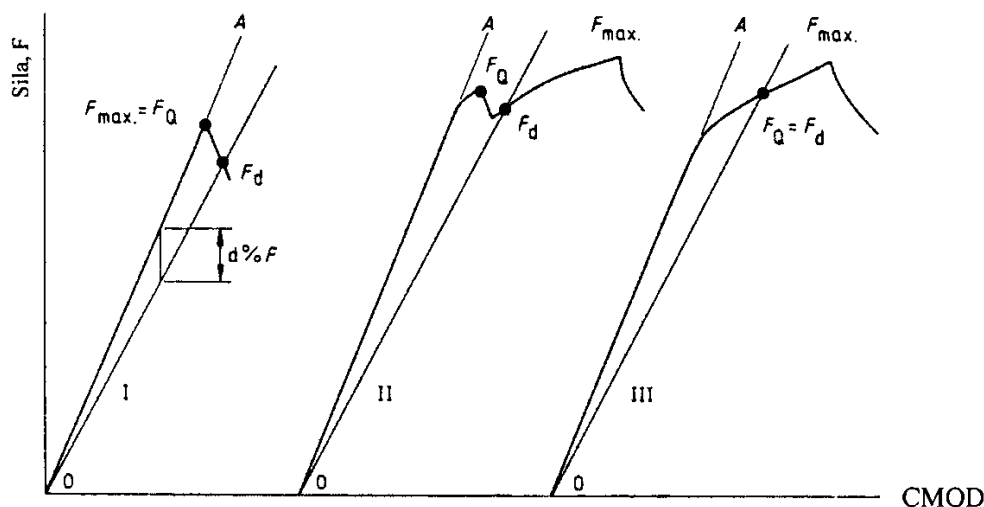
$B_N$  – neto debljina C(T) epruvete

$W$  – efektivna širina epruvete

$a$  – dužina prsline

- Nakon završetka ispitivanja, proveravaju se uslovi koji treba da budu ispunjeni da bi dobijeni rezultat za  $K_Q$  bio važeća vrednost žilavosti loma, a to su:
  - 1) Uslov RSD predstavljen izrazom (4.1)
  - 2)  $P_{max} \leq 1,1P_Q$ , što predstavlja uslov male plastične deformacije ispred vrha prsline.

U zavisnosti od osobina materijala, moguća su tri tipa dijagrama sila – CMOD koja se mogu dobiti ispitivanjem (slika 4.15) i oni diktiraju načine određivanja  $P_{max}$  i  $P_Q$  (na slici  $F_{max}$  i  $F_Q$ ), a ove veličine određuju se konstruisanjem odgovarajuće sečice (sekante) na dobijenom dijagramu [40].



Slika 4.15 Dijagrami sila - CMOD kod važećeg ispitivanja [40]

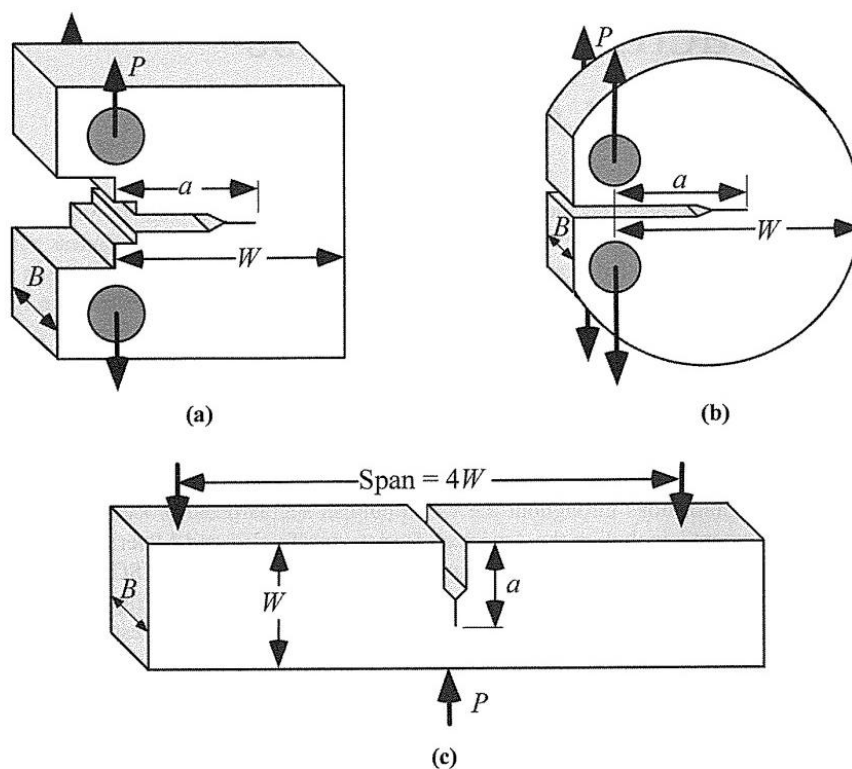
Navedeni uslovi čine ispitivanje žilavosti loma veoma složenim. Uprkos direktnom merenju parametra  $K_{Ic}$  po definiciji, na konačni rezultat utiče nekoliko faktora. Greške mogu da biti do 3% pri ispitivanju (uticaj merenja, kalibracije, pozicioniranje epruvete) i do 5% pri očitavanju sile  $P_Q$ . Najveći uticaj može da izazove greška u merenju dužine prsline i do 3% što može da proizvede ukupnu grešku veću od 10% [22]. Prilikom određivanja ovog parametra, ali i drugih parametara, za merenje dužina prsline mogu se koristiti i stereometrijske metode merenja, pored klasičnih mernih traka, ali kao i svaka metoda ima svoja ograničenja i takođe su moguće greške, naročito ako su deformacije male [55-57]. Ovaj parametar je još teže odrediti kod feritnih čelika, zbog svojih duktilnih karakteristika, ali i zbog savremenih metoda proizvodnje, legirajućih elemenata itd.

Parametar  $K_{Ic}$  moguće je odrediti i indirektno preko parametra  $J_{Ic}$  po definisanom standardu [1] takođe ispitivanjem Šarpi epruveta. Primer jednog takvog postupka može se videti u radu [58].

#### 4.10.4 Određivanje parametra $J_c$

Po standardima [1, 45]  $J_c$  predstavlja vrednost  $J$ -integrala (tj. meru žilavosti loma materijala) usled nestabilnog rasta prsline kojoj prethodi neznatan stabilan rast iste. Ovaj parametar je moguće odrediti ispitivanjem C(T), DC(T) i SE(B) uzoraka i za svaki od tipova epruveta postoji standardom definisan postupak. Prikaz svih ovih epruveta koji se najčešće koriste pri određivanju ovog parametra dat je na slici 4.16, a oblici i drugih epruveta mogu se naći u odgovarajućim standardima poput [1, 40]. Standardima su definisane i potrebne dimenzije epruvete, tolerancije površina, oblici zarez, način unosa inicijalne zamorne prsline, oblici istih, način opterećenja tokom izvođenja testa itd.

Vrednost ovog parametra u značajnoj meri zavisi od veličine ispitivanog uzorka, naročito na niskim temperaturama, konkretno u području prelazne temperature. Osnovna procedura za određivanje ovog parametra uključuje konstruisanje dijagrama sila-pomeranje za svaku ispitivanu epruvetu. Konkretno u ovoj disertaciji, pošto su ispitivane kompaktne C(T) epruvete, zahteva se konstruisanje dijagrama sila-pomeranje napadne tačke. Crtanje ovih dijagrama se radi na računaru uz pomoć adekvatnih softvera koji se povezuju sa mašinom za ispitivanje. C(T) epruveta je opterećenja na zatezanje kao na slici 4.16a. U prvom delu opterećivanja ispitivani uzorak se nalazi u oblasti elastične deformacije, kasnije sa porastom opterećenja ulazi se u zonu plastične. Nakon neznatnog stabilnog rasta prsline dolazi do loma cepanjem. Zato je potrebno odrediti elastičnu i plastičnu komponentnu  $J$ -integrala loma cepanjem (vrednost  $J_c$ ) i ovaj postupak je prikazan u daljem delu teksta za ispitivani C(T) uzorak.



Slika 4.16 Prikaz nekih standardnih epruveta za ispitivanje po standardu ASTM E1820; a) C(T) uzorak, b) DC(T) uzorak, c) SE(B) uzorak [14]

Određivanje vrednosti  $J$ -integrala usled loma cepanjem se obavlja sabiranjem elastične i plastične komponente relacijom (4.23).

$$J = J_e + J_p \quad (4.23)$$

Elastična komponenta  $J$ -integrala se može izračunati izrazom (4.24).

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2) K_e^2}{E} \quad (4.24)$$

gde se  $K_e$  računa sledećom relacijom (4.25).

$$K_e = \left[ P / (BB_N W)^{1/2} \right] \cdot f(a_0/W) \quad (4.25)$$

gde je:

$$f(a_0/W) = \frac{(2 + a_0/W)}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \left[ 0.866 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)^4 \right]$$

Pri čemu su:

- $W$  – efektivna širina C(T) epruvete
- $a_0$  – inicijalna dužina zamorne prsline
- $B$  – debljina epruvete
- $B_N$  – neto debljina C(T) epruvete
- $P$  – sila

Opisi i definicije ovih veličina su detaljno objašnjeni u standardima poput [1, 45, 46]. Plastična komponenta se računa i određuje prema izrazu (4.26).

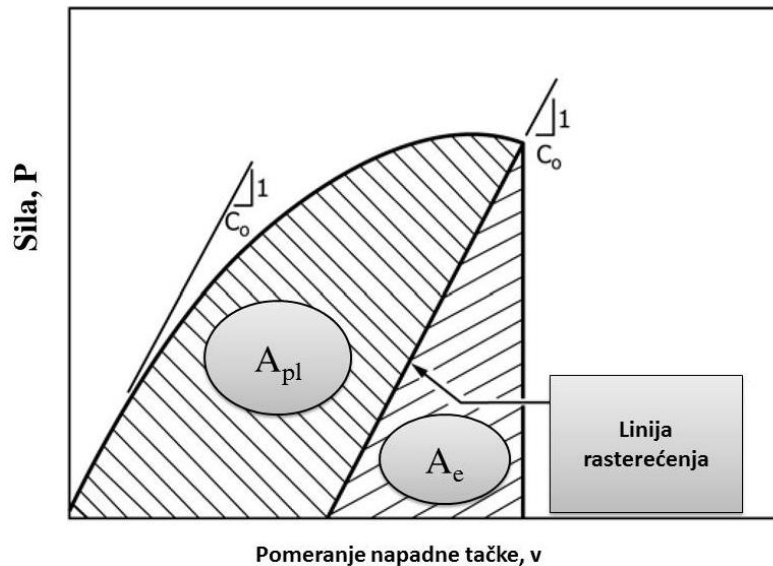
$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_0} \quad (4.26)$$

Pri čemu su:

$b_0$  - inicijalni ligament C(T) epruvete ( $W - a_0$ )

$\eta$  -  $2 + 0.522b_0 / W$ , koji predstavlja geometrijski koeficijent

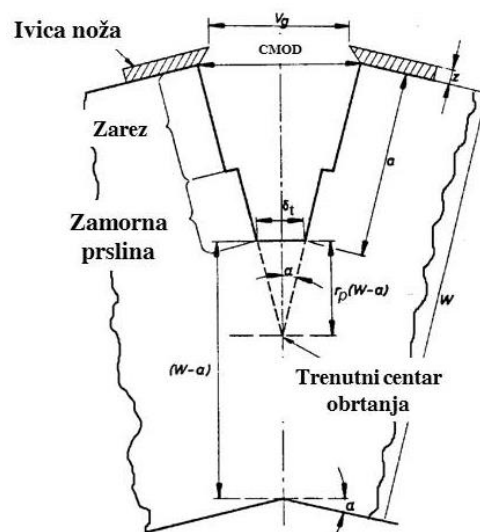
$A_{pl}$  – površina prikazana na slici 4.17.



Slika 4.17 Definicija površine  $A_{pl}$  potrebna za izračunavanje  $J_{pl}$

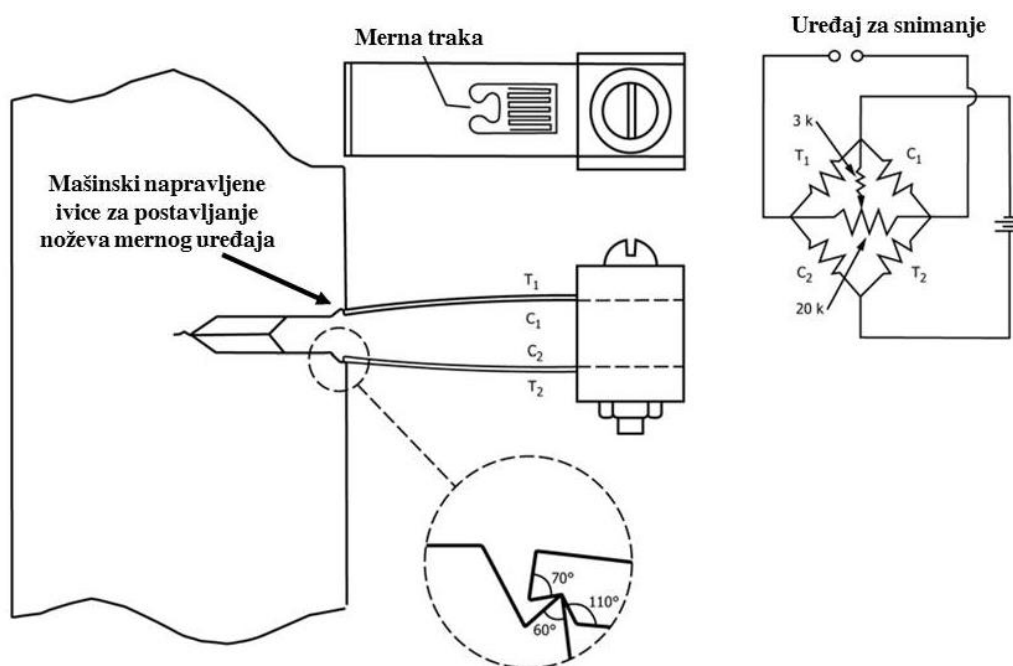
#### 4.10.5 Određivanje parametra CMOD

Parametar CMOD se najčešće sreće u konstruisanju dijagrama zavisnosti sile i nekog od pomeranja [1, 40, 45]. Meri se na slobodnoj površini prsline na mestu maksimalnog otvaranja (slika 4.18) i predstavlja sumu totalne deformacije, elastične i plastične [40]. Ovaj parametar predstavlja jednu od dve pozicije u slučaju merenja parametra otvaranje prsline (eng. *crack opening displacement* – COD).



Slika 4.18 Grafički prikaz parametra CMOD [22]

Na slici 4.19 je prikazana merna instrumentacija tj. šema postavljanja mernih uređaja (preciznije, ekstenzometara) potrebna za merenje ovog parametara prema adekvatnim standardima [1, 40]. Merač se postavlja na oštrice na epruveti ili na noževe sa slike 4.18. Preporučuje se konstrukcija merača sa Vinstonovim mostom i mernim trakama. CMOD se koristi za određivanje plastične komponente  $J$ -integrala i direktno je proporcionalan njemu, kao i geometrijski koeficijent  $\eta$  koji za određene tipove ispitivanih epruveta ima različite vrednosti. CMOD daje mnogo preciznije rezultate od pomeranja napadne tačke prilikom određivanja i procene dužine prsline. Kod ispitivanja kompaktnih C(T) epruveta, parametar CMOD može da bude jednak pomeranju napadne tačke (eng. *load-line displacement*), tj. postavka merne aparature može da bude identična za određivanje ova dva parametra [14], kao što je slučaj u ovoj disertaciji. Ovaj parametar se dobija direktno očitavanjem sa mernog instrumenta i prikazuje obično formi u zavisnosti od sile, konkretno za C(T) epruvete, dobijen preko računara i uz pomoć ekstenzometra. Koristi se u krtim lomovima epruveta koji imaju veoma malu plastičnu deformaciju, kao što je slučaj ispitivanja C(T) uzoraka u ovoj studiji.



Slika 4.19 Merna instrumentacija i postavljanje ekstenzometra za merenje parametra CMOD sa Vinstonovim mostom prema [1, 40]

#### 4.10.6 Merenje inicijalne (početne) dužine zamorne prsline nakon loma kod C(T) epruveta

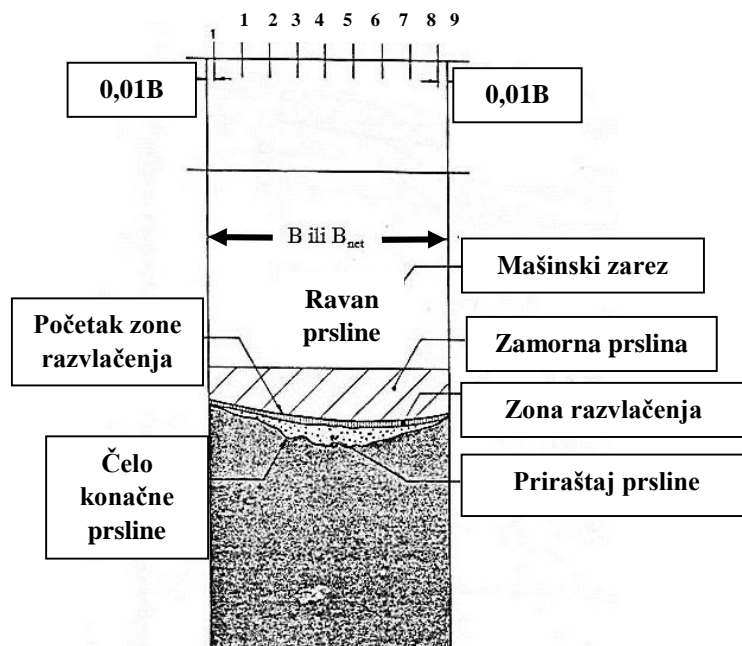
ASTM standardima [1, 45] definisano je merenje početne ili inicijalne dužine zamorne prsline  $a_0$ . Zamorna prsline unosi se u zarezu C(T) epruvete zamornim opterećenjem čiji je postupak takođe dat u ovim standardima. To zamorno opterećenje se definiše preko promene sile koja se izražava preko  $\Delta K$ . Konkretno, u ovoj disertaciji u jednoj seriji ispitivanja na nekim epruvetama zamorne prsline  $a_0$  su napravljene sa višom, a na drugima sa nižom vrednošću  $\Delta K$ . O tome će biti više reči u prikazu eksperimentalnog dela. Kod C(T) uzoraka, početna dužina prsline  $a_0$  se određuje iz površi ravni prsline ( $A_0$ ) u području ograničenom bočnim ivicama uzorka ilustrovano na slici 3.18.

Početna dužina prsline  $a_0$  C(T) uzoraka se izračunava na 2 načina:

- za uzorke bez bočnih zarezova prema  $a_0 = A_0/B$
- za uzorke sa bočnim zarezima prema  $a_0 = A_0/B_{net}$ .

Nakon loma C(T) epruvete, potrebno je izmeriti dužinu prsline po debljini uzorka u najmanje 9 ekvidistantnih mernih tačaka postavljenih duž fronta prsline. Prva izmerena vrednost  $a_{0,1}$  i poslednja

izmerena vrednost  $a_{0,m}$  određuju se u mernim tačkama  $0,01B$ , odnosno  $0,99B$  debljine uzoraka, respektivno, odnosno  $B_{net}$  ukoliko uzorak ima bočne zareze. Za SE(B) uzorke postupak je sličan, osim što se u njihovom slučaju za određivanje odstojanja ne koristi linija opterećenja, kao kod C(T) uzoraka. Ove metode su prikazane detaljnije u [59].



Slika 4.20 Izgled (primer) preloma C(T) epruvete i određivanje karakretističnih veličina: prikaz mernih mesta za određivanje  $a_0$

Nakon merenja barem 9 tačaka, pristupa se računanju srednje vrednosti prema prema izrazu (4.27). Vrednosti na krajevima  $0,01$  i  $0,99$  debljine epruveta se sabiraju, pa dele sa dva, dok se vrednosti između njih sabiraju i dele sa preostalim brojem mernih mesta.

$$a_0 = \frac{\frac{a_{01} + a_{0m}}{2} + \sum_{i=2}^{m-1} a_{0i}}{m-1} \quad (4.27)$$

#### 4.10.7 Napon loma C(T) epruveta

Poznato je da je mesto začetka loma lokalizovano za feritne materijale, pa je potrebno izračunati napon loma na tom mestu. Napon loma  $\sigma_f$  je nestandardna veličina čije je rešenje prvi uveo Švalbe preko proračuna za normalni napon [60] i jedna prva uticajna studija u kojoj je primenjen ovaj metod proračuna napona loma je studija Heerensa [61]. Ovim je moguće opisati napon na vrhu oštre prsline, međutim ako uzmemo u obzir da se lom cepanjem odvija nakon zatupljenja oštre prsline, za ovaj napon (maksimalni napon na vrhu prsline) se smatra da se javlja nešto ispred vrha prsline, na nekom normalizovanom rastojanju  $A_m$  koje iznosi  $2,7 \cdot 10^{-3}$ . Rešenje koje je predložio Shwalbe [60] važi za  $A > A_m$ , pri čemu  $A$  računa prema izrazu (4.28). Za uzorke u kojima je normalizovano rastojanje  $A < A_m$  napon loma se računa kao da je  $A = 2,7 \cdot 10^{-3}$ . Pojašnjenje ovih izraza je sledeće: u području između vrha prsline i mesta maksimalnog napona ( $A < A_m$ ) uzima se da normalni napon odgovara maksimalnoj vrednosti, pa će rezultati biti precenjeni, dok je iza tog mesta (dakle,  $A > A_m$ ) saglasnost zadovoljavajuća [61-63].

$$A = \frac{r_c - \delta_c / 2}{\left(K_c / R_{p0,2}\right)^2} \quad (4.28)$$

$r_c$  predstavlja poluprečnik zaobljenja vrha prsline, dok su ostale veličine poznate. Indeks „C” označava lom cepanjem.

Faktor intenziteta napona  $K_c$  se može izračunati preko vrednosti  $J_c$  relacijom (4.29), kao i za određivanje vrednosti  $\delta_c$  relacijom (4.30). U izrazu  $\sigma_F$  predstavlja napon ojačanja, koji predstavlja srednju vrednost zbira napona tečenja  $R_{p0,2}$  i zatezne čvrstoće materijala  $R_m$ . U izrazu ovom izrazu  $d_n$  predstavlja faktor proporcionalnosti.

$$K_c = \left[ \frac{J_c \cdot E}{(1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (4.29)$$

$$\delta_c = \frac{d_n \cdot J_c}{\sigma_F} \quad (4.30)$$

Izrazi za proračun napona loma za goreopisane oblasti iza mesta maksimalanog napona ( $A > A_m$ ) i između vrha prsline i tog mesta ( $A > A_m$ ) predstavljeni su izrazima (4.31) i (4.32), respektivno.

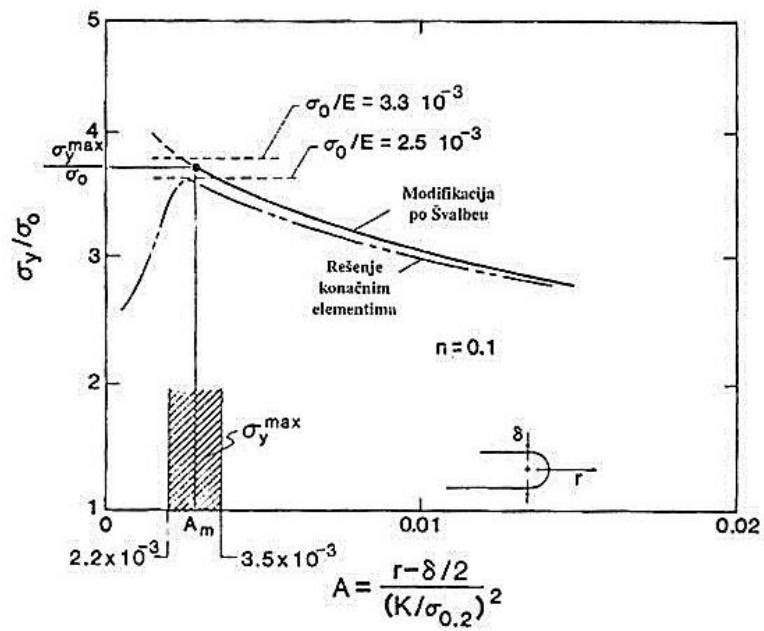
$$\sigma_f = \left[ \frac{0,3}{A+1} \left( \frac{0,04}{A} \right)^{\frac{n}{n+1}} \right] \cdot R_{p0,2} \quad (4.31)$$

$$\sigma_f = \sigma_y^{\max} = \left[ \frac{0,3}{A_m+1} \left( \frac{0,04}{A_m} \right)^{\frac{n}{n+1}} \right] \cdot R_{p0,2} \quad (4.32)$$

U ovim izrazima  $n$  predstavlja koeficijent ojačanja. Izrazi za proračun napona loma razvijeni su za uslove izotopne, homogene i ravne deformacije, male plastične deformacije pri lomu i u uslovima kada je rast prsline zanemarljiv. Uslovi u kojima je moguće izračunati ovaj napon prikazani detaljnije u radovima [61-63].

Na slici 4.21 može se videti raspored normalnih napona normalizovanih naponom ojačanja uz pomoć prethodnih izraza ispred vrha prsline u zavisnosti od normalizovanog rastojanja  $A$  Švalbeovim rešenjem i rešenjem konačnim elementima .





Slika 4.21 Raspored normalnih napona rešenjima normlizovanim naponom ojačanja ispred vrha prlsine u zavisnosti od normalizovanog rastojanja  $A$  na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$ ; poređenje dve metode, po Švalbeu i po metodi konačnih elemenata [61, 62]

## 5 OSNOVNI POJMOVI STATISTIKE I TEORIJE VEROVATNOĆE

Statistika kao naučna disciplina danas predstavlja sastavni deo aktivnosti obrade naučnih, obrazovnih, privrednih i mnogih drugih informacija ili podataka. Statistika je naučni metod koji se koristi za prikupljanje, prikazivanje, analizu i tumačenje različitih vrsta podataka. Uopšteno, statistika se odnosi na skup numeričkih podataka o stanju posmatrane pojave [64]. Poreklo reči statistika vodi od latinske reči *status*, što označava stanje, kao i status – država. Prvi put reč statistika se pojavljuje u prvoj polovini 18. veka u radovima Gotfrida Ačenvala, profesora Univerziteta u Getingenu zbog čega se smatra ocem statistike [64]. Poznavanje izvora i kvaliteta dobijenih podataka, njihovih karakteristika i pravilno tumačenje karakteristika su od izuzetne važnosti u svrhu dobijanja kvalitetnih informacija na osnovu kojih će se donositi adekvatne odluke u vezi sa njima. Ako se do podataka dolazi poštujući određene planske, ili zakonski propisane preporuke (u konkretnom primeru ovog doktorata, to su rezultati nekih ispitivanja), prikupljeni podaci smatraju se statističkim, pa je s toga njihovo pretvaranje u informacije moguće upotrebom nekih od statističkih metoda. Uopšteno se može reći da je svrha primene statističkih metoda donošenje zaključaka o karakteristikama određenih posmatranih pojava, ispitivanje različitih pretpostavki, procena karakterističnih veličina, predviđanje stanja i nivoa pojava i dr. Statistika omogućava i pruža mogućnost tumačenja podataka sa razumevanjem i ima za cilj dobijanje odgovora na značajna ili tražena pitanja u konkretnim studijama. Uz to pruža i mogućnost donošenje pouzdanih zaključaka na osnovu dobijenih rezultata, odnosno, numeričkim dokazima.

U ovom poglavlju će biti reči o nekim osnovnim pojmovima statistike i teorije verovatnoće koje se su se koristile u opisivanju i tumačenju studija koje se tiču ispitivanja feritnih čelika u oblasti prelazne temperature. Ova naučna disciplina je postala neizbežna u opisivanju lomova u prelaznom režimu temperatura zbog prirode rasipanja rezultata traženih parametara. Ovo poglavlje pruža elementarnu teorijsku osnovu sa ciljem razumevanja sledećih poglavlja ovog doktorata.

Statističke metode se koriste sa ciljem matematičkog opisivanja zakona raspodele slučajne promenljive. U većini slučajeva, verovatnoće koja se traže u inženjerskim ili naučnim studijama su funkcija verovatnoće otkaza, loma ili funkcija pouzdanosti. Ove funkcije mogu se ticati pouzdanosti i otkaza mašinskih sistema [65-67], ili pouzdanost elektronskih, telekomunikacionih i informacionih sistema [68] itd., tačnije njihovih parametara. U konkretnom slučaju izučavanja ponašanja feritnih čelika u prelaznom temperaturnom režimu promenljive čiji se zakon raspodele određuje su parametri loma koji se dobijaju eksperimentalnim istraživanjima. U ovoj glavi neće biti prikazani referentni radovi sa ovom temom i metodama statističke obrade, već samo osnovni pojmovi statistike i statističke metodologije obrade podataka u cilju razumevanja pregledne referentne literature u sledećoj glavi ove disertacije i statističke metode korišćene u eksperimentalnom delu ove disertacije.

### 5.1 STATISTIČKA ANALIZA

U postupku statističke analize mogu se izdvojiti sledeće faze:

- statističko posmatranje
- sređivanje podataka
- obrada i analiza rezultata

Statističko posmatranje se sastoji u planskom prikupljanju podataka o ispitanim statističkim jedinicama putem anketa, posmatranja, eksperimentalnim merenjima itd. U inženjerskim studijama i tehničkim naučnim studijama postupak je isti [69] tako da se, na primer, iz slučajnog uzorka obima  $n$  dobija niz od  $n$  vrednosti ( $X_i, i = 1, \dots, n$ ). Sređivanje podataka se sastoji u njihovom tabelarnom i grafičkom prikazivanju, u cilju dobijanje neke predstavu o raspodeli posmatrane slučajne veličine. Prvi korak pri tome je uređivanje po veličini dobijenog niza od  $n$  brojeva, a rezultat je uređen niz koji se u statistici zove varijacioni niz. Obrada i analiza rezultata obuhvata matematičku obradu sređenih podataka i njihovo tumačenje.

## 5.2 OSNOVNI STATISTIČKI POJMOVI

Predmeti istraživanja savremene statistike su masovne pojave koje pokazuju varijabilitet od jednog do drugog slučaja njihovog pojavljivanja. Na varijabilitet pojave utiče veliki broj faktora, pri čemu svaki od faktora može uticati individualno ili može imati združeni uticaj sa drugim faktorima. U okviru različitih naučnih disciplina varijabilitet posmatranih pojava se analizira primenom adekvatne statističke metodologije. Primenom odgovarajuće metodologije stiče se uvid u ponašanje ispitivanih pojava, uočava njihova povezanost sa drugim varijabilnim pojavama, uočavaju tendencije u njihovom razvoju ili predviđanje njihovih budućih vrednosti. Primena statističke metodologije zahteva pre svega poznavanje statističke terminologije i poznavanje i razumevanje principa statističke analize.

### 5.2.1 Statistički skup

Statistički skup predstavlja skup jedinica na osnovu kojih se ispituje jedno ili više svojstava (varijabli, obeležja, osobina, karakteristika), koja su od jedinice do jedinice promenljiva [64, 69]. Prema obimu, statistički skupovi se mogu podeliti na konačne i beskonačne. Statistički skupovi takođe mogu biti realni i zamišljeni ili hipotetički.

Osnovni skup (ciljna populacija) je skup podataka svih jedinica (elemenata) posmatranja čije karakteristike ispituujemo. Za definisanje osnovnog skupa potrebno je da bude poznata svrha neke analize. Osnovni skupovi se definišu pojmovno, prostorno i vremenski. Pojmovnom definicijom skupa utvrđuje se pripadnost skupu s obzirom na pojam jedinice. Prostornom definicijom označava se prostor kom pripadaju sve jedinice osnovnog skupa. Vremenskom definicijom određuje se vremenski interval ili vremenska tačka za koju su vezane sve jedinice nekog skupa. Broj jedinica osnovnog skupa naziva se veličina ili obim osnovnog skupa.

Uzorak je deo izabran iz osnovnog skupa u svrhu izvođenja statističke analize.

### 5.2.2 Jedinice i obeležja posmatranja

Jedinica posmatranja osnovnog skupa ili uzorka je određeni subjekat ili objekat o kojem se prikupljaju podaci (informacije ili u konkretnom slučaju rezultati ispitivanja), odnosno na kojem se određena pojava statistički posmatra. Jedinice statističkog skupa su pojedinačni slučajevi iz kojih se statistički skup sastoji, treba da budu istovrsne ali ne i istovetne [64]. Cilj posmatranja jedinica statističkog skupa je ispitivanje različitosti njihovih karakteristika i kvantitativno izražavanje uočenih različitosti.

Promenljiva (obeležje ili varijabla) je osobina koja se proučava ili istražuje i koja podrazumeva različite vrednosti po jedinicama posmatranja.

Opservacija ili opažanje je vrednost neke promenljive koja se odnosi na jednu jedinicu posmatranja. Obeležja jedinica posmatranja mogu biti:

- kvalitativna (atributivna, kategorijalna)
- kvantitativna (numerička)

Kvalitativna obeležja su osobine koje se uočavaju na jedinicama posmatranja, ali se ne mogu meriti već se opisno iskazuju, odnosno ne mogu uzeti numeričke vrednosti već se klasifikuje u dve ili više kategorija. Kvantitativna, odnosno numerička obeležja su osobine koje se uočavaju na jedinicama posmatranja, a mogu se meriti i brojčano iskazati.

Numerička obeležja mogu se podeliti na:

- 1) prekidna (diskretna, diskontinuirana)
- 2) neprekidna (kontinuirana)

Prekidna obeležja su numerička obeležja koja mogu da uzimaju samo određene vrednosti sa brojne prave i rezultat sa prebrojavanja, dok su neprekidna obeležja takva obeležja koja mogu uzeti bilo koju vrednost sa brojne prave. I jedna i druga obeležja mogu biti rezultat eksperimentalnih ispitivanja u zavisnosti od prirode promenljive koja se meri ili određuje.

### 5.3 STATISTIČKI POKAZATELJI

Sve slučajne veličine generalno se mogu okarakterisati statističkim pokazateljima kao što su srednja vrednost, standardna devijacija i dr. Neka slučajna veličina ili parametar (npr. promenljiva  $K$ ) može biti data funkcijom gustine  $f(x)$  koja ima kontinuiran (neprekidni) tok, ili diskretni (prekidni) tok. Generalno, slučajne veličine koji se tiču problematike ove disertacije se opisuju funkcijama koje imaju neprekidni tok.

### 5.4 DEFINICIJA VEROVATNOĆE

#### 5.4.1 Klasična definicija verovatnoće – Laplas 1812.

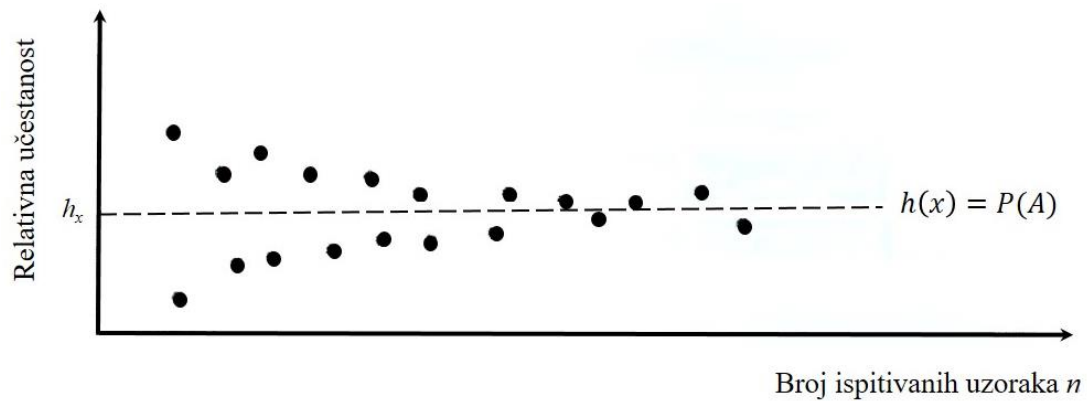
Prvo razmatranje verovatnoće učinjeno je kod igara na sreću [66]. Laplas i Paskal su verovatnoću događaja  $A$  kod igara na sreću definisali sledećim rečima: „Verovatnoća nekog događaja  $A$  –  $A(P)$  je količnik broja povoljnih ishoda za događaj  $A$  i broja svih mogućih ishoda.“ [66]. Na primer, opšte je poznato da bacanjem ispravne kockice verovatnoća ishoda 6, koji se može nazvati događajem  $A$ , je  $1/6$ . Drugim rečima, pri dovoljno velikom broju statističkih realizacija bacanja ispravne kockice, ishod 6 se očekuje sa verovatnoćom približno jednakoj  $1/6$ . Ipak ova definicija nije opšte važeća i pogodna je za primenu u slučajevima kod kojih ne može da se sretne beskonačno mnogo događaja i kod kojih je svaki mogući ishod jednako verovatan.

#### 5.4.2 Statička definicija verovatnoće (von Mises 1931)

Ukoliko se razmatra uzorak obima  $n$  elemenata (u slučaju ove studije je to, npr., broj ispitivanih uzoraka) i pri tome se registruje  $m$  uzoraka kod kojih je došlo do loma (ili otkaza), relativna učestanost otkaza se može opisati izrazom (5.1).

$$h_{rel} = \frac{m}{n} \quad (5.1)$$

Ukoliko se eksperimenti urade nezavisno jedan od drugog sa različitim brojem ispitivanih uzoraka, npr., onda je moguće dobiti različite relativne učestanosti. Kod eksperimenata sa većim brojem ispitivanih uzoraka  $n$  iskustvo pokazuje da se relativna učestanost neke tražene vrednosti  $h_{rel}$  sve manje i manje rasipa oko određene vrednosti  $h_x$  (slika 5.1).



Slika 5.1 Relativna učestanost u zavisnosti od broja ispitivanih uzoraka  $n$

Oдавде je moguće definisati verovatnoću kao graničnu vrednost relativne učestanosti relacijom (5.2).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} = P(A) \quad (5.2)$$

Ovakva definicija verovatnoće (5.2) nije opšte važeća i može se reći da je više reč o proceni.

### 5.4.3 Aksiomska definicija (Kolmogorov 1933)

Aksiomska definicija ne definiše pouzdanost u strogom smislu. Naprotiv, u modernoj teoriji verovatnoća se definiše kao osnovni pojam i polazi se od izvesnog broja tvrdnji, tzv. aksioma, na osnovu kojih se sve ostale osobine mogu dokazati. Kolmogorov je postavio aksiome verovatnoće koje glase [66]:

- Svakom slučajnom događaju  $A$  odgovara realni broj  $P(A)$  sa osobinom  $0 \leq P(A) \leq 1$  koji se naziva verovatnoća  $A$  (karakteristika nenegativnosti)
- Verovatnoća sigurog događaja  $P(A) = 1$  (karakteristika normiranosti)
- Ako su  $A_1, A_2, A_3, \dots$  slučajni događaji i ako je  $A_i \cap A_j = \emptyset$  za  $i \neq j$ , onda važi:  
 $P(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots$  (karakteristika aditivnosti)

## 5.5 MATEMATIČKI MODELI ZAKONA RASPODELE

### 5.5.1 Raspodele prekidnog karaktera

U teoriji verovatnoće poznat je veći broj različitih zakona raspodele slučajnih veličina koje se mogu uspešno koristiti za rešavanje zadataka pouzdanosti. Neka slučajna veličina koja se analizira može biti prekidnog karaktera, tačnije, takva da se ne može interpretirati kontinualnim zakonom raspodele. Raspodele diskretnog karaktera generalno nemaju veći značaj za izučavanje u ispitivanjima mehanike loma koje su tema ove disertacije. Ove raspodele imaju primenu u analizi sistema održavanja i analizi rezervnih delova, o tome se može naći više u literaturi [67, 70]. Neke od raspodela koje spadaju u raspodele prekidnog karaktera su binomna i Poasanova raspodela i o njima se više može naći u [64, 67].

### 5.5.2 Raspodela neprekidnog karaktera

U slučaju da je pojava koja se analizira neprekidnog karaktera, raspodela slučajno promenljive i analizirane veličine se obuhvata neprekidnom (kontinualnim) zakonima. Osnovne raspodele ove vrste su linearna raspodela, uniformna raspodela, normalna (Gausova) raspodela, eksponencijalna raspodela, log-normalna raspodela i Vejbulova (eng. *Weibull*) raspodela. Svaka od prethodno pomenutih raspodela ima svoj domen primene, neku oblast sa najčešćom primenom. Eksponencijalna raspodela ima najčešću primenu u elektotehnici i telekomunikacionim sistemima [68]. Log-normalna raspodela ima primenu, u posebnim slučajevima, u mašingradnji. U studijama koji se tiču feritnih čelika u području prelazne temperature najčešća se koristi Vejbulova raspodela i u daljem delu ovog poglavlja biće prikazani i objašnjeni njeni principi.

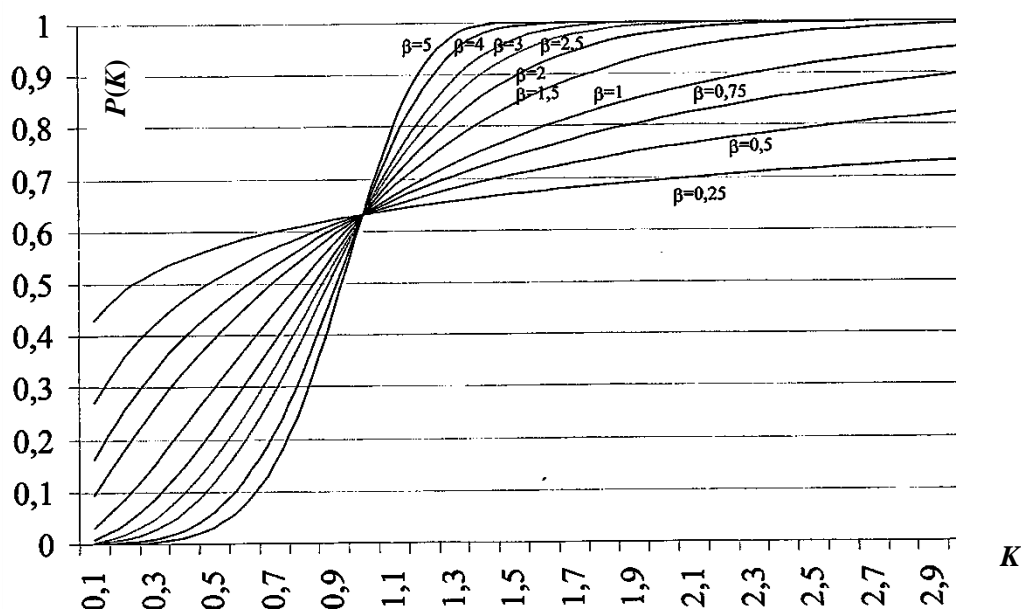
### 5.5.3 Vejbulova raspodela

Vejbulova raspodela je raspodela koja ima najveću praktičnu primenu u mašinstvu, generalno, i u studijama koji su povezani sa temom ove disertacije. Razlog tome je što se mnoge pojave mogu dobro opisati i aproksimirati ovom raspodelom. Ova raspodela ima široku primenu u modeliranju lomova i predviđanja otkaza različitih fizičkih sistema. Vejbulova raspodela može biti dvo-parametarska i tro-parametarska raspodela. Kao što sami pojmovi govore, dvo-parametarsku raspodelu karakterišu dva parametra: parametar razmere i parametar oblika. Kod tro-parametarske raspodele, pored dva gore pomenuta parametra, uvodi se i treći, parametar položaja. U tabeli 5.1 prikazani su izrazi dvo- i tro-parametarske Vejbulove kumulativne raspodele dve najčešće tražene funkcije u mašinstvu, a to su funkcije pouzdanosti i funkcije verovatnoće otkaza ili loma u zavisnosti od grane mašinstva u kojoj se primenjuje ova metoda za analizu podataka. Parametar rezmere u ovim izrazima ima zapis  $\theta$ , dok parametar oblika je predstavljen zapisom  $\beta$ .  $K$  predstavlja neku promenljivu veličinu čije se vrednosti (ili promena) analizira.

Tabela 5.1 Izrazi funkcija Vejbulove kumulativne raspodele

	Dvo-parametarska raspodela	Tro-parametarska raspodela
<b>Funkcija pouzdanosti</b>	$R(K) = e^{-\left(\frac{K}{\theta}\right)^\beta}$	$R(K) = e^{-\left(\frac{K-\gamma}{\theta-\gamma}\right)^\beta}$
<b>Funkcija verovatnoće otkaza, razaranja ili loma</b>	$P(K) = 1 - e^{-\left(\frac{K}{\theta}\right)^\beta}$	$P(K) = 1 - e^{-\left(\frac{K-\gamma}{\theta-\gamma}\right)^\beta}$

Oblici funkcija raspodele zavise od vrednosti parametara. Ovo se najjasnije može objasniti mogućnošću prikaza raznih oblika funkcija verovatnoće otkaza (slika 5.2). Na slici 5.2 mogu se videti funkcije kumulativne verovatnoće otkaza  $P(K)$  zavisno od parametra  $\beta$ , dok su ostali parametri konstanti. U zavisnosti od vrednosti parametra oblika  $\beta$ , menja se nagib funkcije verovatnoće otkaza. Za vrednost parametra oblika  $\beta = 1$  Vejbulova raspodela ima oblik eksponencijalne raspodele.



Slika 5.2 Funkcija verovatnoće otkaza Vejbulove raspodele za različite vrednosti parametra oblika  $\beta$  (parametar razmere  $\theta = 1$ , parametar položaja  $\gamma = 0$ ) [71]

Parametar razmere  $\theta$  predstavlja jednu vrstu srednje vrednosti i označava mesto gde se približno nalazi sredina neke raspodele. Vrednost ovog parametra je jednaka onoj vrednosti promenljive  $K$  u kojoj verovatnoća  $P(K)$  iz prethodne tabele (5.1) ima vrednost  $1-1/e$  (približno, 0,632). Treći parametar položaja  $\gamma$  označava minimalnu vrednost gore definisane slučajne promenljive čija se raspodela traži i koja može da se ostvari. Ovaj parametar se u literaturi koja se bavi problematikom ovog doktorata sreće pod nazivom vrednost „praga“ (eng. *threshhold*) ispod koje vrednost slučajne promenljive nije moguća.

## 5.6 METODE ODREĐIVANJA RASPODELE ZA ODREĐENI SKUP PODATAKA

U praksi ili laboratorijskim ispitivanjima kad god se dobije slučajan uzorak promenljive  $K$  potrebno je utvrditi najbolji model za tu promenljivu i prikazati je na taj način kumulativnom raspodelom. To nije jednostavan zadatak, ali uz pomoć poznatih metoda, poput grafičkih i analitičkih, je moguće rešavanje ovog problema, a uz pomoć računara rešavanje je još brže.

Cilj je pronaći metodu kojom bi se donela adekvatna odluka da li prihvatiti ili odbiti da određeni skup dolazi iz specifične raspodele. U nekom opštem slučaju, ako su  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$  vrednosti slučajne promenljive  $K$  koja pripada nepoznatoj funkciji raspodele  $F(K)$ , važi sledeća hipoteza predstavljena relacijom (5.3).

$$F(K) = F_0(K) \quad (5.3)$$

U ovom izrazu  $F_0(K)$  predstavlja neku određenu funkciju kumulativne raspodele koja može biti kontinualna ili diskretna. Hipoteza data relacijom (5.3) označava problem određivanja raspodele za dati skup podataka i nije lak za rešavanje. Razvijeno je dosta procedura za rešavanje, ali treba naglasiti da iako ove procedure omogućavaju da se određena raspodela odbije kao neadekvatna, one ipak ne omogućavaju da se dokaže da je određena raspodela jedini ili pravi model za dati skup podataka. Odluka u najvećoj meri zavisi od količine podataka, jer što je veći broj podataka verovatnoća za adekvatan izbor modela je veća [69] (primera radi, za različite mašinske sisteme u vojnoj tehnici pogledati literaturu [67]). U slučaju posedovanja nedovoljne količine podataka često nije ni moguće ni odbaciti model kao neadekvatan, iako se iskustveno očekuje da on to jeste.

Neke metode se mogu primeniti za bilo koji tip raspodele i za kontinualne i za diskretne, dok se druge mogu primeniti samo za određenu raspodelu. Sve raspodele imaju svoje prednosti i mane i

svoj domen ili polje primene. Metode koje se primenjuju za utvrđivanje raspodele kojom se mogu aproksimirati dati podaci ili skup promenljive veličine mogu se podeliti u 2 glavne kategorije:

- 1) Grafičke metode (papiri verovatnoće)
- 2) Analitičke metode

Grafičke metode su veoma jednostavne i često korišćene u inženjerskoj praksi. One daju jednu informaciju o podesnosti odabranog modela. Međutim, ove metode poseduju određenu manu, jer se zasnivaju na vizuelnom ispitivanju podataka. Ovaj nedostatak ispravljen softverskim rešenjima primenom adekvatnih računarskih programa. Procedura je vrlo jednostavna. Podaci se ucrtavaju na poseban papir verovatnoće koji se mora konstruisati za raspodelu koju smatramo dobrim modelom za date podatke. Ako se ucrtane tačke mogu dobro aproksimirati pravom linijom pretpostavljeni model je dobar, u protivnom, model je jednostavno neadekvatan. Koristeći ovu metodologiju može se dobiti dobra ocena valjanosti pretpostavljenog modela i proceniti parametri raspodele.

Druga mogućnost je konstituisanje histograma ili funkcije kumulativne raspodele uzorka, pa se to onda upoređi sa funkcijom gustine pretpostavljene raspodele ili njenom kumulativnom funkcijom. Jedina mana ove metode je nemogućnost razlikovanja anomalije, tačnije fluktuacije vrednosti promenljive u teoretskim razmatranjima.

Generalno, grafičke metode se češće nalaze u praksi i u radovima sa problematikom koji su u vezi sa ovom disertacijom. Postoje poznate metode i koraci za unošenje podataka u papire verovatnoće za normalnu, log-normalnu, eksponencijalnu i Vejbulovu raspodelu. U daljem tekstu biće objašnjen postupak pri ucrtavanju podataka na papir verovatnoće za Vejbulovu raspodelu i ostali važni parametri, poput veličine ranga, kao i analitički proračun.

### 5.6.1 Papir verovatnoće za Vejbulovu raspodelu

Funkcija verovatnoće i uopšte funkcija kumulativne raspodele u funkciji neke promenljive  $K$  -  $F(K)$  je kriva koja ima različite oblike u zavisnosti od parametra oblika  $\beta$  kao što je istaknuto i pokazano u prethodnom delu ovog poglavlja. U slučaju dvo-parametarske Vejbulove raspodele, krivu  $F(K)$  je moguće nacrtati kao pravu na specijalnom papiru verovatnoće. Pretvaranje krive u pravu se postiže odgovarajućim skaliranjem apscise i ordinate. Apscisa je logaritmski podeljena osa, dok je ordinata dvostruka logaritamska osa. Ovo je predstavljeno izrazima (5.4) i (5.5), respektivno.

$$x = \ln K \quad (5.4)$$

$$y = \ln(-\ln(1 - F(K))) \quad (5.5)$$

Radi podsećanja, dvo-parametarska kumulativna Vejbulova raspodela se može predstaviti relacijom (5.6).

$$F(K) = 1 - e^{-\left(\frac{K}{\theta}\right)^\beta} \quad (5.6)$$

Dvostrukim logaritmovanjem dobija se izraz (5.7).

$$y = ax + b \quad (5.7)$$

gde su  $a = \beta$ ,  $b = -\beta \ln \theta$  i  $x = \ln K$

Na ovaj način svaka Vejbulova raspodela se može predstaviti, uz pomoć Vejbulovog papira verovatnoće pravom (slika 5.3). Nagib prave u papiru verovatnoće definiše parametar oblika  $\beta$ . Korišćenjem ln-skale na apscisi i ln-ln skale na ordinate može se direktno ucrtati  $F(K)$  kao linearna funkcija od promenljive  $K$ .

Procedura za dobijanje prave linije i procenu parametara zahteva da se podaci poređaju u rastućem nizu i zavisi do veličine ranga (tačnije, vrednovanje slučajne promenljive) koja utiče na raspodelu. Pojam veličine ranga objašnjen je u sledećem poglavlju.



## 5.6.2 Veličine ranga i njihove raspodele

Vrednovanje slučajne promenljive u inženjerskoj praksi zasnivaju se na raspodelama veličina ranga. Potrebno je najpre objasniti značaj i postupak raspodela veličina ranga.

U inženjerskim studijama može se vršiti vrednovanje vremena otkaza tehničkih sistema [70], ali i drugih parametara koji imaju promenljivi karakter. Postupak se svodi na vrednovanje pomoću papira verovatnoće, dakle svakom otkazu mora se dodeliti određena verovatnoća otkaza  $P(K_i)$ , dakle u funkciji neke promenljive  $K$ . Verovatnoća loma može imati vrednost od 0 do 1, odnosno 0 do 100%. U slučaju da nije potrebno pretpostaviti veličinu ranga, onda se veličinama ranga pridodaju približno ravnomerne verovatnoće loma od 0 do 1, te se iz toga uvodi transformacija relacijama (5.8) i (5.9).

$$F(K_i) = F(u) = u \quad 0 < u < 1 \quad (5.8)$$

$$f(u) = 1 \quad 0 < u < 1 \quad (5.9)$$

Prethodne relacije opisuju uniformnu raspodelu ako su ispunjeni uslovi da je funkcija raspodele definisana u oblasti od 0 do 1. U jednačini (5.8) promenljiva  $u$  može da se tretira kao verovatnoća otkaza  $F(x)$ .

Pri vrednovanju podataka, tačnije promenljive (npr. parametra mehanike loma), svakoj vrednosti te promenljive dodeljuje se jedinstvena verovatnoća otkaza i u Vejbulovom vrednosnom papiru se unose tačke prave. Iz područja rasipanja verovatnoće loma biraju se najpogodnije vrednosti, a kao dobre vrednosti za procenu, pogodne su 3 srednje vrednosti – aritmetička srednja vrednost, medijana i vrednost moda [66], prikazane relacijama (5.10), (5.11) i (5.12) respektivno.

$$u_m = \frac{i}{n+1} \quad (5.10)$$

$$u_{50} = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (5.11)$$

$$u_{\text{mod}} = \frac{i-1}{n-1} \quad (5.12)$$

Generalno, za medijalni rang se ne dobija tačno rešenje, već približno [66]. Drugi izraz se koristi u slučaju ograničenog broja podataka. U praksi i studijama najčešće se mogu naći sva tri izraza u zavisnosti od namene. Na ovaj način promenljivoj  $K$  doduljuje se verovatnoća loma, dakle, primenom aritmetičke sredine za  $i$ -tu vrednost promenljive  $K$  od  $n$  broja ispitivanja ili ispitivanih uzoraka važi relacija (5.13).

$$F(K_i) = \frac{i}{n+1} \quad (5.13)$$

## 5.6.3 Analitičko određivanje parametara Vejbulove raspodele

Analitičkim metodama mogu se odrediti parametri Vejbulove raspodele sa nešto većom preciznošću nego grafičkim postupcima, iako gore opisani grafički postupci pružaju dovoljno tačne i pouzdane rezultate. Među najpoznatijim analitičkim postupcima određivanja parametara Vejbulove raspodele (parametar oblika i parametar razmere) za određenu populaciju podataka i informacija mogu se uvrstiti:

- Metoda najmanjih kvadrata ili regrasiona analiza (eng. *regression analysis*)
- Metoda momenta
- Metoda maksimalne verovatnoće (eng. *maximum-likelihood method*)

Regrasiona analiza modeliranja pretpostavlja da se može uspostaviti funkcionalna veza nezavisno promenljive  $X$  i neke greške. Primenom metode momenata određuje se najbolja Vejbulova prava, odnosno kriva upoređivanjem raspodele momenata uzorka sa nekom teorijskom raspodelom

momenata, dok se metoda maksimalne verovatnoće koristi za određivanje nepoznatih parametara raspodele i rešavanju nelinearnih jednačina po svim parametrima. U daljem tekstu i od najvećeg značaja u ovoj disertaciji je metod regresione analize, te će stoga biti dalje objašnjen u daljem delu ovog poglavlja.

### 5.6.4 Metoda najmanjih kvadrata ili regresiona analiza

Pomoću ove metode mogu se rešavati i modelirati problemi procene dva (nepoznata) parametara procenom regresijskog pravca [69]. Ova metoda zasniva se na principu da je suma kvadata rastojanja između tačaka  $[X_i, F(X_i)]$  i Vejbulove prave minimalna, pri čemu  $X_i$  predstavlja  $i$ -u vrednost parametra  $X$ . Optimalna vrednost parametra položaja  $\gamma$  određuje se iteracijskim postupkom.

Poznato je iz prethodnog dela teksta da jednačina Vejbulove raspodele u obliku  $y = ax + b$  ima sledeće parametre:

$$\begin{aligned} a &= \beta \\ b &= -\beta \ln \theta \end{aligned} \quad (5.14)$$

Pri čemu važe relacije (5.15).

$$\begin{aligned} x &= \ln K \\ y &= \ln(-\ln(1 - F(K))) = \ln \ln \frac{1}{1 - F(K)} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Vrednosti parametra Vejbulove raspodele  $a$  i  $b$  određuju se primenom metode najmanjih kvadrata tako da funkcija  $Q(a, b)$  ima minimum relacijom (5.16).

$$Q(a, b) = \left( \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \right)_{\min} = \left\{ \sum_{i=1}^n [y_i - (a \cdot x_i + b)]^2 \right\}_{\min} \quad (5.16)$$

Uslov minimuma se određuje iz uslova prikazanih relacijama (5.17) i (5.18).

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0 \quad (5.17)$$

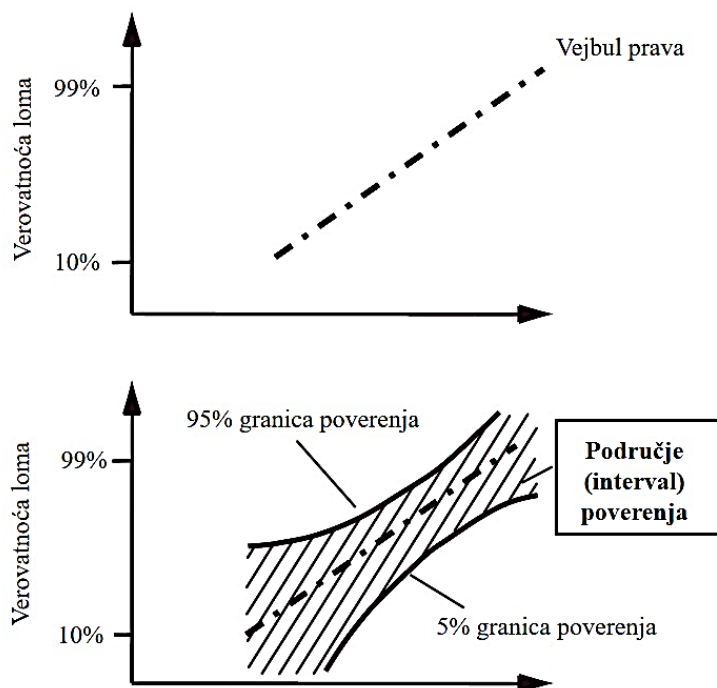
$$\frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \quad (5.18)$$

Sređivanjem i rešavanjem jednačina koje proizilaze iz uslova date relacijama (5.17) i (5.18) dobijaju se parametri Vejbulove kumulativne raspodele.

## 5.7 PODRUČJE POVERENJA

Nakon odabira podobne raspodele za određeni skup podataka, korisno je na kraju uraditi i proveru odgovarajućih kriva verovatnoća, odnosno raspodela. Generalno, ove provere se svode na određivanje područja poverenja za raspodelu u celini. Područje poverenja za raspodelu u celini ima smisla određivati u slučaju malog broja podataka (50 i manje podataka), dok broj podataka manji od 5 daje izuzetno nepouzdan rezultate same raspodele kao i područje poverenja. Zakon raspodele se u tom slučaju definiše preko medijalnih ranga, kao što je objašnjeno. Prilikom korišćenja medijalnog ranga za određivanje  $F(K_i)$ , Vejbul-prava predstavlja pravu, koja je najverovatnija u sredini, jer 50% slučajeva stvarne prave se nalaze ispod, odnosno 50% podataka se nalazi iznad Vejbul-prave. U slučaju da se želi odrediti oblasti u kojoj može da se očekuje stvarna prava, tačnije, sa kolikim poverenjem se može uzeti Vejbul-prava, potrebno je odrediti tzv. područje poverenja. Područje poverenja karakteriše verovatnoću sa kojom se slučajna promenljiva nalazi u ovom području. 90%-

tno područje poverenja predstavlja slučaj da se u 90 od 100 slučajeva posmatrana vrednost ili parametar nalazi u sračunatom području. Ograničenjem područja poverenja dobijaju se granice poverenja. Uobičajeno da je područje poverenja simetrično oko medijane [71], to znači da 90%-tno područje poverenja poseduje 5%-tnu i 95%-tnu granicu poverenja. Primer granice poverenja na nekoj Weibulovoj kumulativnoj raspodeli prikazanoj na papiru verovatnoće je prikazan na slici 5.3.



Slika 5.3 Primer neke Weibulove raspodele sa Weibul-pravom i granicama poverenja [65]

Granične vrednosti područja poverenja se mogu sračunati kao integrali funkcije gustine i o postupku se može više pročitati u literaturama [69, 72], o primeni na pojedinim mašinskim sistemima, primenom papira verovatnoće, primera radi, u literaturama [66, 71]. U sledećoj glavi će biti nešto više reči o konkretnim primerima i studijama koji se tiču ove disertacije.

## 5.8 STATISTIČKI TESTOVI

Ocena polazne hipoteze, i uopšte pretpostavke o određenom i izabranom zakonu raspodele za dati skup podataka, vrši se na papiru verovatnoće procenjivanjem da li sve unete tačke (podaci) kumulativne verovatnoće loma, otkaza (ili medijalnog ranga) odgovaraju pravoj liniji. Tolerancija određenih odstupanja je dozvoljena, bez obzira na tip podataka. Ovo se posebno odnosi na tačke koje odgovaraju najmanjim relativnim učestanostima [66]. U cilju određivanja pouzdane ocene sigurnosti ovih odstupanja koriste se tzv. statistički testovi. U primeni se mogu sresti različite vrste ovih testova, u zavisnosti od izabranog zakona raspodele ili korišćenih podataka, ali se u inženjerskoj praksi najviše koriste Kolmogorov-Smirnov i Pirsonov test, poznatiji kao  $\chi^2$  test. Pirsonov test je najstariji korišćena procedura za procenu podobnosti pretpostavljene raspodele za određeni skup podataka. U daljem tekstu biće objašnjena i prikazana metoda Kolmogorov-Smirnov.

### 5.8.1 Test Kolmogorov-Smirnov

Ova metoda je veoma poznata, često korišćena u praksi i generalno se može sresti u inženjerskim studijama. Test Kolmogorov-Smirnov se zasniva na pretpostavci da dobijena raspodela zaista odgovara teorijskoj, i to za celu populaciju, odnosno skup podataka. Stepenn podobnosti se ocenjuje na bazi odstupanja pojedinih tačaka od pretpostavljene raspodele, na taj način

što se gore pomenuta odstupanja upoređuju sa dozvoljenim koeficijentom poverenja za veličinu uzoraka (podataka)  $n$ . Metoda se bazira na statistici i može se predstaviti relacijom (5.19).

$$D_n = \max |F(K) - S_n(K)| \quad (5.19)$$

U ovom izrazu  $S_n(K)$  predstavlja funkciju empirijske kumulativne raspodele uzoraka tj. podatka veličine  $n$  izvučenog iz osnovnog skupa u kome slučajna promenljiva (promenljiva  $K$ , u izrazu (5.19)) ima funkciju kontinualne kumulativne raspodele  $F(K)$ .

Hipoteza, odnosno, pretpostavka da je uzorak iz osnovnog skupa se odbija ako važi relacija (5.20).

$$D_n > C \quad (5.20)$$

gde  $C$  predstavlja vrednost zavisno od nivoa značajnosti  $\alpha$  i veličine uzoraka  $n$ . Vrednost  $\alpha$  koja diktira vrednost dozvoljenog koeficijenta poverenja  $C$ , odnosno  $d_\alpha$ , jer se i taj zapis može sresti u literaturi, je tablična vrednost.

Vrednost funkcije empirijske kumulativne raspodele se može izračunati primenom relacije (5.21).

$$S_n(K) = \frac{i}{n} \quad (5.21)$$

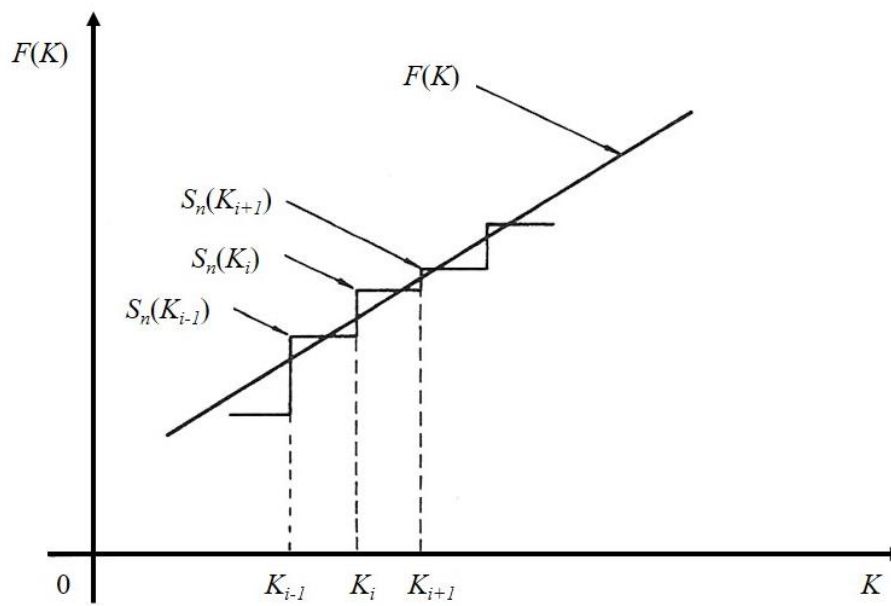
U ovom izrazu  $i$  predstavlja  $i$ -tu vrednost uzorka (podatka)  $n$  broja uzoraka, pri čemu su vrednosti poređane u rastućem nizu.

Ova metoda je relativno jednostavna i nema ograničenja u pogledu broja podataka, a teoretski se može primeniti i za broj podataka  $n = 1$ , iako se ne dobijaju pouzdani rezultati. Ocena podobnosti se određuje lakše nego Pirsovom metodom, naročito prilikom korišćenja grafičke metode, odnosno papira verovatnoće. Metoda Kolmogorov-Smirnov se može generalno primeniti samo za kontinualne raspodele i u slučaju da je neki pretpostavljeni model nezavisan od podataka [67], mada se može naći i u primeni i kod diskretnih raspodela.

Prilikom primene ove metode, procedura je sledeća:

- Neophodno je poređati podatke u rastućem nizu
- Utvrditi ukupan broj podataka  $n$
- Izračunati vrednost empirijske kumulativne raspodele za svaki podatak
- Odrediti odgovarajuće vrednosti pretpostavljene funkcije kumulativne raspodele
- Odrediti apsolutnu vrednost razlike  $|F(K) - S_n(K)|$  ili obrnuto
- Odrediti maksimlanu apsolutnu vredost  $D_n$
- Uporediti  $D_n$  sa tabličnim vrednostima. U slučaju da je  $D_n$  manje od te vrednosti, prihvata se hipoteza o izabranoj raspodeli na datom novou značajnosti

Procedura se može uprostiti ako se podaci ucrtaju na papir verovatnoće za izabranu, tj. pretpostavljenu raspodelu (ilustracija na slici 5.4). Generalno, postupak se svodi na ispitivanje razlike  $F(K)$  i  $S_n(K)$ , tačnije razlike u tzv. skokovitim tačkama, odnosno, u onim tačkama koje označavaju dobijenu vrednost slučajne promenljive veličine (podatka).

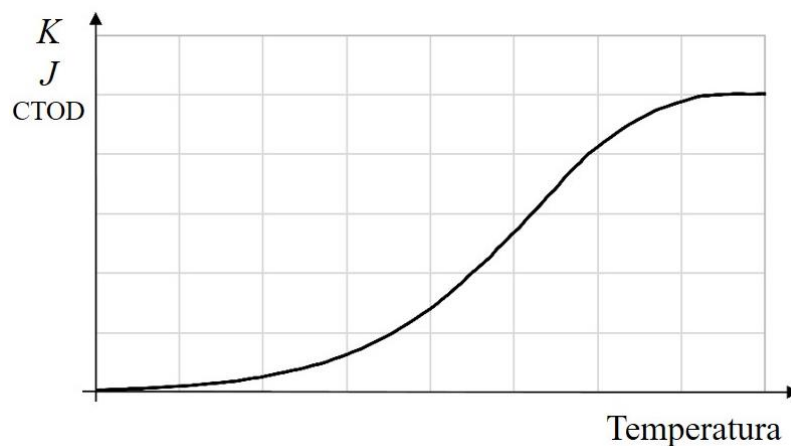


Slika 5.4 Grafičko predstavljanje metode Kolmogorov-Smirnov

## 6 PREGLED REFERENTNE LITERATURE

Konstrukcije od feritnih čelika mogu da se koriste se i u radnim uslovima sa niskim temperaturama u kojem može doći do nestabilnog krtog loma opisanog u prethodnim poglavljima ove disertacije. Za ocenu pouzdanosti i integriteta takvih konstrukcija od feritnih čelika potrebno je odrediti žilavost loma u ovom području prelazne temperature. Još od prethodno opisanih lomova brodova tipa Liberti težilo se odgovarajućoj karakterizaciji lomova u prelaznom režimu sa ciljem snižavanja prelazne temperature raznoraznim metalurškim postupcima.

Danas, feritni čelici i legure koji se koriste za rad na niskim temperaturama moraju ispuniti čitav niz zahteva u pogledu mehaničkih osobina kao što su čvrstoća, žilavost, plastičnost, fizičkih osobina tj. koeficijent termičkog širenja, koroziona postojanost itd. Žilavost čelika i legura predviđenih za rad na niskim temperaturama se najčešće definiše zahtevima za određenu prelaznu temperaturu. Eksperimentalno je utvrđeno da se čelici i legure lome duktilnim, odnosno žilavim, mehanizmom na višim, a krtim mehanizmom na nižim temperaturama. Prelazak iz žilavog u krto ponašanje se odvija u određenom temperaturnom intervalu. Taj temperaturni interval naziva se područje prelazne temperature, odnosno područje u kojoj materijal menja mehanizam tj. prirodu loma, iz žilavog u krto ili obratno [61, 73-75]. Feritnim čelicima se sa smanjenjem temperature menjaju mehaničke karakteristike, žilavost opada, a sa time i parametri mehanike loma. Na slici 6.1. može se videti ta tipična zavisnost parametara poput  $K$ ,  $J$  i  $\delta$  (CTOD) za lom cepanjem, tačnije parametara mehanike loma u zavisnosti od promene temperature.



Slika 6.1 Dijagram zavisnost parametara mehanike loma  $K$ ,  $J$  i CTOD sa promenom temperature

U ovoj glavi biće prikazane dosadašnja istraživanja pojave žilavo-krtog prelaza (tranzicije) i karakterizacija istih za pojedine čelike primenom mehanike loma, od najranijih studija primenom koncepta LEML, do primene EPML. Dve studije, koje su i na početku ove disertacije pomenute kao inspiracija ove disertacije su posebno obrađene i prikazane u posebnim poglavljima ove glave. Veliko rasipanje podataka žilavosti loma ispitivanjem svih feritnih čelika, kakav je i čelik 20MnMoNi 55, u prelaznom temperaturnom intervalu u funkciji nekog od parametra mehanike loma, obrađivale su se nekim od statističkih metoda. Takav pristup je započet u studijama 70ih godina 20. veka. Prikaz studija sa statističkim tumačenjem ovog intervala je takođe dat u ovoj glavi, a sa posebnim osvrtom

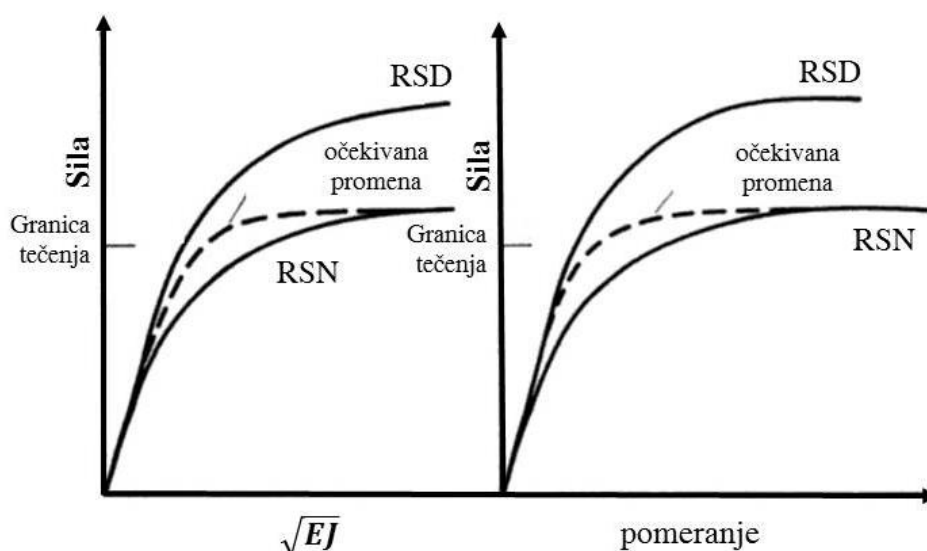
je obrađena problematika uticaj stepena ometenosti deformacije ispitivanih epruveta, kao i razlozi za nastajanje istog.

## 6.1 OPISIVANJE LOMOVA ČELIKA U PRELAZNOM REŽIMU PRIMENOM KONCEPTA LEML

Prvobitni pokušaji opisa lomova u području prelazne temperature su bili u domenu LEMF, tačnije preko  $K_{Ic}$  parametra. Begli i Tolin [76] odredili su žilavost loma i rast zamorne prsline za leguru Ni-Cr-Mo-V u osetljivom temperaturnom području tokom kaljenja usled okrtnjenja ovog materijala. Tačnije, pokušali su da objasne prirodu promene žilavosti loma u zavisnosti od temperature sa aspekta LEML. Pokazali su da za ovaj čelik žilavost loma raste do sobne temperature, onda dolazi do stabilizacije i ima gotovo konstantnu vrednosti u intervalu od 90 do 260°C. Za razliku od žilavosti loma, brzina rasta prsline se nije značajno menjala sa porastom temperature. Za određivanje karakteristika uticaja temperature korišćen je parametar  $K_{Ic}$ , dakle uslovi linearne elastičnosti i RSD. Kempbel [77] je sproveo slično istraživanje na seriji različitih materijala namenjenih za rad u ekstremnim uslovima. U svom radu sastavio je prvu kompilaciju podataka ispitivanja žilavosti loma u uslovima RSD za različite materijale (npr., legure aluminijuma, čelici visoke čvrstoće, čelici niske i srednje čvrstoće, čelici namenjeni za izradu posuda pod pritiskom, nerđajući čelici, legure titana, nikla, berilijuma) na različitim temperaturama (uključujući i niske). Takođe, za opisivanje žilavosti loma korišćen je kriterijum RSD i linalne-elastičnosti, tačnije u opisu ponašanja ispitivanih materijala korišćen je parametar  $K_{Ic}$ . U prelaznom režimu žilavost feritnih čelika se povećava sa povećanjem temperature. Da bi kriterijum RSD bio ispunjen pri većim temperaturama potrebno je da uzorci budu većih dimenzija, a često ispitivanja zatezanjem takvih (većih) epruveta nisu ni moguća zbog ograničenja aparature za ispitivanje. Mager i koautori [78] su dali značajan doprinos istraživanjima temperaturske zavisnosti promene žilavosti loma feritnog čelika A533; ukazujući, pri tome, na mogućnosti statističke obrade podataka.

## 6.2 OPISIVANJE LOMOVA ČELIKA U PRELAZNOM REŽIMU PRIMENOM KONCEPTA EPML

Uz pomoć parametara EPML moguće je opisati prelazni režim u smislu žilavosti loma feritnih čelika. Jedan od pionirskih radova u opisivanju ponašanja materijala u području prelazne temperature koristeći parametre EPML je rad Milnea i kolega [79], koji su istražili uticaj veličine ispitivanih epruveta na vrednosti parametra  $J_{Ic}$  uz pomoć realtivno jednostavnog modela loma cepanjem. Njihova ideja se zasniva na tome da su mehanizmi loma cepanjem i stabilan rast prsline u konstantnom takmičenju, gde prvobitni rast prsline vodi ka brzom krtom lomu uzorka. Pored toga, primetili su i uticaj veličine ispitivanih uzoraka na dobijene rezultate u prelaznom području temperatura, a osvrnuli su se i na proceduru procene žilavosti loma uzorka. Zbog plastične deformacije koja prevazilazi kriterijum srazmerno malog tečenja (eng. *small-scale yielding* - ssy) [14], Milne i koautori [79] uveli su svojoj studiji parametar faktor intenziteta napona u plastičnoj zoni. Na slici 6.2 dat je šematski prikaz promene parametra  $J$  i pomeranja u funkciji opterećenja u domenu plastične deformacije.



Slika 6.2 Šematski prikaz naglog skoka  $J$ -integrala i pomeranja u funkciji sile posle prelaska granice tečenja [79]

Dovs [80], pored promene  $J$ -integrala, posmatra i promenu parametra COD u funkciji od temperature primenom koncepta EPML na zavarenom spoju feritnog čelika BS4360 i posledice na pojavu nestabilnog loma. Takođe, istaknuto je kako izmerena vrednost parametra  $J_{Ic}$  utiče na precenjenost vrednosti parametra  $K_{Ic}$  u slučaju ispitivanja čelika sa naponom tečenja ispod  $700 \text{ N/mm}^2$ .

Sušтина radova iz tog doba je da se u području prelazne temperature žilavost loma ne može opisati pomoću parametra  $K_{Ic}$  zbog potencijalno prevelike plastične deformacije, naročito kod feritnih čelika i opštih konstrukcionih čelika. Daljim razvojem EPML karakterizacija žilavosti loma u području prelazne temperature je dobila novu dimenziju, ali i tu je došlo do čitavog niza zahteva i ograničenja u razumevanju ove oblasti kod feritnih čelika. Do danas je razvijen čitav niz metoda za analizu rezultata primenom koncepta LEML i EPML, poput poput  $J$ -integrala, parametra CTOD ili kriterijuma  $K_{Ic}$ .

Još jedna bitna karakteristika dobijenih rezultata u pomenutim studijama, naročito primenom koncepta EPML, je rasipanje dobijenih rezultata. Iz ovih rasipanja proizašli su novi zahtevi i izazovi, najviše u polju tumačenje podataka i predviđanje lomova u području prelazne temperature nekom od statističkih metoda o kojima će biti reči u sledećem poglavlju.

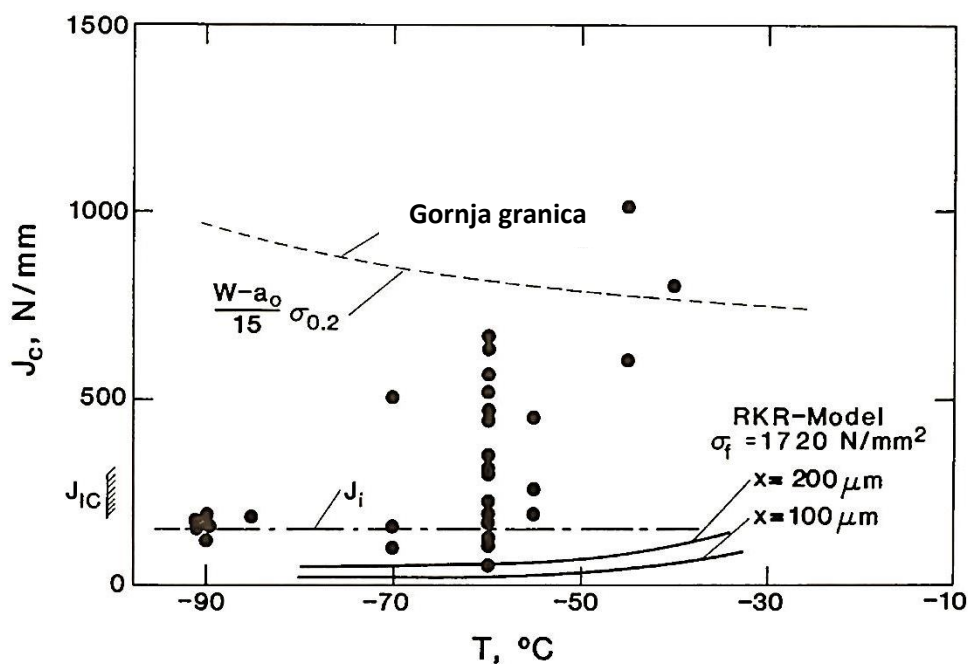
Ovime se došlo do pregleda dva suštinska rada iz kojih je izašla ideja ove disertacije, a to su rad Herensa [61, 63] i studija Landesa [81].

### 6.3 PRIKAZ HERENSOVE STUDIJE

Herens i Rid [61] su u svojoj studiji opisali razloge rasipanja dobijenih rezultata žilavosti loma u prelaznom području u funkciji parametra  $J_c$  kao i mehanizme koji dovode do loma cepanjem. Materijal od kojeg su napravljeni uzorci koji su ispitivali je feritni čelik 20MnMoNi 55. U svojoj studiji su otkrili da lom cepanjem započinje nešto ispred vrha prsline na mestu maksimalnog normalnog napona i prodiskutovani su mogući mehanizmi potencijalnih „okidača“ loma cepanjem i šta ih uslovljava. Posebno su obratili pažnju na rasipanje u donjem delu granice žilavosti loma, a rasipanje je veće sa povećanjem temperature. Ispitivane su C(T)50 epruvete na lom cepanjem prema tadašnjem ASTM standardu, a testovi su sprovedeni na temperaturama  $-90^\circ\text{C}$ ,  $-85^\circ\text{C}$ ,  $-70^\circ\text{C}$ ,  $-60^\circ\text{C}$ ,  $-55^\circ\text{C}$  i  $-45^\circ\text{C}$ . C(T) uzorci su napravljeni sa bočnim zarezima 10% debljine epruveta sa obe strane sa unetom zamornom prsline prema odgovarajućem standardu. Opterećenje je zadato kontrolisanim pomeranjem brzinom  $0,5 \text{ mm/min}$ . Na slici 6.3 može se videti rasipanje vrednosti parametra  $J_c$  u funkciji od temperature, naročito rezultata dobijenih na temperaturama višim od  $-60^\circ\text{C}$ . Na slici se



može videti i definisanje validnosti dobijenih rezultata u gornjem prelaznom temperaturnom režimu u kome lom cepanjem može biti sa i bez duktilnog čupanja.

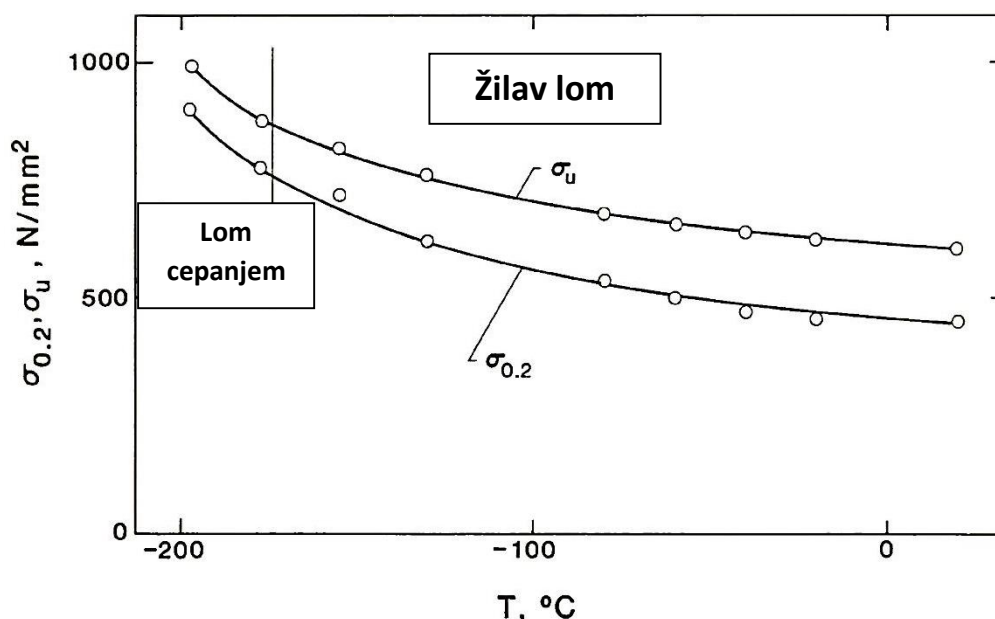


Slika 6.3 Žilavost loma u funkciji  $J_c$  - rasipanje dobijenih rezultata u zavisnosti od temperature u gornjem području temperaturnog prelaznog režima; definisanje gornje granice validnosti podataka [61]

Pored ispitivanja C(T) epruveta, rađeno je jednoosno ispitivanje zatezanjem uzoraka na različitim temperaturama (tabela 6.1). Izračunate su vrednosti napona tečenja  $\sigma_{0.2}$  i date su i vrednosti parametara ojačanja  $n$ . Na slici 6.4. prikazan je dijagram promene napona tečenja i zatezne čvrstoće (eng. *ultimate tensile strength*)  $\sigma_u$  u zavisnosti od temperature.

Tabela 6.1. Vrednosti napona tečenja i parametara ojačanja u funkciji od temperature [61]

T [°C]	$\sigma_{0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	n
-90°C	550	210 000	0,09
-85°C	545	210 000	0,09
-70°C	520	210 000	0,095
-60°C	500	210 000	0,1
-55 °C	495	210 000	0,1



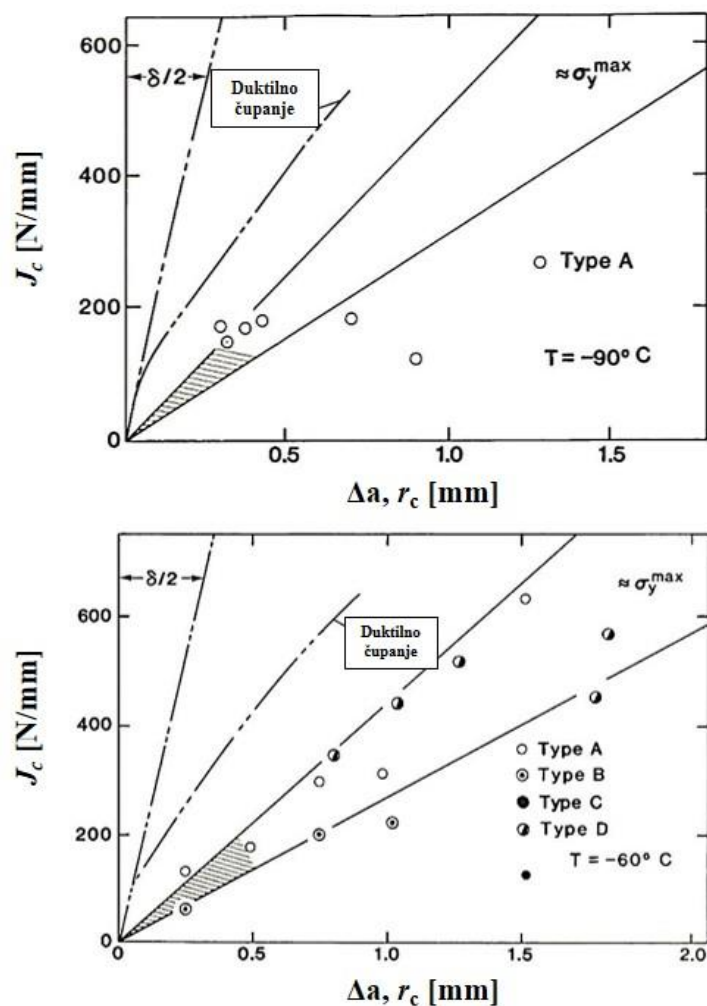
Slika 6.4 Promena napona tečenja  $\sigma_{0,2}$  i zatezne čvrstoće  $\sigma_u$  sa promenom temperature [61]

Pored toga, rađena su ispitivanja savijanja u četiri tačke Šarpi epruveta na temperaturi blizu apsolutne nule.

U svojoj studiji, Herens i Rid su uveli dva parametra. Prvi je  $r_c$  koje predstavlja rastojanje od vrha inicijalne zamorne prsline do mesta inicijacije loma C(T) epruveta. Drugi parametar  $z$  predstavlja rastojanje parametra  $r_c$  od ose vertikalne simetrije (po debljini) C(T) uzoraka. Oba parametra su merena mikroskopom. Fraktografskom analizom uzoraka na zatezanje, cepanje i savijanje u četiri tačke, autori su zaključili da postoje četiri različita oblika na mestu početka loma cepanjem, a to su:

1. Tip A – Fasete cepanja su uzrok loma cepanjem pri vrednostima  $J_c$  koje su manje od  $J_{Ic}$  na niskim temperaturama od  $-90^\circ\text{C}$  do  $-196^\circ\text{C}$  ispitivanjem C(T) epruveta, pri čemu je napon loma iznad 1700 MPa. Lom cepanjem se odvija u tri faze:
  - Stvaranje mikroprsline cepanja koje su lokalizovane u zrnu ili na granicama zrna, od kojih su fasete manje.
  - Rast mikroprsline cepanja koji nastaje posle njihovog početka, i nije posledica loma čestica, kroz jedno ili više susednih zrna. Napon koji uslovljava rast ove prsline je mali i u ovoj fazi mikroprsline cepanja se može videti na mestu početka loma.
  - Prsline cepanja na granici zrna može biti veličine zrna. Zbog toga se granica zrna može smatrati preprekom za rast mikroprsline cepanja. Prolaz kroz granice zrna drugačije orijentacije je verovatno kritična faza u rastu prsline cepanja.
2. Tip B – Uključak na faseti cepanja se javlja kao uzrok loma na visokom temperaturama i nisu uočeni u temperaturnom intervalu  $-90^\circ\text{C}$  do  $-196^\circ\text{C}$ .
3. Tip C – Začetak loma cepanjem u skupini uključaka javlja se u zateznim uzorcima, retko u C(T) epruvetama pri malom naponu. Uključci mogu da uslove pojavu višeg napona u okolnom materijalu i time i pojavu cepanja.
4. Tip D – Začetak cepanja u lokalnoj zoni duktilnog čupanja je dominantan za vrednosti parametara  $J_c$  veće od  $J_{Ic}$ . Dužina lokalne zone duktilnog čupanja jednaka je rastojanju od vrha zamorne prsline do mesta maksimalnog napona.

Glavni zaključak ove studije je da rasipanje dobijenih vrednosti parametra  $J_c$  dolazi zbog rasipanja u rezultatima rastojanja između mesta inicijacije loma cepanjem i vrha zamorne prsline, što je ilustrovano na slici 6.5 gde su prikazane zavisnosti žilavosti loma i rastojanja inicijacije loma cepanjem na temperaturama  $-90^\circ\text{C}$  i  $-60^\circ\text{C}$ .



Slika 6.5 Zavisnost parametra  $J_c$  i rastojanja mesta inicijacije loma cepanjem na temperaturi  $-90^\circ\text{C}$  i  $-60^\circ\text{C}$  [61]

## 6.4 PRIKAZ LANDESOVE STUDIJE

Landes [81, 82] je prikazao i objasnio naizgled osnovne pojmove zavisnosti koji se tiču ponašanja čelika u području prelazne temperature. Rezultati koji su diskutovani u ovoj studiji su dobijeni ispitivanjem  $C(T)$  epruveta. U objašnjenju šta se dešava u području prelazne temperature, kao i u objašnjenju faktora koji imaju uticaj na rasipanje rezultata koji su u funkciji žilavosti loma, korišćena su ispitivanja nekolicine čelika na različitim temperaturama. Tabelarni prikaz rezultata dat je u [81].

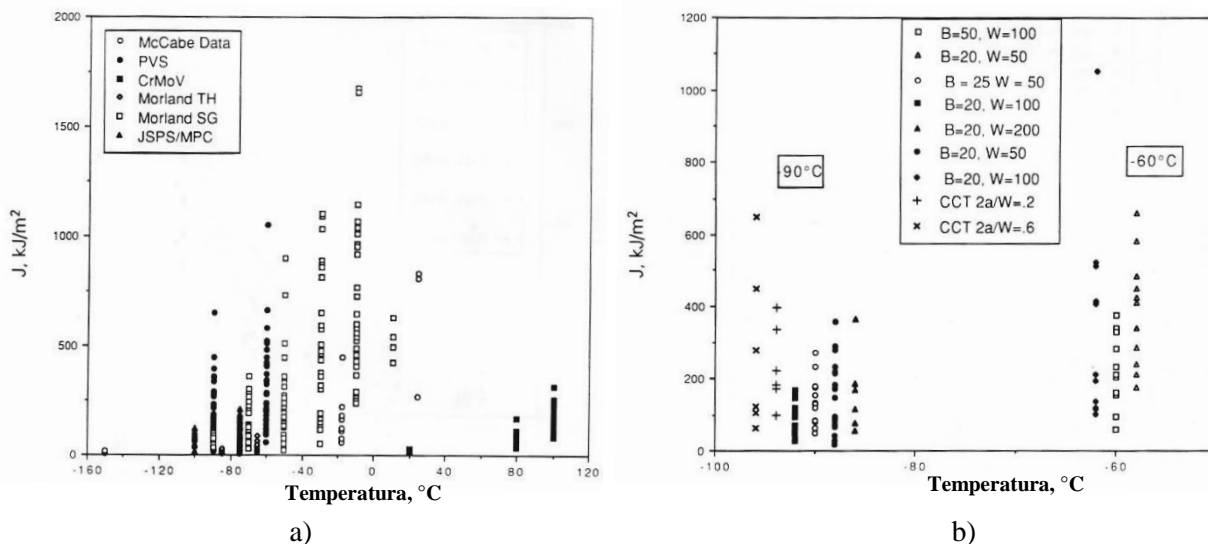
Landes se osvrnuo na sledeće teme:

- uticaj debljine i veličine uzoraka na žilavost loma
- osnove statističkog modelovanja i predviđanje podataka primenom Vejbulove raspodele i primenu njegovog modela za statističko opisivanje podataka
- uticaj ometene deformacije tokom ispitivanja uzoraka na rasipanje podataka
- granične uslove procene njegove studije i dr.

Može se istaći da najvažniji deo njegove studije predstavlja predložena metoda za predviđanje donje granice žilavosti loma na osnovu ispitivanja jednog uzorka, koju je kasnije razvio sa drugim istraživačima, a ista je prikazana detaljnije u radu [83]. Prikaz ove studije se može naći i na sprskom jeziku, u radu Petrovskog [62].

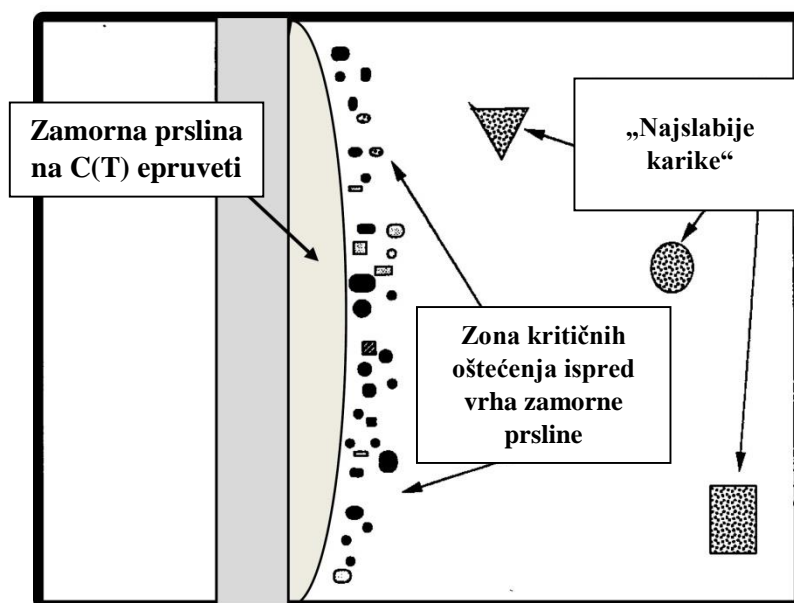
Na slici 6.6a mogu se videti rezultati korišćeni u ovoj studiji i rezultati vrednosti  $J_c$  za određene čelike, dok se na slici 6.6b mogu videti  $J_c$  vrednosti za čelik 20MnMoNi 55 (oznaka PVS). Na slici 6.6 navedene su debljine C(T) epruveta i temperature na kojima su urađena ispitivanja. Ono što je Landes zaključio iz prikaza svih rezultata je da:

- manji ispitivani uzorci pokazuju veće rasipanje rezultata nego veći ispitivani uzorci
- manji uzorci ispitivanjem pokazuju manju vrednost žilavosti na određenim temperaturama nego veći uzorci, tačnije, donja granica žilavosti je manja
- manji ispitivani uzorci pokazuju manju ili istu srednju vrednost žilavosti nego veći uzorci i retko kada imaju veću srednju vrednost od većih ispitivanih uzoraka.



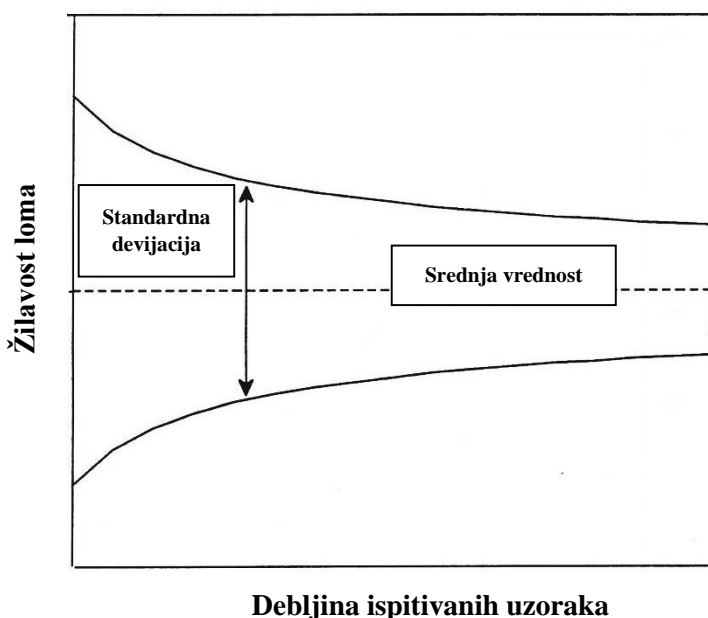
Slika 6.6 a) Prikaz rezultata korišćenih u studiji; b) prikaz rezultata čelika 20MnMoNi 55 [82]

U ovoj studiji predložen je model koji objašnjava prirodu rasipanja dobijenih rezultata u prelaznom režimu, tačnije području prelazne temperature. Naime, moguća su dva tipa inicijacije loma cepanjem u C(T) epruvetama. Po prvom kriterijumu, lom cepanjem nastaje u zonama kritičnih oštećenja blizu vrha zamorne prsline, a po drugom lom se javlja na mestima „najslabije karike u lancu“, tačnije na mestima oštećenja u mikrostrukturi materijala ispred vrha prsline i ispred zona kritičnih oštećenja (slika 6.7). Kritična oštećenja ispred vrha zamorne prsline su mala oštećenja u mikrostrukturi materijala i za njihovu aktivaciju je potrebna visoka vrednost napona. Lom cepanjem nastaje aktiviranjem kritičnog broja ovih malih oštećenja koji se spajaju u jednu veliku prslinu. Za razliku od ovog kriterijuma, lom na mestima „najslabije karike u lancu“ zahteva manji napon za aktivaciju, ali napon mora biti takav da pokrije veću površinu uzorka. Aktiviranjem jednog ovakvog mesta stvaraju se uslovi za lom cepanjem. Sa odgovarajućom visokom vrednošću napona, lom cepanjem najčešće nastaje mehanizmom loma usled kritičnih oštećenja. Ovaj mehanizam cepanja ne zahteva ovako visok napon raspoređen po velikoj površini C(T) epruvete. Vrednosti žilavosti materijala usled loma cepanja (koji nastaje zbog kritičnih oštećenja ispred vrha prsline) imaju manje vrednosti, dok je žilavost uzoraka kod kojih nastaje po mehanizmu „najslabije karike“ veća.



Slika 6.7 Landesov predloženi model; prikaz dva mehanizma inicijacije loma cepanjem u C(T) epruvetama po Landesu [81]

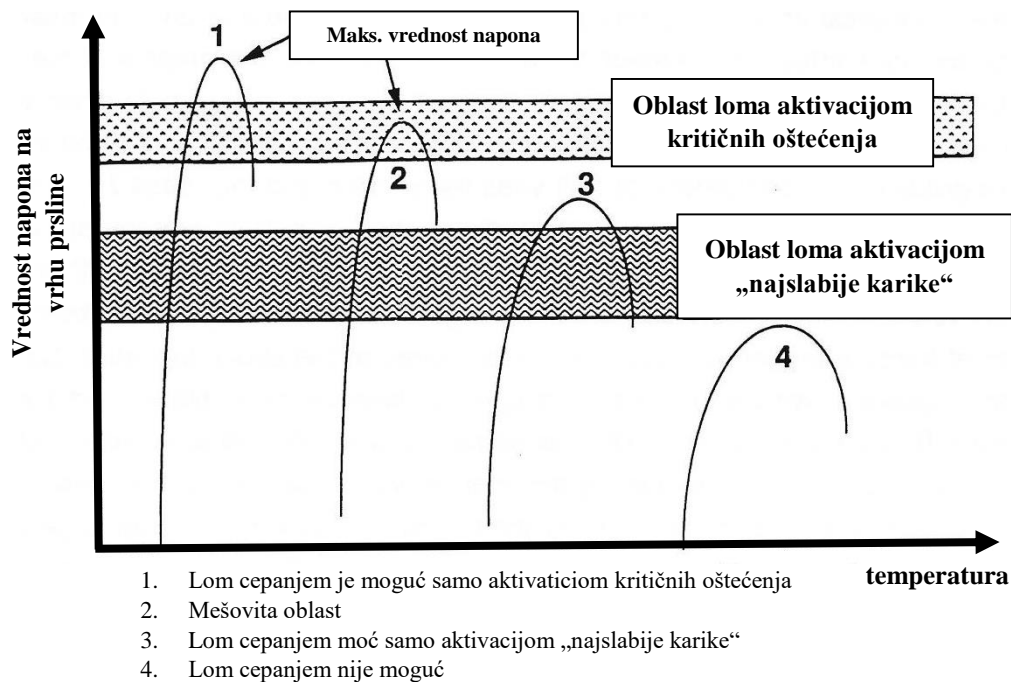
Ilustracija kriterijuma aktivacijom kritičnih oštećenja u smislu zavisnosti debljine uzorka na vrednosti žilavosti loma prikazana je na slici 6.8. Landes je zaključio da u slučaju dovoljno velikog broja ispitivanja uzoraka različitih debljina dimenzija uzoraka ne utiče na srednju vrednost žilavosti loma, već samo na devijaciju oko iste. Za određeni materijal na nekoj temperaturi rasipanje vrednosti žilavosti loma je veće kod uzoraka manjih dimenzija (kako je navedeno u studiji, manjih debljina) i moguće je uraditi odgovarajuću predikciju ove devijacije. Međutim, sa sniženjem temperature to i ne mora da bude slučaj, što može biti posledica toga da se lom cepanjem neće odvijati po predloženom modelu. Ovo je pokazao na određenom primeru i odnosi se na krajnje tačke u području rasipanja.



Slika 6.8 Ilustracija zavisnost debljine ispitivanih uzoraka na na devijaciju dobijenih rezultata oko sredne vrednosti [81]

Landes je svojim modelom i koristeći Rajs-Džonsonov model koncentracije napona na vrhu prsline [84] pokušao da objasni dva gore opisana kriterijuma loma cepanjem ilustracijom na slici 6.9. Na nižim temperatura napon tečenja ima veću vrednost nego na višim, pa je koncentracija napona na vrhu prsline po Rajs-Džonsonovom modelu dovoljno velika da aktivira lom u zoni kritičnih oštećenja.

Sa povećanjem temperature napon opada i u nekom momentu aktivacija ovih kritičnih oštećenja više nije moguća, pa je lom cepanjem moguć samo aktivacijom „najslabije karike“. Srednja zona koja se može videti na slici 6.9 je oblast u kojoj su moguća oba mehanizma inicijacije loma cepanjem.



Slika 6.9 Šematsko obrazloženje statističkih zona loma cepanjem korišćenjem Rajs-Džonsonovog modela [81]

U daljem tekstu ove disertacije biće prikazana i urađena dalja diskusija ove studije i Landesovih zaključaka, poput statističkog tumačenja rezultata ispitivanih epruveta i uticaj stepena ometenosti deformacije.

## 6.5 STATISTIČKO TUMAČENJE REZULTATA U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE

Veliko rasipanje podataka žilavosti loma u prelaznom temperaturnom režimu kod feritnih čelika u funkciji  $J$ -integrala ili faktora intenziteta napona  $K$  mogu se tumačiti i obrađivati statističkim metodama. Ovo predstavlja veliki izazov i zahteva poznavanje ponašanja materijala i mehanizme lomova, ali iz ovoga proističu i razna ograničenja ili uprošćenja statističkih modela. Mnoge studije se zasnivaju na statističkoj obradi dobijenih vrednosti eksperimentalnih rezultata nastalih lomom cepanjem.

Jedan od prvih radova na temu statističke obrade rezultata u prelaznom režimu je rad Landesa i Šafera [85]. Oni su na osnovu predloženog statističkog modela uvideli da je moguće predvideti rezultate i generalno ponašanje većih uzoraka na osnovu ispitivanja manjih  $C(T)$  uzoraka u prelaznom temperaturnom režimu za više grupa čelika. Predložen je statistički model u obliku Vejbulove raspodele (izraz 6.1).

$$F_1(x) = 1 - e^{-(x/b)^c}, \quad x > 0 \quad (6.1)$$

$F_1(x)$  predstavlja kumulativnu Vejbulovu funkciju raspodele,  $b$  parametar Vejbulove raspodele (parametar razmere),  $c$  je parametar oblika i njime se definiše nagib krive, dok  $x$  predstavlja neku vrednost dobijenu ispitivanjem.

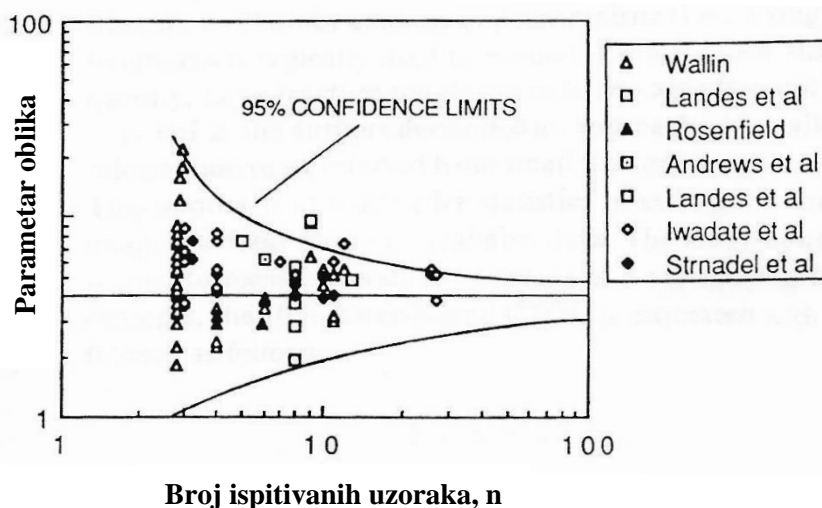
Rezultati ove studije pokazuju da predviđanjem žilavosti loma na osnovu ispitivanja manjih uzoraka se dobijaju „prećenjeni“ rezultati, pa je zaključak bio da ovaj pristup treba još istražiti i razviti

i naći mu odgovarajuća ograničenja. Vejbulov statistički model takođe može poslužiti za objašnjenju razlike u vrednosti žilavosti ispitivanih epruveta različitih dimenzija. Svi ispitivani čelici su pokazali dobro predviđanje rezultata i našli su dobro podršku primenom statističkog modela u objašnjenju ponašanja materijala u prelaznom temperaturnom režimu. Glavni zaključak je uz odgovarajuću analizu i nadogradnju ovog pristupa moguće izvršiti karakterizaciju i predvideti rezultate žilavosti loma većih uzoraka.

Usledio je čitav niz radova u cilju tumačenja rezultata u ovom osetljivom temperaturnom području. Možemo izdvojiti radove Valina [86, 87] koji je uticaj debljine ispitivanih uzoraka objasnio statističkim modelom loma cepanjem Šarpi epruveta. U verovatnoću loma Vejbulovom raspodelom izrazom 6.2. cepanjem u funkciji faktora inteziteta napona  $K_I$  uveo je ograničenje donjom granicom vrednosti  $K_{min}$  ispod koje materijal ne može da ima vrednost prilikom ispitivanja. Na osnovu rezultata ispitivanja debljine epruvete ( $B_1$ ) predstavio je predviđanje vrednosti faktora inteziteta napona uzorka veće debljine ( $B_2$ ) pomoću relacije (6.2). Jedna od zaključaka ovih studija predstavlja da u slučaju krtog loma cepanjem uticaj debljine ispitivanih uzoraka je usko povezan sa efektom „najslabije karike“ mehanizmom cepanja.

$$K_{B_2} = K_{min} + (K_{B_2} - K_{min}) \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{1/4} \quad (6.2)$$

Anderson i Stienstra [88] su analizirali rasipanje rezultata loma cepanjem primenom statističke metode, primenom modela „najslabije karike“ i analizirali uticaj broja ispitivanih uzoraka na parametar oblika  $c$  Vejbulove raspodele iz jednačine (6.1) tj. vrednosti ovog parametara na najbolje fitovanje krivih. U analizi su koristili rezultate raznih autora i za faktor inteziteta napona  $K_{Ic}$  ili  $K_c$  za fitovanje statističkih krivi raspodele (poput Vejbulove) vrednost parametra  $c$  će težiti 4, dok je za  $J_c$  ta vrednost 2. Na slici 6.10 može se videti ovo tumačenje za  $K_c$  vrednosti nekoliko studija prikazanih u ovom radu sa pouzdanou od 95% primenom Monte Karlo metode. Može se zaključiti da povećanjem broja ispitivanih uzoraka ova vrednost teži broju 4. Jedan od zaključaka ove studije (a time i ograničenje) je to da u slučaju prevelike plastičnosti koja prethodi lomu ove zakonitosti ne važe, jer parametar oblika ima nešto nižu vrednost od teoretske.



Slika 6.10 Zavisnosti vrednosti parametara oblika fitovanjem parametra  $K_c$  u funkciji broja ispitivanih uzoraka; za različite studije koji su legendama prikazani u tabeli desno [88]

Studije koje predstavljaju nadogradnju prethodne su studije Stienstre [89] i prethodno obrađena studija Landesa [81]. U obe ove studije analizirane su mogućnosti i pouzdanosti tro-parametarske Vejbulove raspodele (koju je uveo Valin u svojim studijama poput pomenutih [86, 87]). Za parametar faktora intenziteta napona donja granica (eng. *threshold toughness*) ta vrednost ne može da bude manja od  $20 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$  ispitivanjem bilo kog materijala na bilo kojoj temperaturi. U ovoj

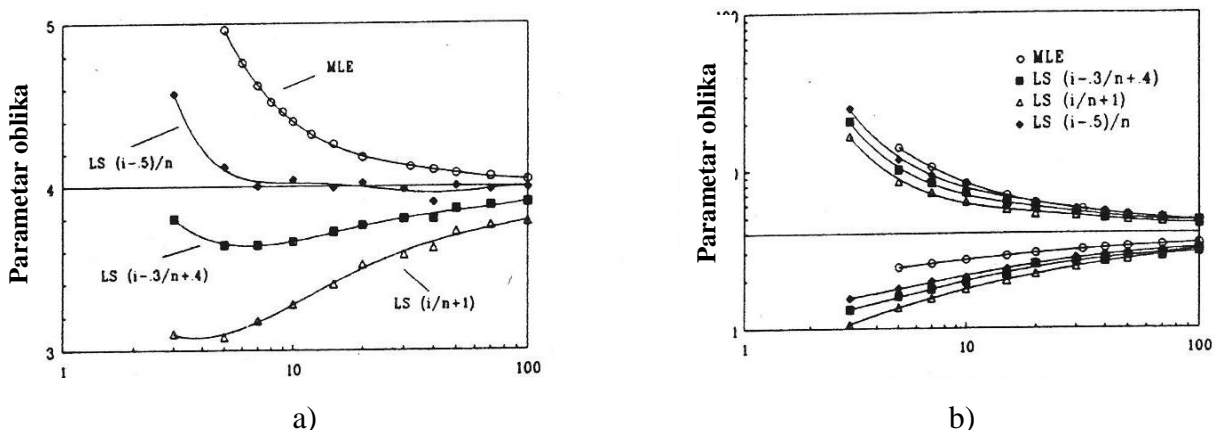
studiji urađeno je poređenje parametara faktora oblika na formu Vejbulove raspodele primenom linearne regresije, tačnije, metode najmanjih kvadrata i njenih modifikacija, kao i metodom procena maksimalne verovatnoće (eng. MLE). Primenom linearne regresije, kumulativna verovatnoća je urađena na osnovu tri najčešća izraza u obliku (6.3), (6.4), (6.5) predložene od strane Bergmana. Prve dve su najčešće korišćene u literaturi, dok je treća napreciznija po studiji Nevila i Not-a [89].

$$F = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (6.3)$$

$$F = \frac{i}{n + 1} \quad (6.4)$$

$$F = \frac{i - 0.5}{n} \quad (6.5)$$

$F$  predstavlja kumulativnu verovatnoću,  $i$  je redni broj ispitivanog uzorka,  $n$  predstavlja ukupan broj ispitivanih uzoraka. Na slici 6.11 prikazano je poređenje sve tri metode kumulativne raspodele i MLE metode na dobijanje najpribližnije vrednosti faktora oblika za fitovanje faktora inteziteta napona primenom Monte Karlo metode. Sa povećanjem broja uzoraka primenom gore pomenute tri metode najmanjih kvadrata za računanje kumulativne verovatnoće i MLE metode parametar oblika Vejbulove raspodele teži 4.



Slika 6.11 a) poređenje mogućnosti proračuna parametra oblika Vejbulove raspodele fitovanjem parametra  $K$  u cilju određivanja srednje vrednosti faktora oblika; b) poređenje 95% intervala ovog faktora primenom Monte Karlo metode i vrednosti parametra oblika sa slike levo [89]

Landesova studija [81] je ukazala da se parametar oblika za fitovanje vrednosti  $J$ -integrala Vejbulovom raspodelom kreće oko vrednosti 2, kao što je već i istaknuto, i da je za ovu vrednost potreban broj ispitivanih uzoraka od 20 do 50. Međutim, tro-parametarska Vejbulova raspodela za vrednosti  $J$ -integrala nije pokazala nikakve značajne rezultate i da je za fitovanje ovog parametra u cilju obrade rezultata najbolje koristiti dvo-parametarsku Vejbulovu raspodelu.

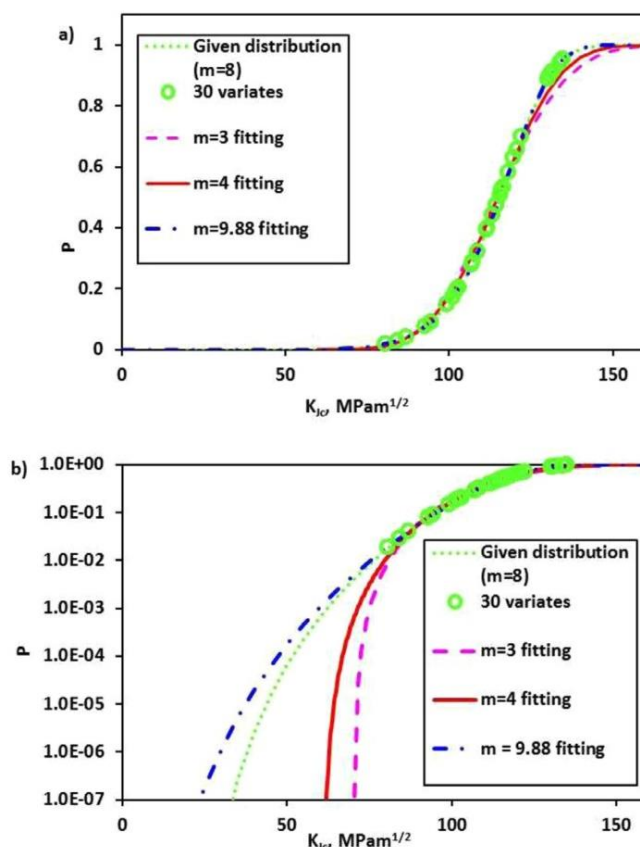
Obe prethodno opisane studije su pokazale primenu statističkih metoda u određivanju donje granice žilavosti loma. U Stienstrinoj studiji donja granica se može predvideti sa pouzdaniošću od 5% ispitivanjem 3 ili više epruveta. Landes je razvio metodu za predviđanje donje granice žilavosti loma na osnovu ispitivanja jedne epruveta kombinacionom kriterijuma veličine epruvete i primenom statističke raspodele. Jedina mana ove metode je njena empirijska postavka i nemoguće je proveriti nekom od predloženih statističkih modela. Detaljnije o primeni ove metode koju je razvio Landes se može naći u radu [83] i preglednom radu Petrovskog [62].

Analiza predviđanja donje granice žilavosti loma se cepanjem se izražava najčešće u funkciji  $J$ -integralom, ali se mogu koristiti i drugi parametri poput  $K_{Jc}$ , kao u studiji MekKejleba i Merklea [90]. Ova metoda je uključila donekle i stepen ometenosti deformacije  $C(T)$  uzorka tokom



ispitivanja uvođenjem parametra oblika Weibulove funkcije za RSD. Donja granica žilavosti na lom definisana u ovom radu odgovara verovatnoći loma od 5%. Detaljnija studija na ovu temu i opšte efekti koji utiču na rezultate (definisanje donje granice žilavosti loma), reproduktivnost metode, ograničenja pojedinih metoda, realnu primenljivost mogu se naći u radovima [91, 92], kao i u radu [93] u kojem autori ističu da metoda procene donje granice žilavosti nema teorijsku osnovu, već se može odrediti empirijski..

Neke studije su i kritične prema statističkom pristupu objašnjenja i karakterizacije materijala u ovom temperaturnom režimu i ukazuju na potrebu za dubljom analizom. Vei-Šeng [94] je otvorio sledeće teme: da li postoji čvrsta teorijska osnova za primenu dvo- i tro-parametarske Weibulove statistike u opisivanju loma cepanjem, da li je neophodno da parametar oblika bude 4 i koja je osnovno opravdanje da fiksnu donju vrednost granica  $K_{min}$  koju je uveo Valin, a kasnije postala standardna u odgovarajućem standardu ASTM 1921. Generalni zaključak studije je da Weibulov model za opisivanje žilavosti loma cepanjem za fiksne parametre Weibulove raspodele, tačnije, parametar oblika i prag  $K_{min}$  nemaju primenu bez podataka o temperaturi i stepenu ometenosti deformacije. Stoga predlaže model koji uključuje ove uticaje, naročito udeo plastične deformacije. Na slici 6.12 može se videti poređenje dobijenih verovatnoća loma tj. fitovanih krivih sa različitim vrednostima parametrima Weibulove raspodele (parametar oblika i  $K_{min}$ ) koji su dali bolje predviđanje i fitovanje u odnosu na standardizovane vrednosti. U konkretnom slučaju,  $K_{min} = 20$  koju je uveo Valin, a koja je kasnije ušla u standard [45] i parametar oblika je 4 za fitovanje vrednosti faktora inteziteta napona mogu imati druge vrednosti, jer zavise od temperature i deformacije.



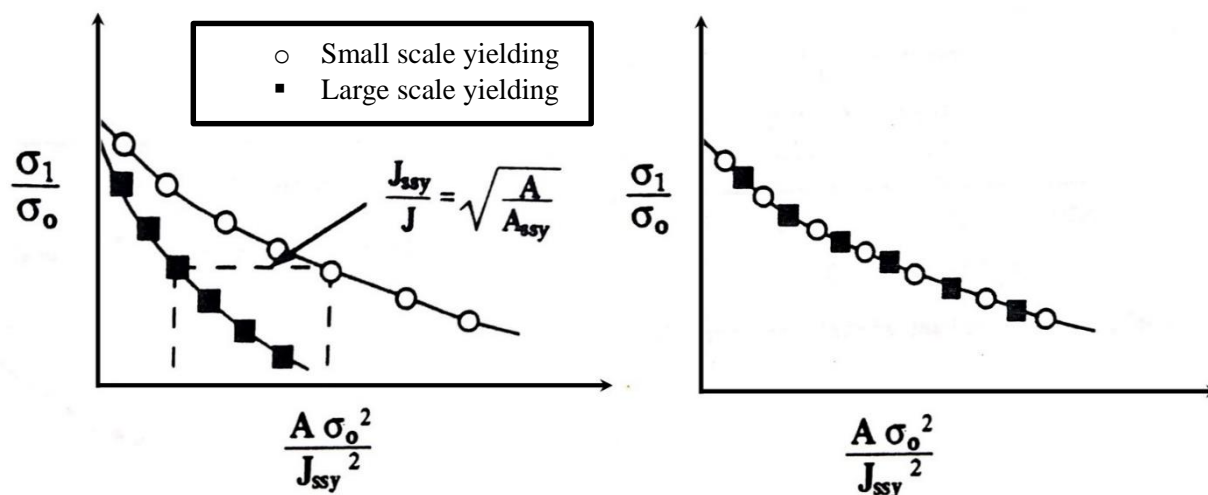
Slika 6.12 Poređenje fitovanih krivih predviđanja sa različitim parametrima oblika u linearnoj (a) i logaritamskoj (b) razmeri [94]

Ipiña i koautori [95] upravo ukazuju na potrebu za jasnijom vezom Weibulovog parametra oblika i parametara mehanike loma  $K$  ili  $J$ , bolje objašnjenje efekta veličine ispitivanih uzoraka i validaciju iste definisane standardom, kao i validaciju modela koji se zasniva samo na primeni statističke analize bez uzimanja u obzir stepena ometenosti deformacije ukoliko se koristi *master curve* pristup koji je kasnije ušao u standard ASTM 1921 [45].

## 6.6 UTICAJ STEPENA OMETENOSTI DEFORMACIJE (GUBITKA GRANIČNIH USLOVA)

Kao što je razmatrano u prethodnom delu ove glave, veliko rasipanje dobijenih rezultata u području prelazne temeprature moguće je tretirati i obrađivati statistički u cilju razumevanja ponašanja materijala u ovom osetljivom temperaturnom intervalu. To se pokušalo mnogim statističkim modelima, a deo tih radova prikazan je u okviru prethodnog poglavlja ove glave. Međutim statisčkim modelima često se ne pokrivaju svi dobijeni rezultati ispitivanja. Još jedan od efekata i niza predloženih modela koji definitivno treba spomenuti i koji može ograničiti rasipanje rezultata, a koji je u direktnoj korelaciji sa veličinom isptivanih  $C(T)$  ili Šarpi epruveta, je stepen ometenosti deformacije, odnosno gubitak graničnih uslova ispitivanih epruveta tokom ispitivanja, odnosno uticaj raspodele naponskog stanja oko vrha prsline. U tom slučaju statistički modeli ne važe za sve rezultate ispitivanja. Predloženi su modeli koji imaju uticaj na smanjanje rasipanja rezultata ispitivanja i zasnivaju se na uvođenju i definisanju vrednosti  $J$ -integrala u uslovima srazmerno malog tečenja (eng. *small scale yielding* – *ssy*) koji se često u literaturi sreće pod nazivom  $J_{ssy}$  ili na uvođenju korektivnog faktora  $\beta_{lc}$  proračuna faktora intenziteta napona ili  $J$ -integrala.

Landesov prvobitni zaključak u gore obrađenoj studiji [81] je da uzorci sa niskim stepenom ograničene deformacije imaju nižu žilavost nego uzorci sa visokim stepenom ograničene deformacije. Kasnije u svojoj studiji pokazuje da ovo baš i nije slučaj i kao da demantuje sam sebe. Ovaj uticaj se razmatra indirektno ili direktno kroz statističku analizu raznih istraživanja. Pojedine studije su se bazirale na tome da se ispita tj. nađe model koji neće uzimati u obzir stepen velike deformacije. Ideja je bila da se ograniči stepen velike plastične deformacije tako da se smatra zanemarljivom, poput Anderson-Dods modela [96], čiji su tvorci uzimajući u obzir veličinu isptivanih epruveta tražili upravo nezavisnost rezultata od veličine deformacije, odnosno uslove pod kojima stepen ometenosti deformacije (eng. *constraints effect*) nema nikakav uticaj na dobijene rezultate. Došli su do zaključka da u slučaju  $J$  kontrolisanog loma SE(B) ili C(T) uzorka je potrebno da veličina uzorka bude barem 8 puta veća od one koje predlaže tadašnji standard ASTM E 813-87, a predlažu dalji tok studije da bude usmeren ka istraživanju uticaja debljine uzoraka u cilju dobijanja odgovarajućeg modela. U svojoj studiji ukazuju na to da sa povećanjem plastične zone, tačnije tečenja, uslovi srazmerno malog tečenja (u daljem tekstu, uslov *ssy*) više ne važe i nije moguće tretirati vrednost  $J$ -integrala kao u slučaju da uslov *ssy* važi (slika 6.13). Ova vrednost  $J$  integrala koja nema uslove *ssy* ispunjava uslove velikog srazmernog tečenja (eng. *large scale yielding*) i nema isti potencijal za izazivanje loma cepanjem kao vrednost  $J$  u uslovima *ssy*. Korekcija  $J_{ssy}$  je veća sa većom vrednošću dobijene  $J_c$  ili ako je dimenzija uzorka mala (debljina i širina). Ovaj kriterijum se zasniva na ravanskim dimenzijama uzorka.



Slika 6.13 Definicija efektivne vrednosti  $J$ -integrala u uslovima *ssy* ( $J_{ssy}$ ) [96]

Jedan od radova u kojem se predlaže korekcija u cilju eliminacije uticaja stepena deformacije, a time i uticaj na naponsko stanje, je još jedna studija Andersona [97] u uslovima srazmerno velikog tečenja u funkciji  $J$ -integrala i parametra CTOD u cilju karakterizacije naponskog polja oko vrha prsline.

Drugi kriterijum, ili model, predložen u cilju smanjenja rasipanja dobijenih rezultata u području prelazne temperature koji je započeo Irvin [98], a kasnije razvio Merke [99], je korekcija dobijenih rezultata korektivnim faktorom  $\beta_{Ic}$ . Ovaj kriterijum je empirijski i zasniva se na pretpostavci da je rasipanje rezultata posledica nedovoljne debljine uzoraka u cilju dobijanja validne vrednosti  $K_{Ic}$  u uslovima RSD. Postupak se zasniva na analizi  $J$ -integrala za lom cepanjem (u sledećim relacijama označen kao  $J_{fc}$ ) u cilju procene  $K_{Ic}$ . Izrazima (6.5-6.8) je predstavljen metod za dobijanje ovog korektivnog faktora.

$$K_{Ic} = \sqrt{J_{fc} E'} \quad (6.5)$$

Iz prethodne relacije dobija se veza između  $K_{Ic}$  i  $J$ -integrala potrebnog za lom cepanjem, odavde se dobija  $\beta_c$  izrazom (2.15).

$$\beta_c = (K_{Ic} / \sigma_{YS})^2 / B \quad (6.6)$$

gde je  $\sigma_{YS}$  predstavlja vrednost napona tečenja, a  $B$  je debljina uzorka.

Empirijski izraz koji povezuje  $\beta_c$  i  $\beta_{Ic}$  je:

$$\beta_c = \beta_{Ic} (1 + 1.4 \beta_{Ic}^2) \quad (6.7)$$

Veza  $\beta_{Ic}$  i  $K_{Ic}$  je predstavljena izrazom (6.8).

$$\beta_{Ic} = \frac{\left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{YS}} \right)^2}{B} \quad (6.8)$$

MekKabe i koautori [100] razvili su i prikazali svoj metod i celokupnu proceduru za ispitivanja žilavosti loma u području prelazne temperature. Step en ometenosti deformacije tj. elemnicija iste (ako se može tako reći) urađena je uvođenjem gore opisanog korektivnog faktora i kreterijuma u cilju smanjenja rasipanja rezultata nekoliko prethodno urađenih studija. U svojoj studiji su odredili vrednosti korektivnog faktora  $\beta_c$  u zavisnosti od debljine ispitivanih uzoraka. Ukazali su na ograničenja primene ovog kriterijuma, naričito primenom „modela najslabije karike“. Nešto više o uticaju stepena ometenosti deformacije, ograničenjima u ispitivanjima feritnih čelika, ali i nekih nemetalnih materijala, može se naći u preglednom izveštaju K. H. Švalbea i njegovih kolega [101] u kome su dali kratke opise zavisnosti dimenzija C(T) epruveta na ovaj opisani efekat.

Novija istraživanja u ovom polju zasnivaju se na lokalnom pristupu primene metode konačnih elemenata. Pregledan rad Pluvunaža i kautora [102] prikazuje istraživanja koja obuhvataju granične uslove i gradijenta napona u pristupu preslikavanja žilavosti loma. Definisani su različiti parametri graničnih uslova sa odgovarajućom diskusijom. Analizirani su i faktori koji utiču na granične uslove ispitivanih uzoraka. Posebna pažnja je posvećena aktuelnim trendovima u primeni plastičnih veza kod primene glavne ili master krive (eng. *master curve*) koja je ranije pomenuta u slučaju loma materijala i master krive prelazne temperature materijala (eng. MTTMC). U radu je takođe obrađen uticaj napona ispred vrha prsline na putanju prsline i na granične uslove izvan ravni i uticaj debljine ispitivanih uzoraka na žilavost loma. Proučena je prikazana upotreba plastičnosti sa gradijentom i relativni gradijent napona u lokalnom pristupu loma. Od ostalih radova u ovom polju može se izdvojiti rad u kojem je, pored analize graničnih uslova i stepena ometenosti deformacije, prikazan i

uticaj ovih efekata na određivanje referentne temperature (prema standardu ASTM 1921) kod feritnih čelika [103], rad Gaoa i Dodsa [104] koji istražuju uticaj gubitka graničnih uslova i dužine fronta prslina na lom cepanjem feritnog čelika u prelaznom režimu primenom lokalnog prisupa itd.

Jedan sveobuhvatni sažeti prikaz komplektnog istorijskog razvoja ovog fenomena koji se tiče stepena ometenosti deformacije ispitivanih uzoraka u prelaznom temperaturnom režimu je dao u svojoj knjizi Andersona [105], od prvobitnih studija do primene dosadašnjih korekcija i modela primenom metode konačnih elemenata. Po Andersonu se teorijska istraživanja u ovoj oblasti mogu podeliti u dva generalna pristupa: pristup kontinuuma i primeni mikromehaničkih modela.

Ono što se može zaključiti iz prethodno pomenutih studija je da kriterijum korekcije  $\beta$  ima veću fundamentalnu osnovu nego kriterijum  $J$ -integrala u uslovima  $ssy$  (odnosno, kriterijum  $J_{ssy}$ ), ali daje bolji efekat u smanjenju rasipanja rezultata ispitivanih uzoraka. Međutim, mana ovog kriterijuma je u tome što se zasniva da je ceo problem karakterizacije prelaznog temperaturnog polja samo i jedino nedostatak potrebne debljine uzorka, pa se na osnovu toga i radi korekcija, ponekad i nepotrebno, poput korekcije malih uzoraka u studiji koji nisu dali nikakve rezultate [81, 83]. Drugi problem je u tome što primenom „najslabije karike“ u opisivanju loma cepanjem kriterijum  $J_{ssy}$  statistički nije podržan [81], tačnije, statistički nijednom raspodelom nije moguće pokriti ovaj efekat i time opisati efekat dimenzije uzoraka i pokriti uticaj gubitka graničnih uslova. Drugi pak kriterijum je čisto empirijski, pa se stoga nameće zaključak da nijednom od gore opisanih modela nije uvek moguće opisati gore pomenute efekte, čime i ovi modeli imaju određena ograničenja.

## 6.7 UTICAJ VELIČINE STRUKTURE I SKALIRANJE

Ovo poglavlje delimično predstavlja na neki način uvod poglavlja 6.1, jer će ovde biti kratkog osvrta generalno na studije koji se tiču uticaja veličine krutih i kvazi-krutih struktura. Razlog zbog čega ovo poglavlje dolazi kasnije u odnosu na 6.1 je to što je u ovom predstavljen kratak istorijski osvrt na uticaja veličine (eng. *size effect*) generalno čvrstih tela (među kojima su strukture od metala, keramike, betona, stakla itd.). Uticaj veličine je uočen još odavno, kada današnje poznate naučne discipline nisu bile prepoznate i razvijene i jednostavno se ovaj efekat nije mogao na jednostavan način objasniti. Ovaj uticaj je još prvi uočio Da Vinči ispitivanjem čvrstoće kanapa, tj. uočio je da čvrstoća i izdržljivost kanapa zavisi od dimenzija istog [106, 107]. Iako je u početku opovrgnuta Da Vinčijeva ospervacija, Mariot je dao dodatni doprinos ovoj teoriji, za koju se može reći da predstavlja osnovu za izučavanje ove pojave i postavio bazu za njeno statističko tumačenje. Kasnije, u 20. veku Grifit je eksperimentalnim ispitivanjem stakla uočio zavisnost između nominalnog napona i prečnika staklenih vlakana u strukturi stakla (pri manjem prečniku staklenih vlakana opterećenje koje izaziva lom je veće [28]). Tada je tu pojavu objasnio uticajem grešaka ili diskontinuiteta, odnosno „slabim mestima“, jer usled gusto pakovanih vlakana verovatnoća pojava diskontinuiteta je manja. Upravo ovo predstavlja osnovu za gore pomenuti princip „najslabije karike u lancu“ koji je razvijen od strane Vejbula [108], a potom modela zasnovanih na ovom principu predloženih od strane Landesa, Andersona, MekKabea, Valina i prethodno pomenutih u ovoj glavi u studijama koji se tiču feritnih materijala na niskim temperaturama, naročito u prelaznom režimu. Ova forma promene i statističke obrade postaje univerzalna i (sve)prisutna u velikom broju inženjerskih problema i dan danas. Mehanika kao naučna disciplina nije davala do relativno skoro (tek od kraja '70ih godina 20. veka) mnogo na značaju uticaju veličine struktura i nije je povezivala (preciznije, prepoznavala ovaj uticaj) na karakteristike istih, odnosno karaktersitike materijala. Razlozi za ignorisanje uticaja veličine na strukture potencijalno leži u dobro definisanim teorijama elastičnosti i plastičnosti čvrstih tela, koji pružaju informacije o granicama napona, tačnije graničnim vrednostima napona koji ne zavise od veličine strukture [106]. Time, preko karaktersitilnih vrednosti napona za određene materijale, donekle su jasno definisane i oblasti elastičnosti i oblast plastičnosti.

LEML se zasniva na principima koji se razlikuju od principa klasične mehanike, poput zakona otpornosti materijala. Npr., proračun nominalnih napona se svodi na količnik opterećenja i poprečnog preseka za nosač neke konstrukcije bez prisustva prslina, dok se u slučaju prisustva prslina primenjuju

principi mehanike loma. Čvrstoća materijala nije prepoznata od strane LEML kao parametar materijala, a za proces loma se pretpostavlja da se odvija u jednoj tački. Dimenzije i veličine strukture, kao i veličina same prsline, u velikoj meri diktiraju njegovo ponašanje prilikom opterećivanja. I upravo je zbog toga uticaj veličine strukture našao najjače uporište u mehanici loma, poput studije Bažanta [109].

Krajnji cilj studija sa ovom problematikom je izrada modela ili određene procedure kojim bi se najbolje opisao uticaj veličine krtih ili kvazi-krtih struktura ili tela, a najčešće je u studijama predmet ispitivanja bio beton, upravo zbog njegovog krtog ponašanja, mada se mogu naći i drugi materijali [109]. Beton je, kao što je rečeno krt, i pokazuje drugačije mehaničke karakteristike u zavisnosti od dimenzija, što je izuzetno važno u građevinarstvu. Usledio je čitav niz studija, odnosno karakterizacije krtih i kvazikrtih tela ili struktura (najčešće na primerima betona), primenom principa LEML poput studija Kaplana, Velča, Dagdejla i mnogih drugih, sažetih ili predstavljenih u literaturi poput [35, 106, 110, 111]. Hilerborg i njegove kolege [112] koristili su metod konačnih elemenata i predstavili su različite tipove ovog fenomena na kvazikrte materijale. Pored prethodno navedenih, u izučavanju ovog efekta na promenu čvrstoće i žilavosti struktura mogu se izdvojiti studije Karpinterija [113, 114] itd.

Vejbulova funkcija je pogodna za modeliranje sigmoidnih i obrnuto-sigmoidnih obrazaca odziva solida, odnosno čvrstih tela i struktura [115], koji su veoma slični promenama parametara mehanike loma (poput parametra  $K$  ili  $J$ -integrala). Štaviše, jedan od problema koji su prikazan u prethodno pomenutom radu je prelaz iz krtog u žilavo ponašanje strukture sa promenom brzine deformisanja. Analize uticaja veličine strukture čvrstih tela imaju za cilj predviđanje ponašanja ili predikciju karakteristika struktura različitih dimenzija. Bažant je dao izuzetan doprinos izučavanju ove pojave u mehanici solida. Među prvima je uočio zakone ovog uticaja veličine analizom struktura od betona sa prslinom u predviđanju nominalnih napona pri lomu većih struktura na osnovu skaliranja [109]. Time je dokazao da se ovaj problem rešava principima mehanike loma. Kasnije su Bažantovi uočeni zakoni ušli u određene standarde i preporuke poput [116]. Ono što je suštinski važno za analizu uticaja veličine u svim studijama da se zasnivaju na geometrijski sličnim uzorcima (eng. *geometrically similar structures*) karakterističnih veličina strukture. Radi pojašnjenja, samo u tom slučaju, u slučaju geometrijski sličnih uzoraka, se to definiše (primer je  $C(T)$  epruveta i odnos karakterističnih veličina debljine epruvete i efektivne širine epruvete  $B/W$ , koji definiše istovremeno uslove RSD i RSN). Prethodno pomenuta predikcija karakteristika (ili konkretno traženih parametara) neke strukture se postiže skaliranjem podataka, odnosno skaliranje podataka u novom prostoru. Skaliranje podataka se radi i u cilju dobijanja preklapanja krivih verovatnoće (eng. *collapse of the probability curves*). Potpuno preklapanje krivih kumulativne raspodele za različite veličine uzoraka nije moguće ako ih odlikuju različiti Vejbulovi parametri oblika (Vejbulovi moduli). Zato se u teoriji faznih prelaza „kolapsiranje“ krivih vrši u okolini kritičnih tačaka. U zavisnosti od ispitivanog materijala, tačka krive koja je smatra kritičnom može biti različita. U literari je moguće naći, poput studije Timara [117], „kolapsiranje“ krivih verovatnoće u okolini prevojne tačke (eng. *inflection point*). Neki primeri skaliranja podataka sa dobrim poklapanjima sa eksperimentalnim podacima su mogu videti u radovima Lei-a i saradnika [118] i Geneta njegovih saradnika [119], koji su imali i par interesantnih zapažanja vezanih za skaliranje u slučaju primene modela „najslabije karike“ na njihovom primeru predikcije i krivama verovatnoće loma.

Neki od problema skaliranja, naročito kvazi-krtih struktura su problemi asimptotskih vrednosti uočeni od strane Bažanta [120]. Zaključio je da je ponekad veoma teško odrediti opseg veličina strukture ili tela za koju skaliranje ima praktični značaj. Jedino u slučaju veoma malih i veoma velikih struktura je ovo moguće odrediti, dodaje Bažant u zaključku.

## 7 EKSPERIMENTALNI DEO I VEROVATNOĆE LOMA

Plan sveobuhvatnih eksperimentalnih ispitivanja u ovoj disertaciji se može podeliti u dva dela:

1) Ispitivanje loma cepanjem C(T) epruveta feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55 na ispitnoj temperaturi od  $-60^{\circ}\text{C}$ . Ispitivane su tri vrste epruveta:

- 25 epruveta C(T)50, sa 2 debljine (20 i 25 mm)
- 12 epruveta C(T)100
- 2 epruvete C(T)200

Ispitivanje C(T)50 epruveta je urađeno sa dve brzine deformisanja:  $v = 0,02$  mm/min i  $0,5$  mm/min. Predviđanje ponašanja, tačnije verovatnoća loma cepanjem za veće ispitne uzorke (C(T)100 i C(T)200) je urađeno na osnovu Vejbulove dvo-parametarske raspodele verovatnoće i prikaza eksperimentalno dobijenih podataka u funkciji parametra dobijenih vrednosti  $J_c$ . Odgovarajući parametar  $J_c$  u funkciji loma cepanjem u području prelazne temperature se tretira kao slučajna promenljiva veličina i za ovu „slučajnu“ veličinu primenjeni su pojmovi i zakoni matematičke teorije verovatnoće. Statistički dobijene krive verovatnoće loma, odnosno verovatnoće vrednosti  $J_c$  pri lomu, koje predstavljaju predikciju, su direktno poređene sa eksperimentalno dobijenim vrednostima  $J_c$  ispitivanjem loma cepanjem većih C(T) epruveta. Pored toga, prikazani su i vrednosti parametra CMOD C(T)50 uzoraka manje debljine, kao i parametri  $\Delta a$ ,  $r_c$ ,  $z_c$ , vrednosti napona loma  $\sigma_f$  i normalizovanog rastojanja  $A$ . Ostali merodavni rezultati su dobijeni i analizirani ispitivanim C(T)50 epruvetama manje debljine.

2) Ispitivanja loma cepanjem C(T) epruveta feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55 na ispitnoj temperaturi od  $-90^{\circ}\text{C}$ . Ispitivane su dve vrste ovih epruveta:

- 16 epruveta C(T)50
- 1 epruveta C(T)200

Kod 7 epruveta C(T)50 inicijalna zamorna prslina je uneta zamaranjem sa visokom vrednošću praga  $\Delta K$  i manjim brojem ciklusa zamaranja, dok je 9 epruveta C(T)50 inicijalna zamorna prslina uneta sa nižom vrednošću praga  $\Delta K$  i većim brojem ciklusa zamaranja.

Ispitivanje svih uzoraka je izvedeno na komercijalnoj mehaničkoj mašini Zwick 200/20 kN namenjenoj za statička ispitivanja (princip *screw drive*) opremljena sa komorom za postizanje niskih temperatura. Brzina zadavanja opterećenja čeljusti tokom ispitivanja je označena za svaki uzorak. U cilju postizanja temperature od  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$  hlađenje je rađeno u komori sa tečnim azotom, dok je regulacija temperature sprovedena ventilnim regulatorom koji reaguje u slučaju promene temperature u komori. Merenje temperature je sprovedeno termometrom koji je povezan sa senzorom postavljenim na ispitivanom uzorku (u cilju postizanja boljeg kontakta senzora i ispitivanog uzorka kao medijum korišćena je kreda). Prilikom postizanja željene temperature u komori, ta temperatura je održavana u samoj komori pola sata (30 min) za svaki ispitivani uzorak u cilju ravnomerne raspodele temperature po celoj površini i zapremini uzorka. Merna ćelija kidalice je povezana sa A/D konvertorom koji prilikom izvođenja testa daje podatke u Voltima (V) u opsegu od  $-10$  do  $+10$  V. CMOD merač je preko A/D konvertora povezan sa računaru, a neposredno pre izvođenja eksperimenata uređena je kalibracija CMOD merača uz pomoć mikrometarskog kalibratora. U cilju dobijanja izlaznih dijagrama, računaru se zadaju kalibracioni faktori kN/V i mm/V.

Oba dela eksperimentalnih ispitivanja izvedena su i sprovedene prema odgovarajućem ASTM E1820 standardu [1]. Detaljnija objašnjenja u vezi same pripreme uzoraka će biti predstavljen u poglavlju 7.2 ove glave.

U daljem delu ove glave biće prikazani rezultati obe grupe ispitivanja. Deo rezultata iz ovog poglavlja objavljeni su radovima [121-123].

## 7.1 ČELIK 20MnMoNi 55

U cilju ispitivanja i dobijanja odgovora definisanih zadacima ove studije ispitane su C(T) epruvete osnovnog materijala feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55 čiji je hemijski sastav kao i mehaničke osobine dat u tabelama 7.1 i 7.2, respektivno. Ovaj čelik je namenjen za izradu opreme pod pritiskom i reaktore elektrana i kao što se može videti iz opisa njegove primene namenjen je za rad u ekstremnim uslovima. Kao što je i na početku glave 6 rečeno, studije Herensa i Landesa se predstavljaju temelj ove studije u cilju daljeg istraživanja i ispitivanja ovog materijala, kao i metode za manipulaciju podataka dobijenih rezultata. Uzorci su isečeni iz ploče. Ovaj čelik je sličan američkom čeliku iz serije oznake A533B.

Tabela 7.1. Hemijski sastav čelika 20MnMoNi 55 u procentima [61]

C	Si	Mn	Cr	V	Cu	Al	Ni	Mo	Co	As	Sb	Ti
0,19	0,2	1,29	0,12	0,02	0,11	0,015	0,8	0,53	0,014	0,030	0,03	0,05

Tabela 7.2. Mehanicke osobine ispitanog čelika na sobnoj temperaturi [61]

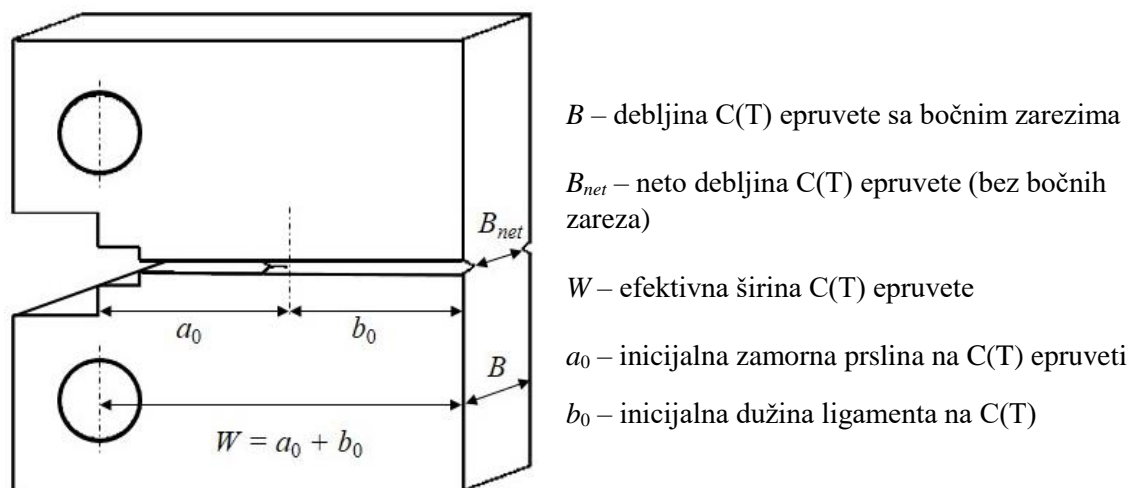
$\sigma_y$ - napon tečenja [MPa]	$\sigma_v$ – zatezna čvrstoća [MPa]	Izduženje [%]
450	610	16

## 7.2 PRIPREMA C(T) EPRUVETA ZA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Priprema epruveta C(T)50, C(T)100 i C(T)200 urađena je prema preporukama ASTM standarda [1, 49], počevši od izgleda epruvete do površinske obrade. Sve epruvete su urađene sa bočnim zarezima širine zarez 10% od debljine  $B$  sa obe strane. Svrha zarez 10% je da ispravi front prsline tokom rasta iste, a i da smanji (eliminise) nisku stopu triaksialne zone koja se nalazi na slobodnoj površini na krajevima uzoraka [14, 40]. Merenje dužine prsline je takođe problematično zbog fronta prsline, koji je po pravilu ima oblik nokta i dužina prsline je veća u sredini gde je plastična zona manja, a jedna od mogućnosti da se eliminiše ovaj problem je korišćenje epruveta sa bočnim zarezima. Ukoliko se koristi epruveta sa bočnim zarezima onda se umesto debljine  $B$  u proračunima koristi neto debljina  $B_{net}$ , (tj. debljina epruvete bez bočnih zarez 10%) (slika 7.1). Bočni zarez 10% na epruvetama su mašinski pripremljeni.

Svi pripremljeni uzorci ispunjavaju uslov potreban za RSD koji se svodi na zahteve „dovoljne debljine“ epruveta pomenute u glavi 4, odnosno zadovoljen je odnos karakterističnih geometrijskih veličina  $B$  i  $W$ . Pripremljene C(T) epruvete, kao što je poznato, su namenjene za ispitivanje zatezanjem i zadovoljavaju kriterijum dat relacijom (4.3), odnosno u konkretnom slučaju u ovoj disertaciji za sve veličine epruveta odnos  $W / B_{net}$  iznosi  $\geq 2,5$ .

Na slici 7.1 prikazan je izgled uzoraka C(T) epruveta sa bočnim zarezima sa karakterističnim veličinama i merama na samoj epruveti. U tabeli 7.3 dat je prikaz bitnih karakterističnih veličina svih tipova epruveta korišćenih u ovoj disertaciji.



Slika 7.1 Šematski prikaz izgleda C(T) epruveta sa karaktersitičnim veličinama

Tabela 7.3 Prikaz svih tipova C(T) ispitivanih epruveta u disertaciji sa karakterističnim merama

Tip epruvete	$B$ [mm]	$B_{net}$ [mm]	$W$ [mm]	$a_0 / W$
C(T)50	20 i 25	16 i 20	50	0,5
C(T)100	50	40	100	0,5
C(T)200	100	80	200	0,5

Na samim C(T) epruvetama pored mašinski unetih zareza unete su i inicijalne zamorne prsline zamaranjem na pulzatoru. Unošenje je urađeno na sobnoj temperaturi visoko frekventnom pulzatoru marke Instron u *load* kontroli, tačnije kontrolisanom promenom opterećenja. Fiksirane su vrednosti  $F_{max}$  i  $F_{min}$  dok je opseg  $\Delta K$  konstantan. Na C(T)50 epruvetama namenjene za ispitivanje na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ , kao i kod svih C(T)100 i C(T)200 epruveta, inicijalne zamorne prsline su unete visoko frekventnim pulzatorom sa definisanom  $\Delta K$  koji je iznosio  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , odnosno  $632 \text{ Nmm}^{-3/2}$ , dok se broj ciklusa zamaranja kretao u opsegu do 50-100 000.

C(T)50 namenjene za ispitivanje na  $-90^\circ\text{C}$  su imale posebnu pripremu. Kod 7 epruveta C(T)50 inicijalna zamorna prslina je uneta zamaranjem sa visokom vrednošću  $\Delta K$ . Ta vrednost je iznosila  $\Delta K = 1230 \text{ Nmm}^{-3/2}$ , odnosno  $38,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , dok je broj ciklusa zamaranja iznosio 36 500. Kod 9 epruveta C(T)50 namenjenih za ispitivanje na temperaturi  $-90^\circ\text{C}$  inicijalna zamorna prslina je uneta sa nižom vrednošću  $\Delta K$ . Ta vrednost je iznosila  $\Delta K = 492 \text{ Nmm}^{-3/2}$ , odnosno  $15,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , dok je broj ciklusa zamaranja bio 215 000. Opis unošenja inicijalnih zamornih prsline na epruvetama se može videti u radu [122]. Sve epruvete su nakon odgovarajuće pripreme opisane u o ovom poglavlju podvrgnute ispitivanju.

### 7.3 METODA STATISTIČKE OBRADRE REZULTATA

Verovatnoća loma uzoraka C(T) uzoraka u funkciji vrednosti  $J_c$  u ovoj disertaciji predstavljena je dvo-parametarskom Vejbulovom kumulativnom raspodelom raspodele (7.1). U ovoj relaciji  $P(J_c)$  predstavljena je verovatnoća da će pri nekoj vrednosti parametra  $J_c$  doći do loma C(T) epruvete. Fitovanje dobijenih krivih je izvršeno na osnovu eksperimentalno dobijenih verovatnoća loma uzoraka C(T)50 epruveta na ispitanim temperaturama unetih u logaritamski koordinatni sistem prema postupku i metodi prikazanim u petoj glavi ove disertacije.

Parametri fitovanih Vejbulovih raspodela su zatim izračunati analitičkim putem primenom metode najmanjih kvadrata tačnije, regresionom analizom koja je predstavljena relacijom (7.2). Kako je već napomenuto, u kumulativnoj funkciji raspodele (7.1) parametar  $\theta$  je Vejbulov parametar razmere i predstavlja vrednost  $J_c$  kada je  $P(J_c) = 1 - 1/e$ . Parametar  $\beta$  predstavlja parametar oblika



Vejbulove krive (tačnije, nagiba Vejbulove krive) koji je potrebno izračunati za svaku krivu. Oba ova parametra su izračunata za svaku krivu na osnovu rezultata ekseprimenata. Na osnovu rezultata C(T)50 epruveta urađene su krive Vejbulovih raspodela verovatnoće loma uzoraka C(T)100 i C(T)200.

Krive raspodele verovatnoće loma ovih većih uzoraka su dobijene su na osnovu izraza (7.3) gde  $B_1$  predstavlja neto širinu uzoraka ispitivanih ekspremimentalnim putem (u ovoj studiji i disertaciji C(T)50), dok  $B_2$  predstavlja neto širinu većih uzoraka za koje se radi predikcija loma (u ovoj disertaciji C(T)100 i C(T)200).  $J_{B_1}$  predstavlja skup vrednosti dobijenih  $J_c$  manjih uzoraka (C(T)50 uzoraka) na osnovu čijih su dobijene tačke kumulativne raspodele, tačnije predikcije za veće epruvete. Korišćenjem sve tri jednačine dobijeni su grafici Vejbulove raspodele i predikcije koji će poslužiti za poređenje sa rezultatima ekspimentalnih ispitivanja. Verovatnoća sa kojom se predloženi zakoni raspodele mogu prihvatiti ili odbaciti određena je primenom Kolomogorov-Smirnov statističkog testa [69, 124] koji je takođe urađen za svaku krivu koja ima dovoljan broj tačaka krive. Proračuni na osnovu prethodne tri relacije su urađeni u programskom paketu Mathematica Wolfram 12.0 [125].

$$P(J_c) = 1 - e^{-\left(\frac{J}{\theta}\right)^\beta} \quad (7.1)$$

$$P_i = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad (7.2)$$

$$J_{B_2} = J_{B_1} \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (7.3)$$

Dobijeni i rezultati iz prvog dela studije poslužili su za skaliranje dvo-parametarskih krivih verovatoće loma cepanjem u cilju izučavanje uticaja veličina C(T) epruveta, čija će postupak biti prikazan u sledećoj glavi ove disertacije. Na osnovu vrednosti dobijenih parametara dvo-parametarske Vejbuloviih kumulativnih raspodela, prepoznata je skalirajuća forma [126] predstavljena izrazom (7.4), odnosno (7.5) za zavinost  $J$ -integrala (neka vrednost  $J_x$ ) od veličine epruvete preko efektivne širine  $W$  C(T) epruvete.

$$y = a + b \cdot x^{-c} \quad (7.4)$$

$$J_x(W) = J_x(\infty) + A \cdot W^{-1/b} \quad (7.5)$$

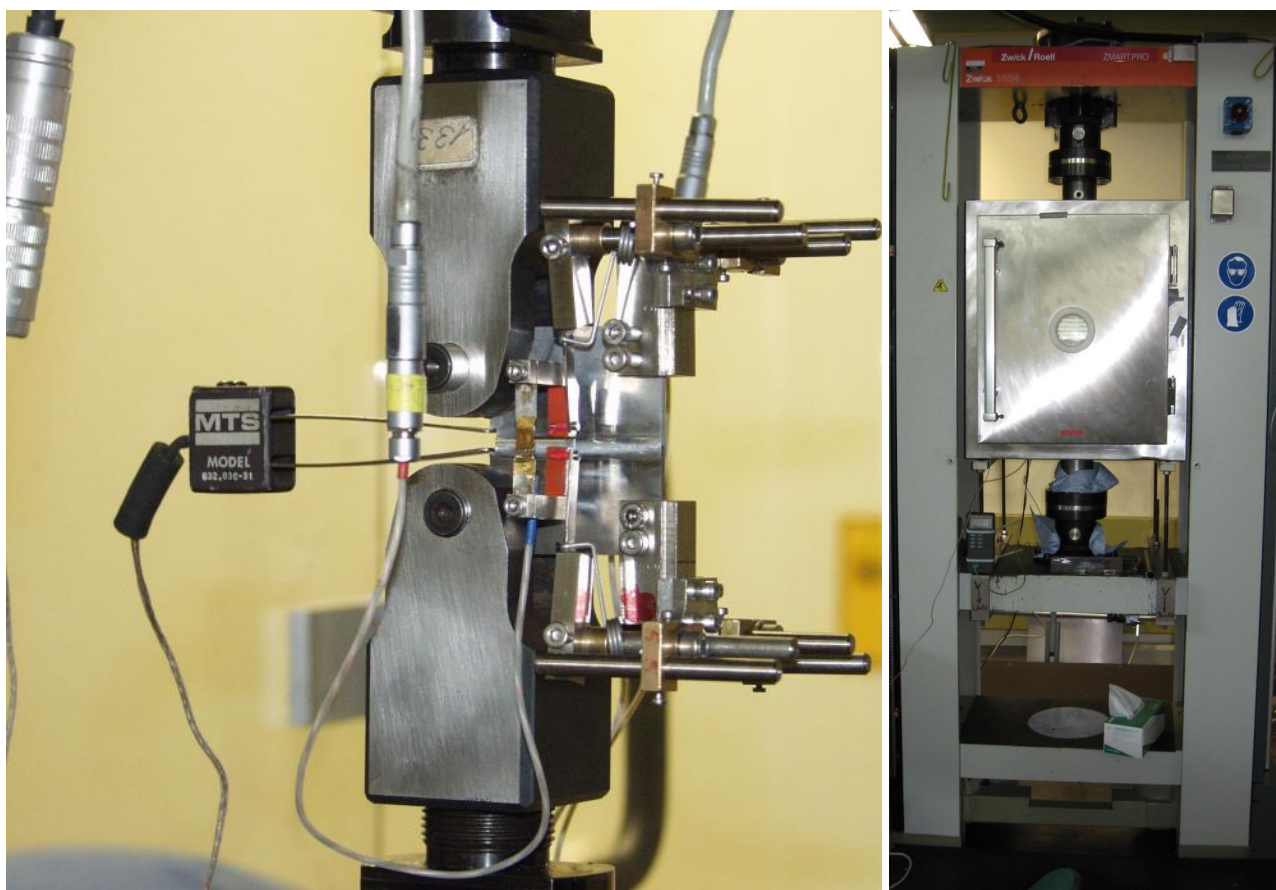
Cilj skaliranja je da se uvede eksplicitno i sistematski uticaj veličine C(T) epruveta u Vejbulovu krivu verovatnoće loma cepanjem na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ . Predloženi postupak skaliranja je prikazan u posebnom poglavlju sledeće glave ove disertacije.

## 7.4 PRVI DEO STUDIJE

### 7.4.1 Ispitivanje C(T)50 epruveta na temperaturi $-60^{\circ}\text{C}$ sa dve debljine

U ovoj disertaciji prvi deo studije je započeo ispitivanjem C(T)50 epruvete čelika 20MnMoNi 55. Ispitivane su dve serije epruveta različitih debljina. Epruvete su napravljene sa bočnim zarezima od 20% debljine uzoraka, kako je i objašnjeno na početku ove glave. Ispitivanje i određivanje vrednosti  $J_c$  je rađeno prema odgovarajućem standardu ASTM E1820 [1].

Ispitivano je 14 C(T)50 epruveta širine  $B = 25$  mm, pri čemu je  $B_{net} = 20$  mm bočnih zareza 2,5 mm sa obe strane. Drugi tip ispitivanih C(T)50 epruveta je širine  $B = 20$  mm, dok je  $B_{net} = 16$  mm i bočnih zareza 2 mm sa obe strane. Ispitivano je 11 uzoraka ove širine. Dakle, ukupno 25 epruveta C(T)50 sa 2 debljine. Ispitivanje je izvedeno na komercijalnoj mašini za ispitivanje kapaciteta 20 tona. Ispitivanje je urađeno na temperaturi od  $-60^{\circ}\text{C}$ . Prikaz eksperimentalne postavke jedne od ispitivane epruvete je prikazan na slici 7.2a. Brzina deformisanja (brzina zadavanja opterećenja čeljusti) ovih epruveta su bile 0,5 i 0,02 mm/min i u daljem tekstu će označena brzina deformisanja za svaki uzorak. U cilju postizanja temperature od  $-60^{\circ}\text{C}$  rađeno je hlađenje u komori sa tečnim azotom (slika 7.2b). Eksperimentalna postavka je takva da se za svaki uzorak dobija dijagram sila – CMOD (tačnije, pomeranje napadne tačke je jednako parametru CMOD).



a)

b)

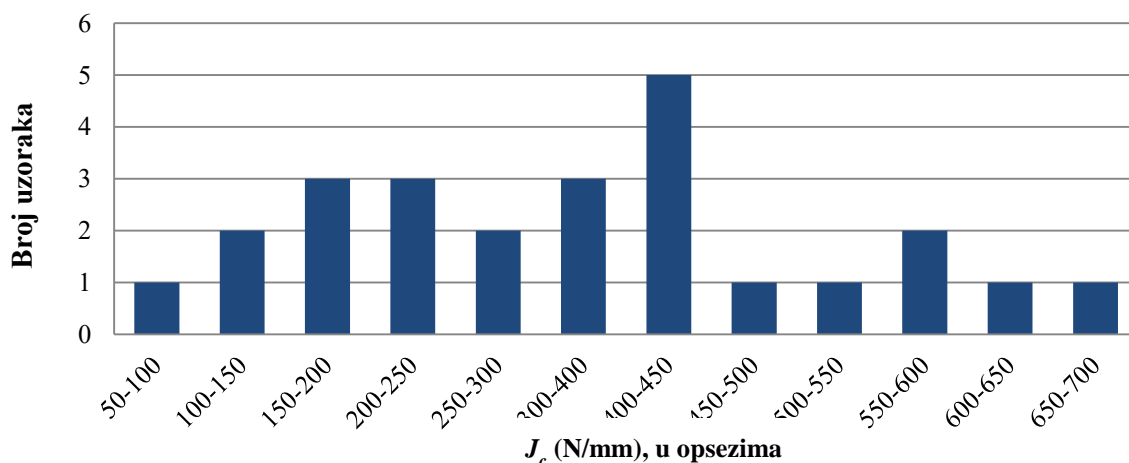
Slika 7.2 a) Eksperimentalna postavka ispitivanih C(T)50 epruveta; b) komora za hlađenje u cilju postizanja temperature od  $-60^{\circ}\text{C}$

U tabeli 7.4 prikazane su vrednosti  $J_c$  i ostalih merodavnih parametara ispitivanih uzoraka u ovoj seriji ispitivanja. Prikazane su i oznake uzoraka, kao i vrednosti brzina deformisanja. Vrednosti  $J_c$  su poredane u rastućem nizu.

Tabela 7.4 Vrednosti  $J_c$  ispitanih C(T)50 epruveta na  $-60^\circ\text{C}$ 

Redni broj	Oznaka uzorka	$J_c$ [N/mm]	$B$ [mm]	$B_{net}$ [mm]	Brzina deformisanja $v$ [mm/min]
1	C(T)50 UZ2	60,0	25	20	0,5
2	C(T)50 UZ7	120,0	25	20	0,5
3	C(T)50 UZ11	124,0	25	20	0,5
4	C(T)50 UZ1	168,0	25	20	0,5
5	C(T)50 UL4	178,2	20	16	0,5
6	C(T)50 UZ9	195,0	25	20	0,5
7	C(T)50 UL10	211,8	20	16	0,02
8	C(T)50 UZ5	215,0	25	20	0,5
9	C(T)50 UL7	241,2	20	16	0,02
10	C(T)50 UZ13	286,0	25	20	0,5
11	C(T)50 UL1	286,9	20	16	0,02
12	C(T)50 UZ3	304,0	25	20	0,5
13	C(T)50 UZ6	340,3	25	20	0,5
14	C(T)50 UL5	340,3	20	16	0,5
15	C(T)50 UL9	409,0	20	16	0,02
16	C(T)50 UL2	424,1	20	16	0,02
17	C(T)50 UZ14	434,0	25	20	0,5
18	C(T)50 UL3	447,5	20	16	0,5
19	C(T)50 UZ4	448,0	25	20	0,5
20	C(T)50 UL11	483,4	20	16	0,02
21	C(T)50 UZ10	518,0	25	20	0,5
22	C(T)50 UZ12	560,0	25	20	0,5
23	C(T)50 UL8	582,3	20	16	0,02
24	C(T)50 UZ8	630,0	25	20	0,5
25	C(T)50 UL6	660,8	20	16	0,004 i 0,5

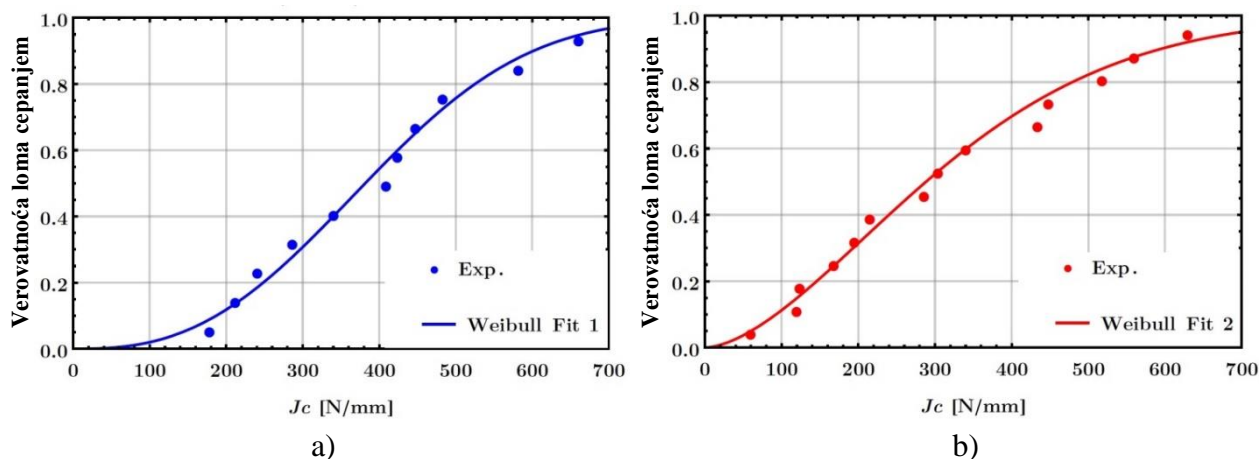
Iz table 7.4 se može uočiti rasipanje dobijenih vrednosti  $J_c$  za ispitane C(T)50 epruvete. Najviše uzoraka, čak 5, ima vrednost  $J_c$  u intervalu od 400-450 N/mm. Distribucija svih vrednosti u određenim rangovima je prikazana na slici 7.3.



Slika 7.3 Histogram dobijenih vrednosti  $J_c$  ispitivanjem 25 uzoraka C(T)50 epruveta na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$  u opsezima; kod 5 uzoraka je vrednost  $J_c$  u opsegu od 400-450 N/mm.

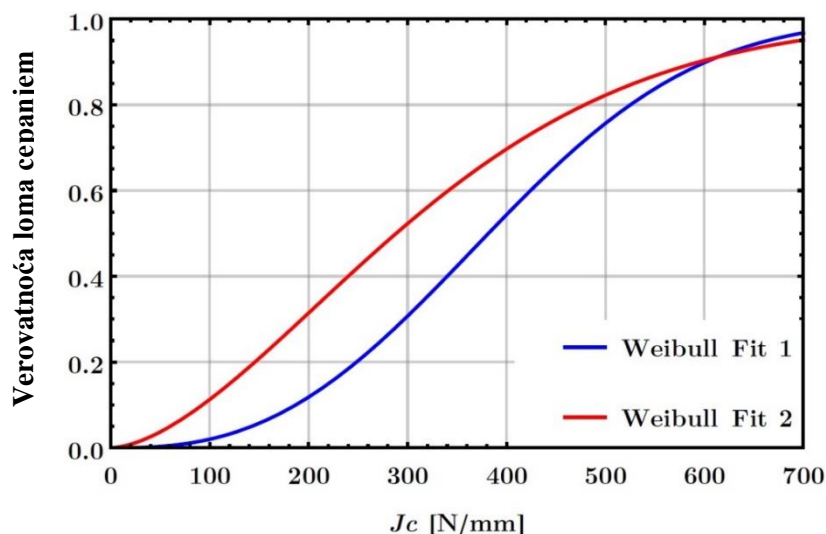
### 7.4.2 Verovatnoća loma C(T)50 epruveta na $-60^{\circ}\text{C}$ – uticaj debljine

Verovatnoća loma cepanjem uzoraka za obe debljine C(T)50 epruveta u funkciji vrednosti  $J_c$  predstavljena je dvo-parametarskom Weibulovom raspodelom (7.1). Na slici na slici 7.4 mogu se videti verovatnoće loma za dve debljine ispitivanih uzoraka. Verovatnoće loma cepanjem su urađene na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 7.4. Sa leve strane na slici 7.4a prikazana je raspodela verovatnoće loma za rezultate za  $B_{net} = 16$  mm, dok je sa desne strane, na slici 7.4b, prikazana raspodela za uzorke sa  $B_{net} = 20$  mm. Tačkice na krivama predstavljaju dobijene vrednosti  $J_c$  ispitanih epruveta. Fitovanje dobijenih krivih je urađeno korićenjem jednačina (7.1) i (7.2) analitičkim putem u programskom paketu Wolfram Mathematica 12.0 [125]. Naizgled, dve skoro identične krive kojima se mogu prikazati verovatnoće loma cepanjem ispitanih epruveta.



Slika 7.4 Eksperimentalno dobijene vrednosti  $J_c$  ispitivanih C(T)50 uzoraka na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$  i verovatnoće loma cepanjem: a) uzoraka sa  $B_{net} = 16$  mm u funkciji  $J_c$ ; b) uzoraka  $B_{net} = 20$  mm u funkciji  $J_c$

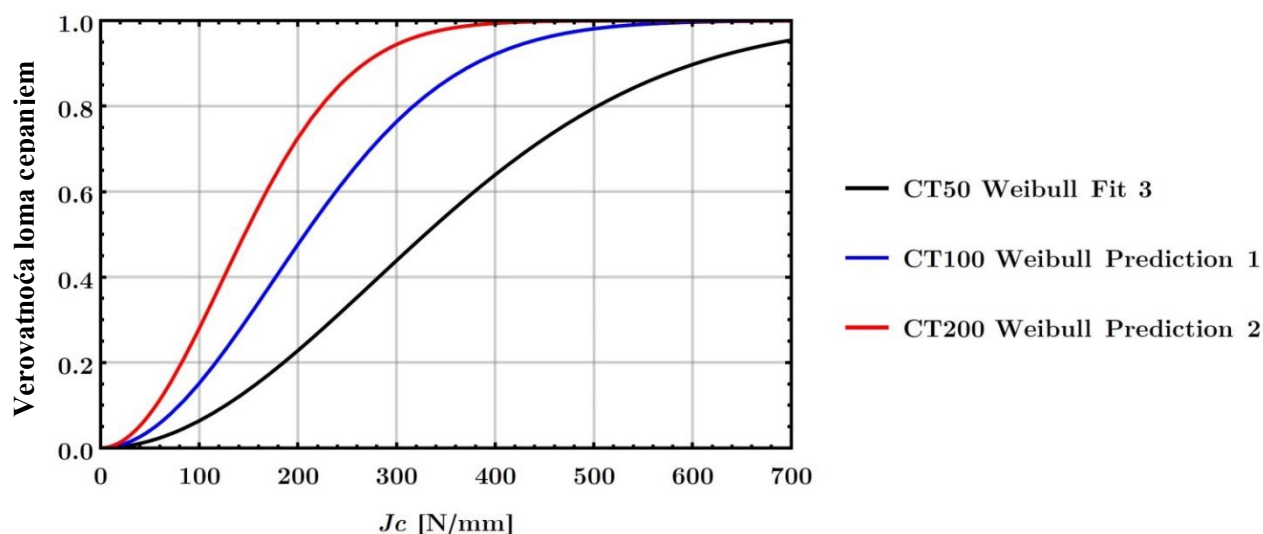
Na slici 7.5 prikazano je direktno poređenje dijagrama Weibulovih krivih verovatnoće loma cepanjem za obe debljine ispitanih C(T)50 epruveta prikazanih na slici 7.4. Na ovoj slici sa uporednim dijagramima se može uočiti uticaj debljine uzoraka iz iste serije. Naime, iz raspodele se može videti, naročito u delu gde su vrednosti  $J_c$  od 0 do 500 N/mm, da je veća verovatnoća loma za neku vrednost  $J_c$  debljih uzoraka, tačnije uzoraka  $B_{net} = 20$  mm, nego za debljinu od 16 mm pri istim uslovima uspitivanja. Međutim, za veće vrednosti  $J_c$  ovo očigledno ne važi.



Slika 7.5 Direktno poređenje Weibulovih krivih verovatnoće loma cepanjem za C(T)50 epruvete za obe ispitivane debljine na  $-60^{\circ}\text{C}$

### 7.4.3 Verovatnoća loma C(T)100 i C(T)200 epruveta na -60°C

Objedinjavanjem rezultata ispitanih C(T)50 epruveta i ponovnim fitovanjem Weibulove raspodele, dobijena je nova kriva verovatnoće loma cepanjem C(T)50 uzoraka u funkciji  $J_c$ . Ova nova kriva prikazana je na slici 7.6 crnom linijom. Na ovaj način je zanemaren uticaj debljine u okviru istih C(T)50 uzoraka u cilju predikcije verovatnoće loma cepanjem u funkciji  $J_c$  većih uzoraka, u ovom slučaju C(T)100 i C(T)200 epruveta na ispitnoj temperaturi od -60°C. Tačke Weibulovih krivih za C(T)100 i C(T)200 su dobijene uz pomoć relacije (7.3), gde  $B_1$  predstavlja neto debljinu u C(T)50 epruveta, uzeta kao vrednost od 20 mm, dok su  $B_2$  neto debljine C(T)100 i C(T)200 uzoraka, odnosno 40 mm i 80 mm, respektivno. Uzete su u obzir širine bočnih zarezata koje iznose po 5 odnosno 10 mm za C(T)100 i C(T)200 epruvete, respektivno. Ponovnim korišćenjem izraza (7.1) i (7.2) dobijene su krive verovatnoće loma prikazane takođe na slici 7.6.



Slika 7.6 Verovatnoća loma cepanjem u funkciji  $J_c$  C(T)100 (plava kriva) i C(T)200 (crvena kriva) uzoraka na osnovu krive objedinjenih rezultata C(T)50 (crna kriva) uzoraka na temperaturi -60°C

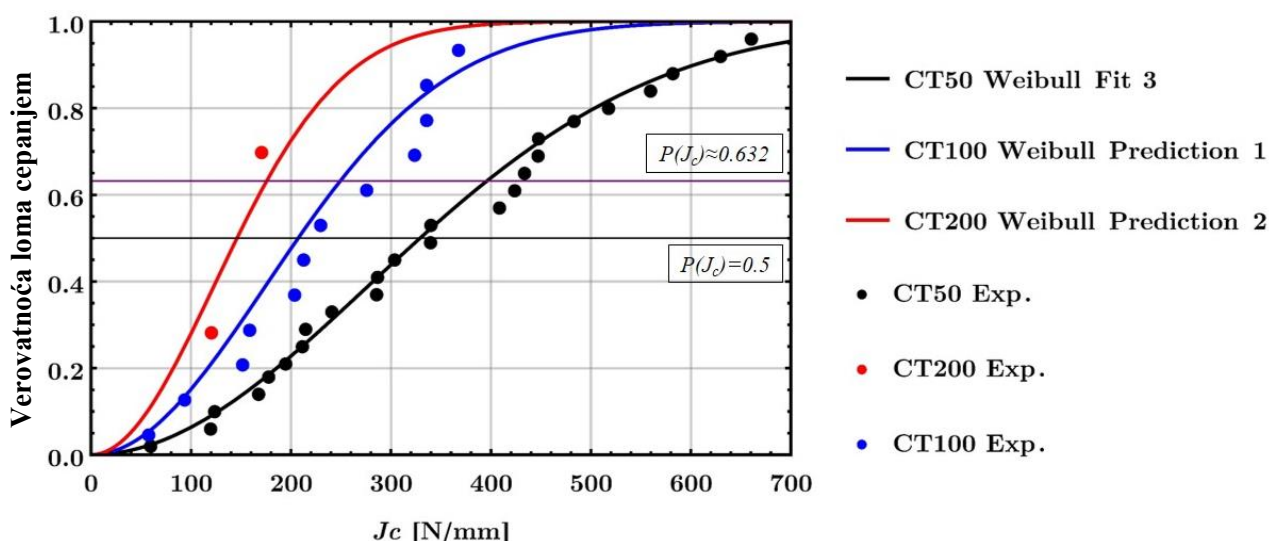
Dobijene verovatnoće loma cepanjem (krivih) za veće uzorke prikazane uz pomoć Weibulove raspodele u funkciji  $J_c$  pokazuju direktno uticaj veličine uzoraka na vrednosti ovog parametra pri lomu koje je moguće očekivati. Dakle, pri nekim vrednostima  $J_c$  za veće epruvete C(T)100 i C(T)200 bi trebalo biti veća verovatnoća loma cepanjem nego kod manjih epruveta. Ovo se može pripisati uticaju veličine uzoraka, jer je kod većih uzoraka veća verovatnoća nalaženja „slabije karike“, odnosno slabog mesta ispred vrha prsline u odnosu na uzorke manjih dimenzija, što utiče i na manje rasipanje rezultata (delimično prodiskutoavno u radovima [81, 82]).

### 7.4.4 Ispitivanje C(T)100 i C(T)200 epruveta na temperaturi -60°C

U cilju verifikacije prethodno dobijenih krivih predikcije i boljem uvidu u dobijene rezultate C(T)50 uzoraka, urađeno je ispitivanje 12 C(T)100 uzoraka, kao i dva C(T)200 uzoraka na istoj temperaturi -60°C u skladu sa preporukama standarda ASTM E1820 [1]. Ispitivanja su urađena kao i na C(T)50 uzorcima, u komori u kojoj je hlađenje urađeno azotom. Brzina deformisanja je iznosila 0,5 mm/min za C(T)100 uzorke, odnosno 1 mm/min za C(T)200 uzorke. Dobijene vrednosti  $J_c$  su prikazane u tabeli 7.5. Prikazane su i oznake uzoraka, kao i vrednosti brzine deformisanja tokom ispitivanja. Vrednosti  $J_c$  su poređane u rastućem nizu. Poređenje dobijenih vrednosti  $J_c$  ispitivanja C(T)100 i C(T)200 epruveta i predviđanja njihovih lomova cepanjem u funkciji  $J_c$  dobijenih Weibulovom raspodelom mogu se videti na slici 7.7. Na slici se mogu videti prave koje označavaju verovatnoće loma  $P(J_c)=0.5$  i  $P(J_c = \theta)=1-1/e \approx 0.632$  i time uočiti uticaj veličine uzoraka.

Tabela 7.5 Vrednosti  $J_c$  ispitanih C(T)100 i C(T)200 uzoraka na  $-60^\circ\text{C}$ 

Redni Broj	Oznaka uzorka	$J_c$ [N/mm]	$B_{net}$ [mm]	Brzina deformisanja $v$ [mm/min]
1	C(T)100 UR3	57,5	40	0,5
2	C(T)100 UR5	93,5	40	0,5
3	C(T)100 UR2	152	40	0,5
4	C(T)100 UR11	159,1	40	0,5
5	C(T)100 UR7	203,7	40	0,5
6	C(T)100 UR12	213,4	40	0,5
7	C(T)100 UR8	229,8	40	0,5
8	C(T)100 UR4	276,3	40	0,5
9	C(T)100 UR6	324,5	40	0,5
10	C(T)100 UR1	335,6	40	0,5
11	C(T)100 UR10	336,3	40	0,5
12	C(T)100 UR9	368,2	40	0,5
13	C(T)200 UT1	120,8	80	1
14	C(T)200 UT2	171	80	1

Slika 7.7 Poređenje Weibulovih krivih verovatnoće lomova cepanjem C(T)100 i C(T)200 uzoraka na osnovu krive za C(T)50 uzorke i dobijenih vrednosti  $J_c$  za C(T)50, 100 i 200 uzorke na  $-60^\circ\text{C}$ 

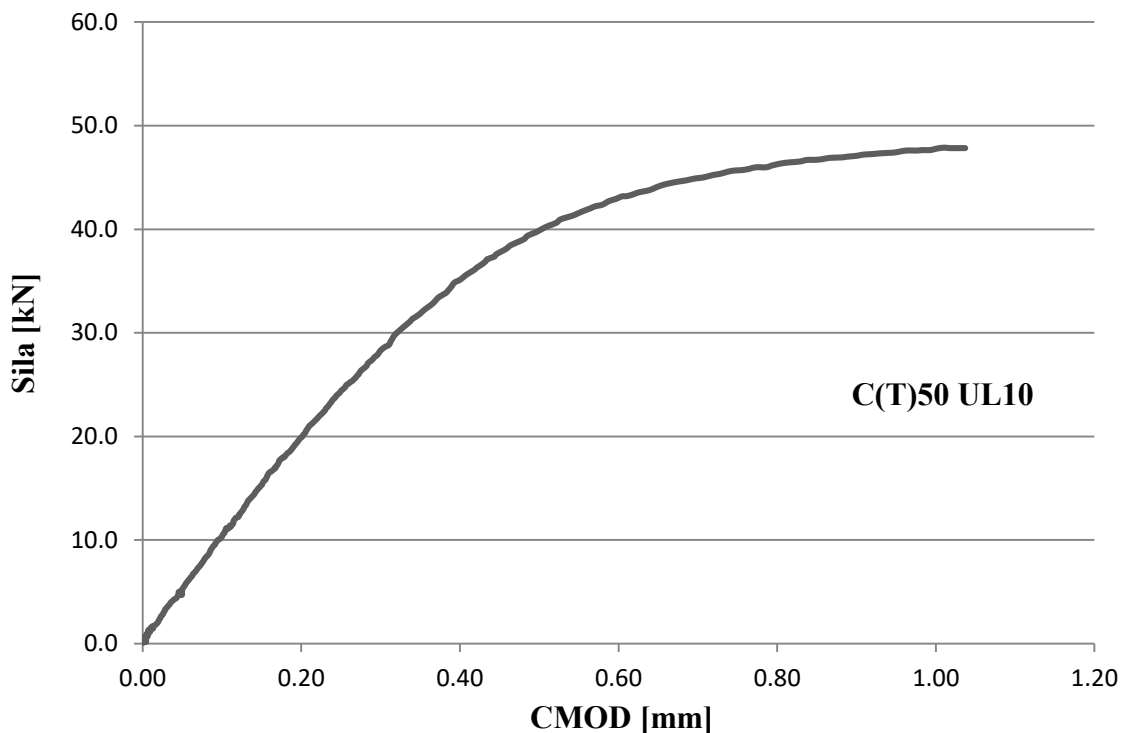
Na slici 7.7 označene su vrednosti  $J_c$  dobijene eksperimentalnim putem za C(T)50, 100 i 200, respektivno. Sa ove slike se može uočiti poprilično dobro poklapanje Weibulove krive predikcije za C(T)50 uzorke, dok je za C(T)100 to ne može reći, što se može pripisati malom broju statističkog uzorka.

## 7.4.5 Ostali rezultati prvog dela studije – ispitivanja C(T)50 epruveta manje debljine

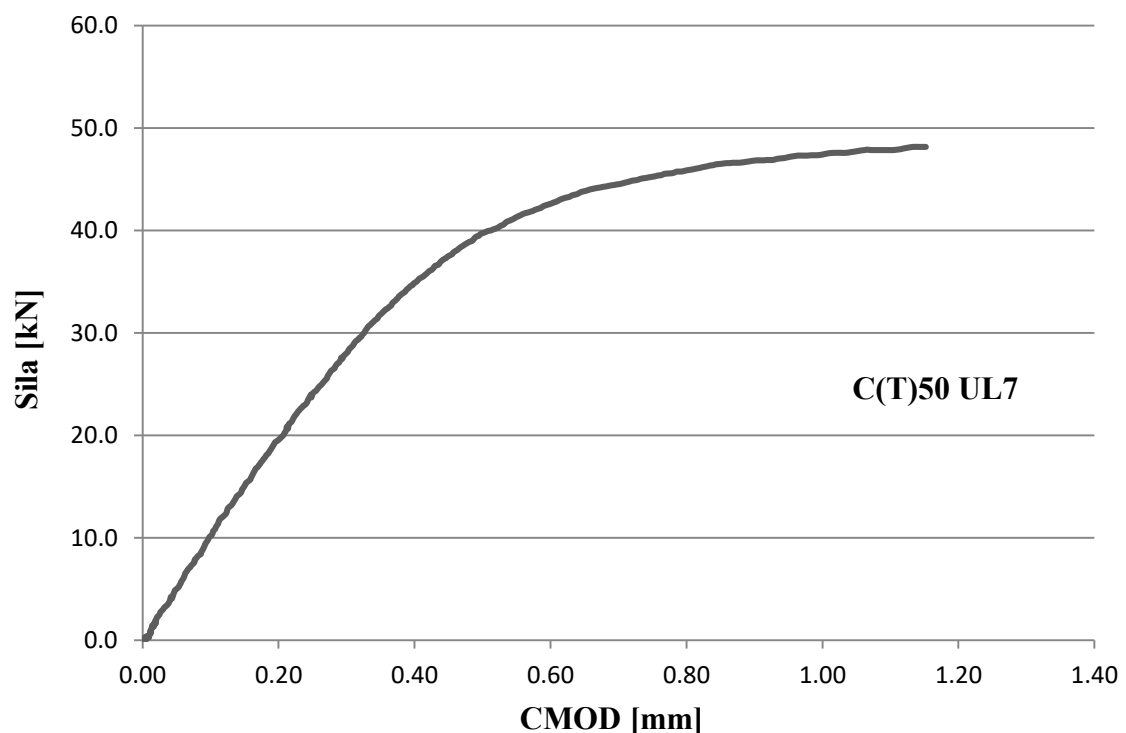
### 7.4.5.1 Dijagrami sila-CMOD uzoraka manje debljine

U ovom poglavlju prikazano je 9 dijagrama sila-CMOD ispitanih C(T)50 uzoraka debljine  $B_{net}$  od 16 mm ispitanih na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ . Opterećenja su nanošena kontrolisanim pomeranjem brzinama koje su date na slikama 7.8-7.17. Podsećanja radi, opterećenje je tokom ispitivanja zadato u vidu brzine deformacije. Nakon ispitivanja svakog uzorka standardne krive sila-CMOD su zapisane

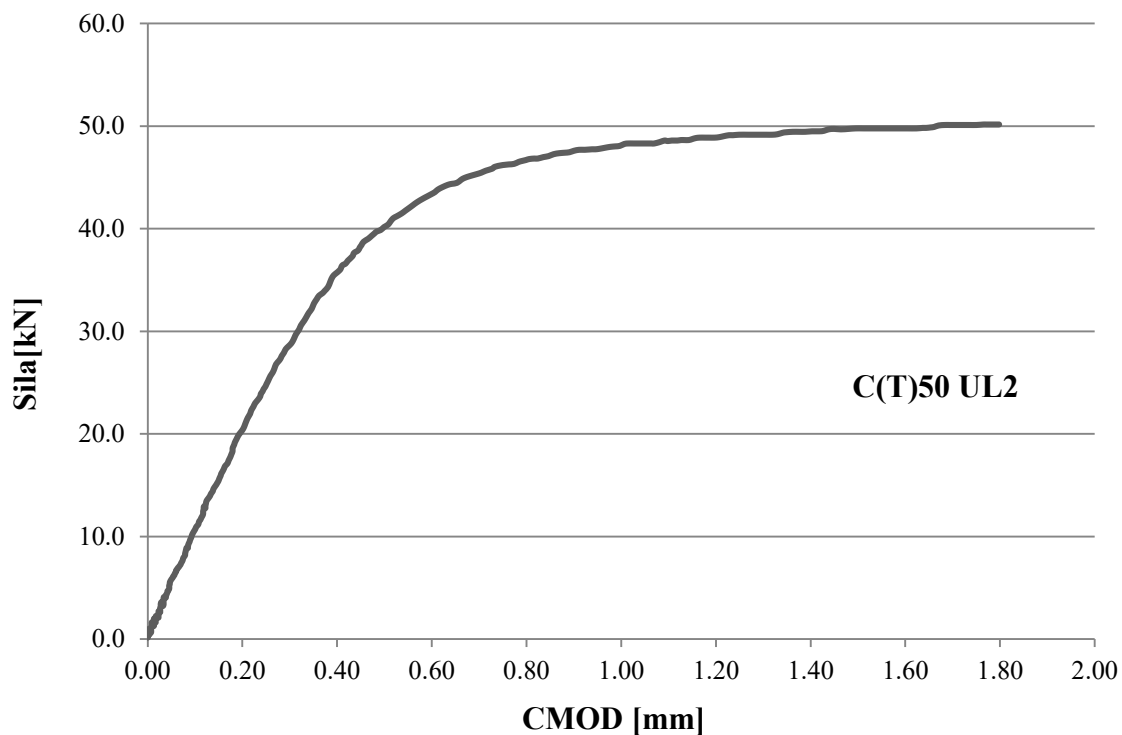
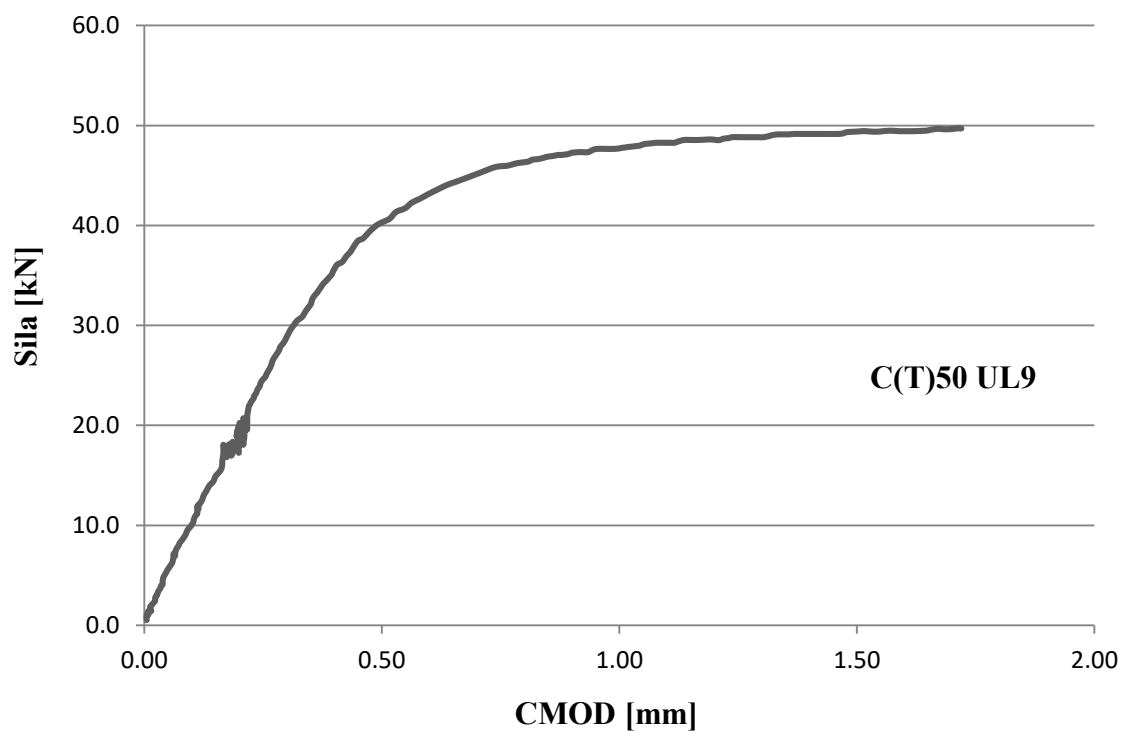
iz kojih su dobijene vrednosti vrednosti  $J_c$  koje su pomenute u prethodnom delu ove disertacije. Iz pomenutih dijagrama mogu se videti vrednosti CMOD za ovih 9 izabranih slučaja ispitivanja. Ovaj parametar meri se na slobodnoj površini prsline na mestu maksimalnog otvaranja i predstavlja ukupnu deformaciju (zbir elastične i plastične). Postavka aparature tokom ispitivanja je bila takva da je parametar CMOD jednak parametru pomeranju napadne tačke (eng. *load-line displacement*).



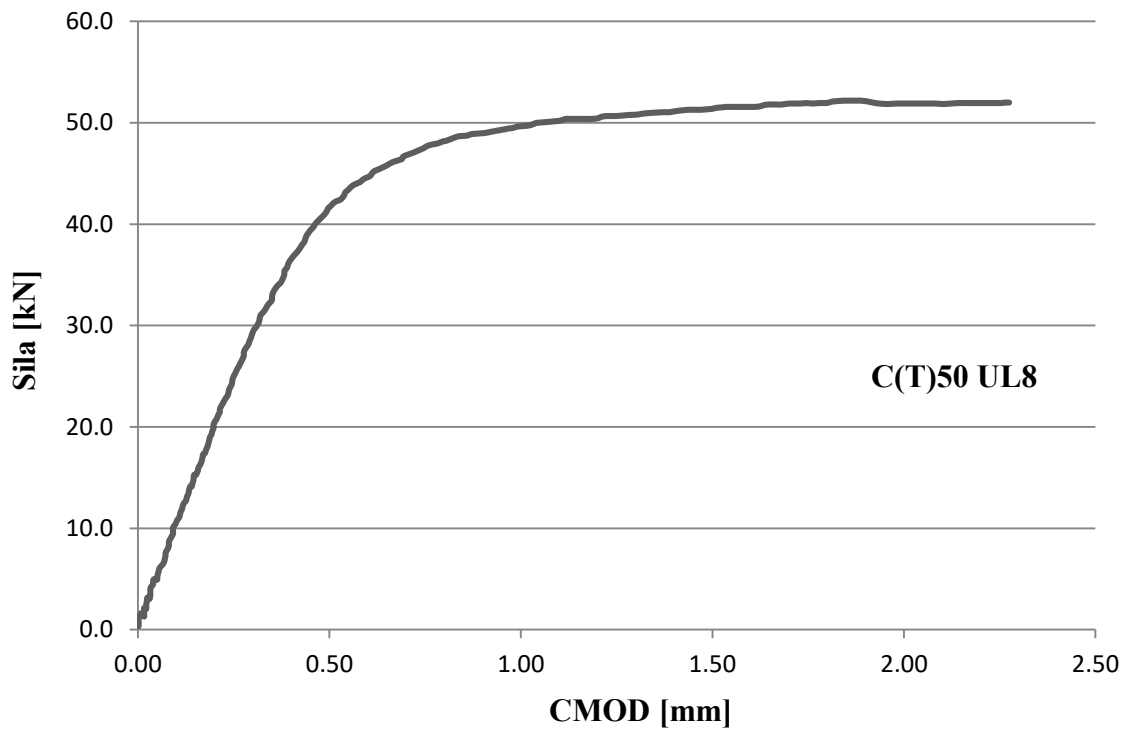
Slika 7.8 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL10 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/min



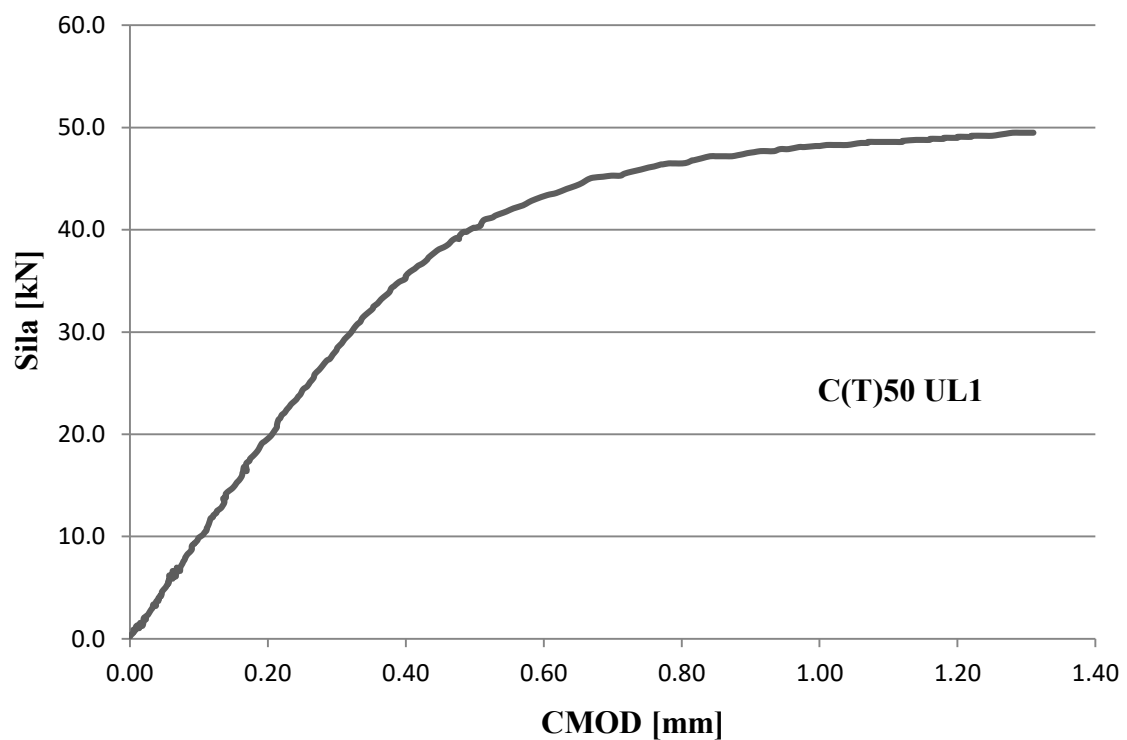
Slika 7.9 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL7 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/min

Slika 7.10 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL2 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/minSlika 7.11 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL9 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/min

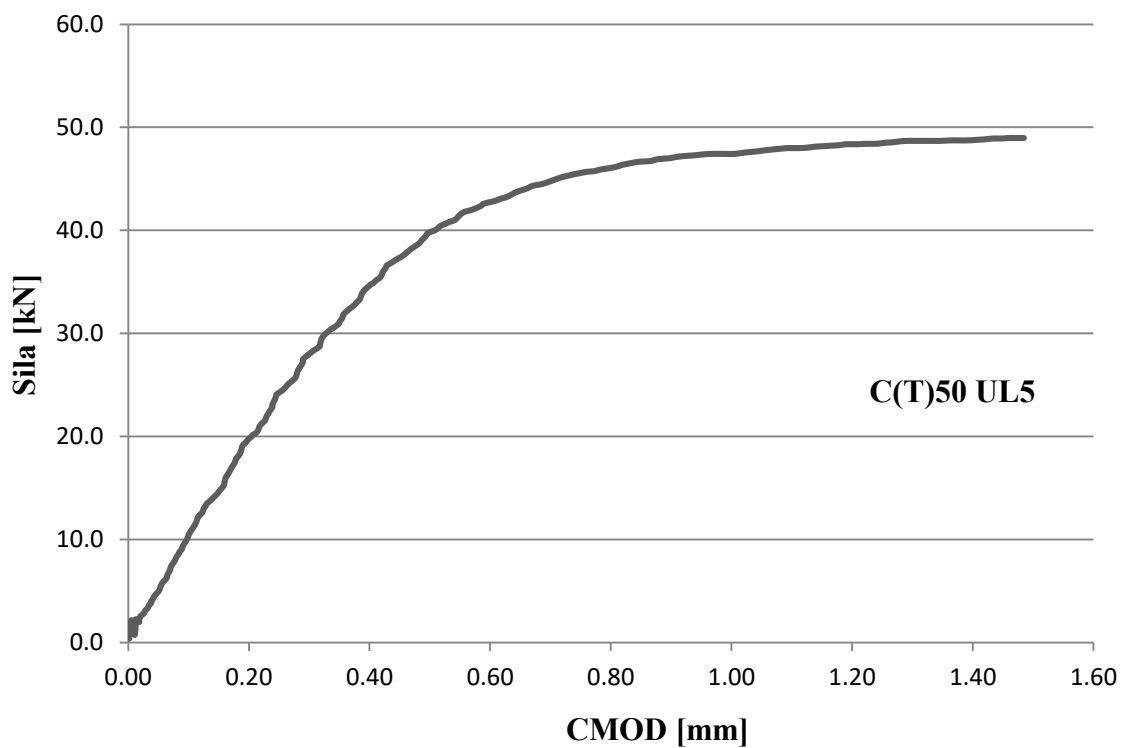




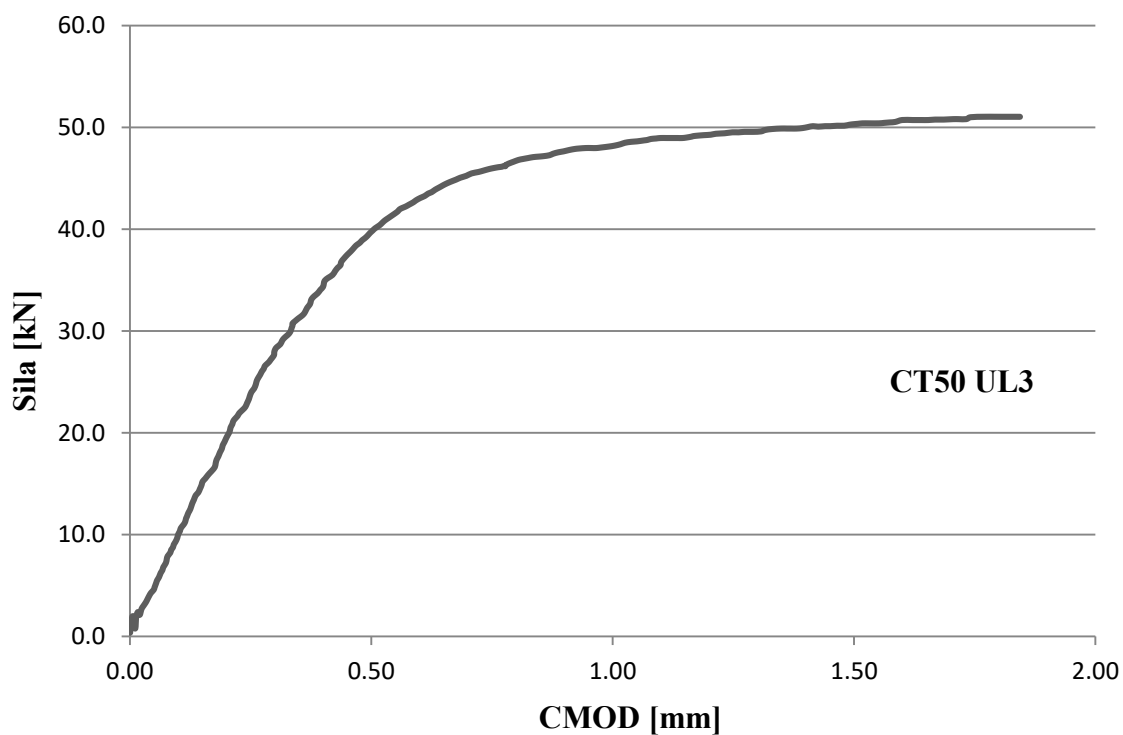
Slika 7.12 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL8 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/min



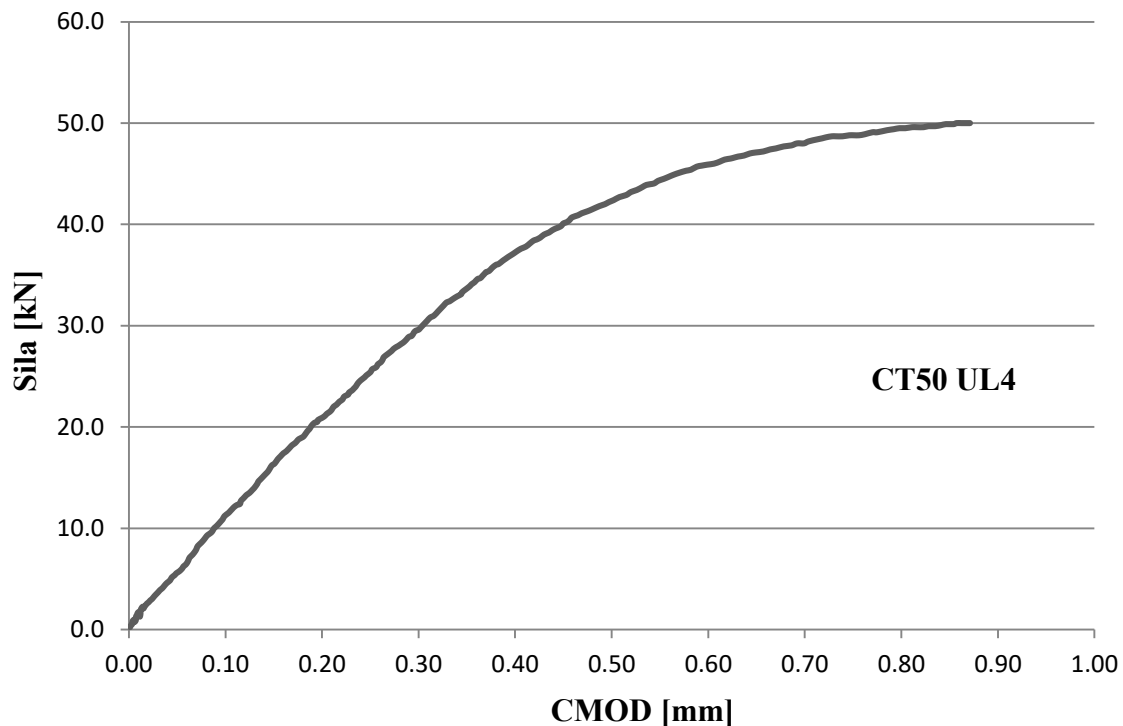
Slika 7.13 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL1 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,02 mm/min



Slika 7.14 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL5 (na -60°C): brzina deformisanja 0,5 mm/min

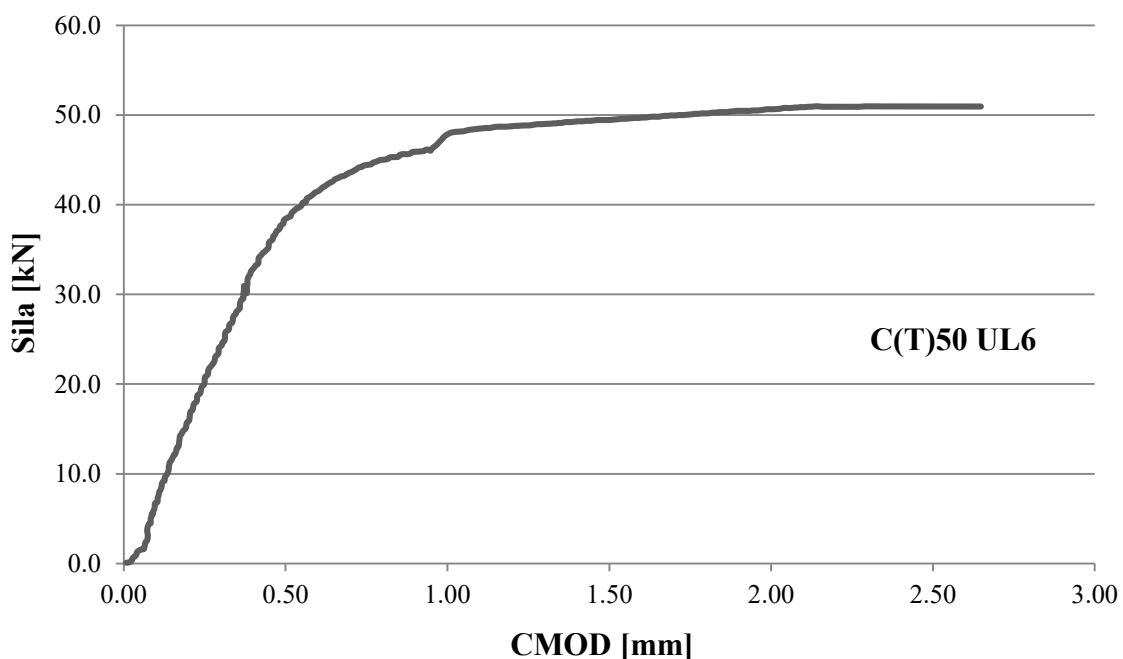


Slika 7.15 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL3 (na -60°C): brzina deformisanja 0,5 mm/min



Slika 7.16 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL4 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,5 mm/min

Poseban slučaj je prikazan na slici 7.17 na kome se može videti dijagram sila-CMOD tokom ispitivanja C(T)50 UL6 epruvete. Specifično kod ove epruvete je brzina deformacije. Naime, na početku testa je brzine deformacije iznosila 0,004 mm/min, da bi nakon određenog vremena brzina bila povećana na vrednosti 0,5 mm/min. Dijagram sila-CMOD ove epruvete ukazuje direktno na uticaj prvobitne male vrednosti početne brzine ispitivanja, jer je mala brzina deformisanja povećala zonu plastične deformacije ispred vrha prsline. Ovaj uticaj se odražava na vrednost CMOD, a indirektno se odražava i na  $J_c$ .



Slika 7.17 Dijagram sila-CMOD uzorka C(T)50 UL6 (na  $-60^{\circ}\text{C}$ ): brzina deformisanja 0,004 mm/min, kasnije povećana na 0,5 mm/min

### 7.4.5.2 Ostali parametri ispitivanja C(T)50 manje debljine

U ovom poglavlju biće prikazani ostali merodavni rezultati ispitivanja epruveta C(T)50 debljine  $B_{net} = 16$  mm i prikaz ovih rezultata je dat u tabeli 7.6. U ovoj tabeli su date:

- vrednosti stvarne (izmerene) vrednosti  $B_{net}$  uzoraka nakon loma.
- inicijalna dužina ligamenta svakog od uzorka  $b_0$ .
- stvarne izmerene vrednosti inicijalne (početne) dužine zamorne prsline  $a_0$  nakon loma čiji je postupak računanja prikazan u poglavlju 4.10.6 (izmerene odgovarajućim optičkim uređajem)
- vrednosti  $r_c$  koja predstavlja rastojanje mesta inicijacije loma cepanjem od vrha prsline (izmerena mikroskopom).
- vrednosti napona loma  $\sigma_f$  čiji je postupak računanja prikazan u poglavlju 4.10.7 i za čiju je vrednost potrebna izmerena vrednost normalizovanog rastojanja normalnog napona pri zatupljanju prsline A.
- vrednosti izduženja dužine prsline pod uticajem delujuće sile  $\Delta a$  (izmerena metodom pada napona prema standardu [1]).
- vrednosti parametra  $z_c$  koja predstavlja vrednost rastojanja začetka loma (parametra  $r_c$ ) od srednje ose debljine epruvete.

Kao pomoć tumačenju rezultata, pored gore datih vrednosti prikazane su sa desne strane i izračunate vrednosti  $J_c$ , kao i parametar brzine deformisanja za svaku epruvetu.

Iz table 7.6 se može uočiti izuzetna korelacija između parametara  $\Delta a$  i  $J_c$ . Za izuzetkom uzorka označenog sa UL2, povećanje družine prsline utiče i povećanje parametra  $J_c$ . Ovo donekle prati i trend vrednosti parametra  $r_c$ . Može se reći da smanjenje ovih parametara prati povećanje krtosti loma cepanjem.

Tabela 7.6 Prikaz ostalih merodavnih parametara ispitivanih C(T)50 epruveta debljine  $B_{net} = 16$  mm na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$

Oznaka uzorka	$B_{net}$ [mm]	Inicijalna dužina ligamenta $b_0$ [mm]	$a_0$ [mm]	$r_c$ [mm]	Napon loma $\sigma_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A \cdot 10^{-3}$	$\Delta a$ [mm]	$z_c$ [mm]	$J_c$ [N/mm]	Brzina def. [mm/min]
C(T)50 UL4	15,827	24,6	25,352	0,60	1799	3,650	0,23	4,91	178,2	0,5
C(T)50 UL10	15,754	24,5	25,457	0,62	1831	3,17	0,313	2,53	211,8	0,02
C(T)50 UL7	15,822	24,1	25,940	0,63	1856	2,83	0,4	2,63	241,2	0,02
C(T)50 UL1	15,820	24,5	25,518	0,53	1931	2,0	0,391	2,89	286,9	0,02
C(T)50 UL5	15,704	24,2	25,781	0,75	1893	2,39	0,584	0,25	340,3	0,5
C(T)50 UL9	15,845	24,1	25,876	1,35	1803	3,58	0,695	3,28	409	0,02
C(T)50 UL2	15,800	24,7	25,339	1,35	1812	3,45	1,35	0,1	424,1	0,02
C(T)50 UL3	15,737	24,1	25,887	1,11	1867	2,69	0,695	0	447,5	0,5
C(T)50 UL11	15,813	24,3	25,730	1,17	1873	2,62	0,928	2,68	483,4	0,02
C(T)50 UL8	15,714	24,7	25,295	1,44	1868	2,68	1,184	0,51	582,3	0,02
C(T)50 UL6	15,829	24,0	25,962	2,1	1812	3,44	1,146	/	660,8	0,004 i 0,5

## 7.5 DRUGI DEO STUDIJE

### 7.5.1 Ispitivanje C(T)50 epruveta na temperaturi -90°C

Drugi deo studije je imao za cilj ispitivanje i predviđanje ponašanja epruveta od ispitanog čelika 20MnMoNi 55 ispitivanjem C(T) epruveta na temperaturi -90°C. Slično kao i u prvom delu studije, ova studija započinje ispitivanjem C(T)50 epruvete. Za razliku od prvog dela studija, debljina svih epruveta u ovoj seriji ispitivanja je iznosila  $B_{net} = 20$  mm. Kao što je već rečeno, unešenje inicijalne zamorne prsline je urađeno sa 2 vrednosti parametra  $\Delta K$ . Inicijalna zamorna prsline je uneta kod 7 epruveta C(T)50 sa vrednošću  $\Delta K = 1230 \text{ Nmm}^{-3/2}$ , dok je kod 9 epruveta C(T)50 inicijalna zamorna prsline uneta sa vrednošću  $\Delta K = 492 \text{ Nmm}^{-3/2}$ . Više o vrednostima  $\Delta K$  i broju ciklusa se može naći u poglavlju 7.2 ove glave koji se tiče pripreme epruveta za ispitivanje. Ispitivanja su vršena na istom mernom uređaju kao i pri temperaturi -60°C. Brzina deformisanja svih testiranih uzoraka je iznosila 0,5 mm/min. U tabeli 7.7 prikazane su vrednosti  $J_c$  ispitivanih C(T)50 uzoraka i vrednosti parametra  $r_c$ . Sa zvezdicom su označeni uzorci u kojima je inicijalna zamorna prsline uneta sa visokom vrednošću  $\Delta K$ , dok je kod ostalih inicijalna zamorna prsline uneta sa nižom vrednošću  $\Delta K$ .

Tabela 7.7 Vrednosti  $J_c$  ispitanih C(T)50 uzoraka na -90°C (\* označava da je inicijalna zamorna prsline uneta sa visokom vrednošću praga  $\Delta K$ )

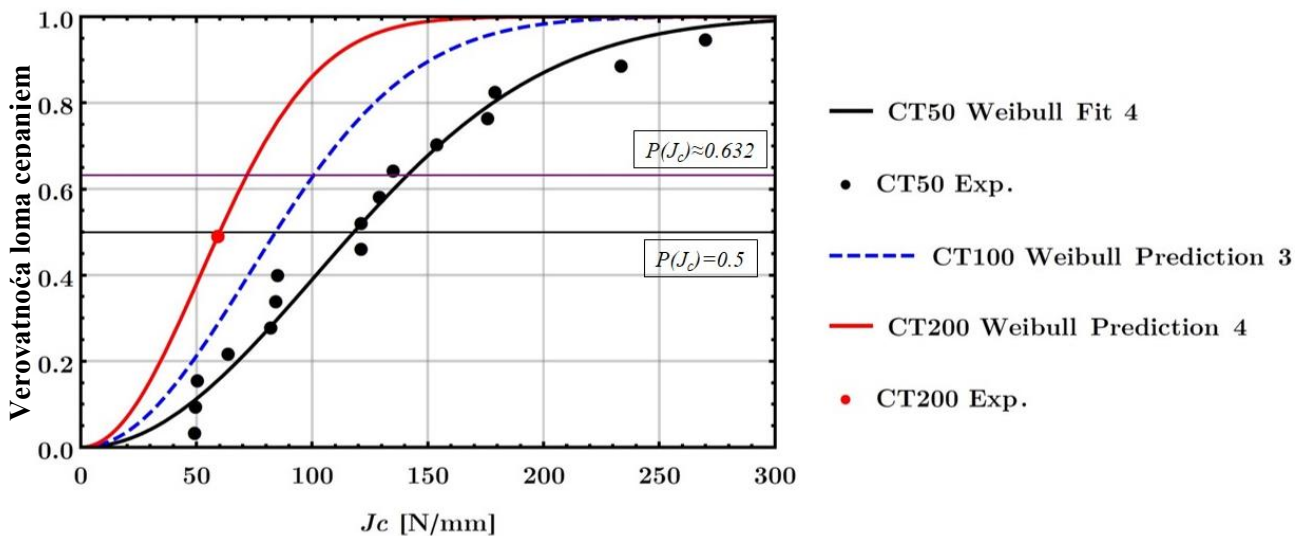
Redni Broj	Oznaka uzorka	$J_c$ [N/mm]	$B_{net}$ [mm]	$r_c$ [mm]	Brzina deformisanja [mm/min]
1	C(T)50 Q9	49,4	20	/	0,5
2	C(T)50 Q8	49,7	20	0,15	0,5
3	C(T)50 Q10	50,6	20	0,13	0,5
4	C(T)50 Q7	63,8	20	0,19	0,5
5	C(T)50 S2	82,3	20	0,71	0,5
6	* C(T)50 Q12	84,4	20	0,31	0,5
7	* C(T)50 Q13	85,2	20	0,69	0,5
8	C(T)50 Q6	121,2	20	1,00	0,5
9	* C(T)50 Q16	121,3	20	0,35	0,5
10	* C(T)50 Q14	129,2	20	0,42	0,5
11	C(T)50 Q2	135,2	20	0,36	0,5
12	* C(T)50 Q11	153,9	20	/	0,5
13	C(T)50 Q3	176	20	0,36	0,5
14	* C(T)50 Q15	179,2	20	0,23	0,5
15	C(T)50 Q1	233,6	20	0,47	0,5
16	* C(T)50 S1	270,2	20	0,69	0,5

### 7.5.2 Verovatnoća loma C(T)50, C(T)100 i C(200)200 epruveta na -90°C i ispitivanje C(T)200 epruvete – uticaj veličine uzoraka

Fitovanem eksperimentalno dobijenih rezultata ispitivanjem C(T)50 na temperaturi -90°C i unošenjem u logaritamski koordinatni sistem, korišćenjem relacija (7.1)-(7.3) dobijena je verovatnoća loma za C(T)50 epruvete prikazana na slici 7.18, kriva označena kao „Weibull fit 4“. Kao i u prvom delu studije, urađena je predikcija verovatnoće loma cepanjem većih C(T)100 i C(T)200 epruveta u funkciji parametra  $J_c$  na ispitnoj temperaturi od -90°C. Tačke Vejbulovih krivih za C(T)100 i C(T)200 su dobijene uz pomoć relacije (7.3) gde  $B_1$  predstavlja neto debljinu C(T)50 epruveta, uzeta kao vrednost 20 mm, dok su  $B_2$  neto debljine C(T)100 i C(T)200 uzoraka 40 mm i

80 mm, respektivno. Dobijene su krive verovatnoće loma prikazane takođe na slici 7.18 označene kao „CT100 Weibull Prediction 3“ i „CT200 Weibull Prediction 4“, respektivno. Povećanjem veličine  $C(T)$  uzoraka dolazi se do smanjenja tipičnih vrednosti  $J_c$ . Dakle, pri nekoj proizvoljnoj vrednosti  $J_c$  za veće uzorke očekuje se veća verovatnoća loma cepanjem nego kod manjih uzoraka. Na slici 7.18 se takođe mogu videti prave koje označavaju verovatnoće loma  $P(J_c)=0.5$  i  $P(J_c = \theta)=1-1/e \approx 0.632$  i time videti uticaj veličine uzoraka.

Ispitivanjem samo jedne epruvete  $C(T)200$  u istim laboratorijskim uslovima kao i ispitivane  $C(T)50$  pri brzini ispitivanja od 1 mm/min na temperaturi od  $-90^\circ\text{C}$  dobijeno je  $J_c$  je 59,5 N/mm. Iako su prilikom ispitivanja  $C(T)50$  epruveta čak 3 uzorka pokazale nešto konzervativnije rezultate ( $J_c$  vrednost oko 50 N/mm), ipak najviše epruveta ima vrednost  $J_c$  u intervalu od 120 do 180 N/mm. Ispitivanje  $C(T)100$  epruveta na ovoj temperaturi nije sprovedeno, ali je verovatnoća loma cepanjem u funkciji  $J_c$  pretpostavljena isprekidanom plavom linijom na istoj slici.



Slika 7.18 Verovatnoće loma cepanjem  $C(T)50$  epruveta na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem na  $-90^\circ\text{C}$  (crna kriva); predikcija verovatnoće loma cepanjem  $C(T)100$  epruveta na istoj temperaturi (plava isprekidana kriva) u funkciji  $J_c$ ; predikcija verovatnoće loma cepanjem  $C(T)200$  epruveta na istoj temperaturi (crvena kriva) u funkciji  $J_c$

## 8 ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

Analiza i diskusija rezultata podeljena je u nekoliko nezavisnih tematskih celina. Originalno razvijena procedura skaliranja rezultata u cilju modeliranja uticaja veličine uzorka na kumulativnu funkciju raspodele  $J_c$  predstavljena je u završnom poglavlju 8.5. Diskusije u ovom poglavlju okrenute su analizi dobijenih krivih verovatnoća loma cepanjem, analize samih dobijenih rezultata i relevantnih parametara opisanih u prethodnom delu ove disertacije.

### 8.1 ANALIZA KRIVIH VEROVATNOĆA LOMA CEPANJEM

Ovo poglavlje može započeti već poznatom činjenicom koja se i ne tiče ove disertacije, a to je da Weibullom raspodelom verovatnoće loma cepanjem ispitivanjem C(T) epruveta moguće odrediti sa velikom pouzdanošću donju granicu žilavosti loma u području prelazne temperature, kao što je dokazano u radovima brojnih istraživača prikazan delimično u poglavlju koja se tiče pregleda referentne literature. Eksperimentalni rezultati i statističke metode obrade dvo-parametarskom Weibullovom raspodelom u ovoj disertaciji poslužile su za dobijanje krivih verovatnoće loma cepanjem C(T) epruveta feritnog reaktorskog čelika 20MnMoNi 55 na temperaturama  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$ . Međutim, postavlja se osnovno pitanje sa kojom pouzdanošću možemo reći da su ove dobijene krive merodavne u određivanju verovatnoće loma cepanjem u funkciji  $J_c$ . Verovatnoća sa kojom se predloženi zakoni raspodele mogu prihvatiti ili odbaciti određena je primenom Kolmogorov-Smirnov statističkog testa, tzv. „goodness-of-fit“ testa čiji postupak i princip objašnjen u poglavlju 5.8.1, pri čemu je kao izlazni pokazatelj dobijena vrednost verovatnoće (eng. *probability value* - pValue). Vrednosti svih verovatnoća (pValues) za dobijene krive koje su analitički izračunate i prikazane na graficima na slikama u glavi 7 prikazane su u tabeli 8.1. U tabeli su takođe prikazane i sve vrednosti dvo-parametarskih Weibullovih raspodela izračunate analitičkim putem.

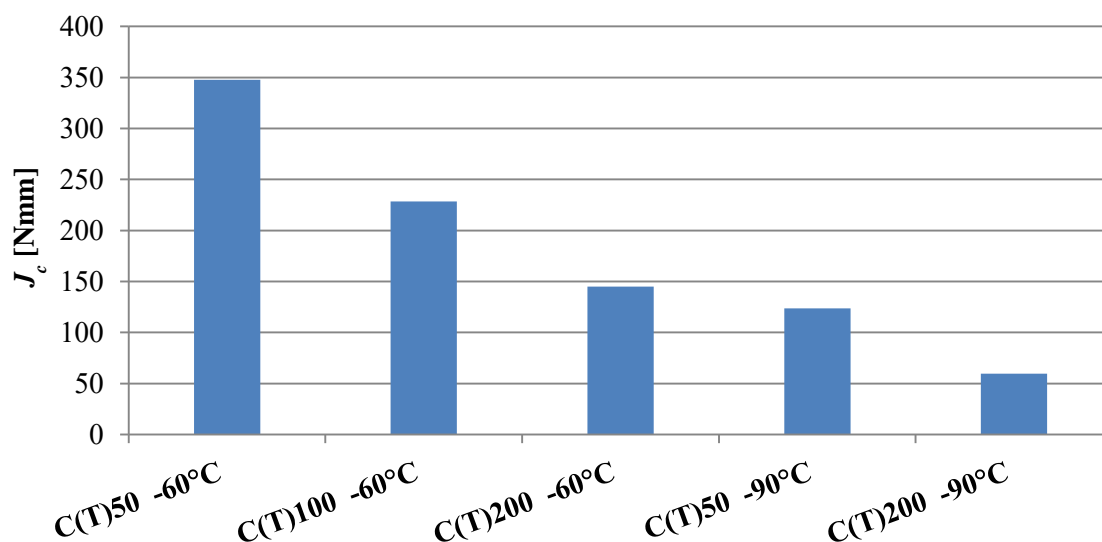
Table 8.1 Parametri Weibullovih raspodela sa nivoima poverenja i vrednosti verovatnoće (pValues)

Veibulova kriva	Parametar Veibulove raspodele $\theta$ [N/mm]	Bezdimenzioni parametar oblika $\beta$	Vrednost verovatnoće (pValue)
Weibull Fit 1	438,52	2,64	0,9969
Weibull Fit 2	359,59	1,66	0,9952
Weibull Fit 3	396	1,98	0,9603
Weibull Fit 4	141,18	2,05	0,8779
Weibull Prediction 1	249,3	1,98	0,8887
Weibull Prediction 2	175,66	1,98	0,9610
Weibull Prediction 3	100,68	2,05	/
Weibull Prediction 4	71,794	2,05	/

Generalno visoke vrednosti vrednosti verovatnoća ukazuju na poprilično dobro predviđanje verovatnoće loma na ispitnim temperaturama. Jedine vrednosti koje odskakuju od ostalih je vrednost verovatnoće „Weibull fit 3“ i „Weibull fit 4“ krive, ali to se može pripisati potencijalno malom broju ispitivanih uzoraka. Veće vrednosti bi se mogle očekivati sa većim brojem ispitivanja.

U prvom delu studije ove disertacije direktno se može videti uticaj veličine uzoraka, kao i debljine istih tipova C(T)50 uzoraka. Pri nekoj vrednosti  $J_c$  pri lomu C(T)50 epruvete veća je verovatnoća loma cepanjem „deblje” epruvete, tačnije ona koja ima veću vrednosti  $B_{net}$ . Ovo se može pripisati i tome što je kod uzoraka sa većom debljinom takođe i veća verovatnoća prisustva „okidača” loma u poprečnom preseku uzorka, pa je time i rasipanje dobijenih vrednosti, u ovom slučaju vrednosti  $J_c$ , manja. Ova pojava je još izraženija kod većih uzoraka C(T)100 i C(T)200 koji imaju debljinu uzoraka  $B_{net}$  40 i 80 mm, respektivno.

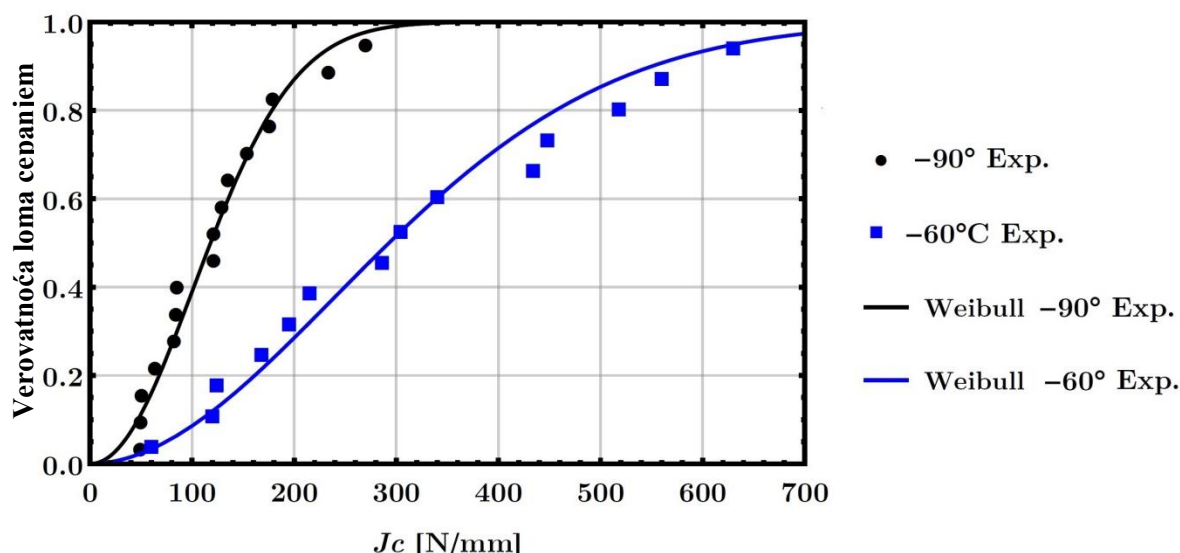
Analizirajući rezultate dobijenih vrednosti  $J_c$  drugog dela studije (ispitivanja na  $-90^\circ\text{C}$ ), rasipanje dobijenih vrednosti  $J_c$  je manje. Ova pojava se može pripisati opet ranije poznatom činjenicom da je rasipanje dobijenih rezultata manje i na nižim temperaturama, tačnije mogućnost duktilnog čupanja ovog materijala je manja, ali i dalje važi zaključak iz prvog dela koji se tiče korelacije verovatnoće loma i veličine C(T) uzoraka. Prethodne tvrdnje koji se tiču uticaja temperature i veličine uzoraka na rasipanje dobijenih rezultata mogu se generalno najbolje opisati uporednih grafikom na slici 8.1. Na ovom grafiku se direktnim poređenjem srednjih vrednosti  $J_c$  ispitivanih epruveta na ispitnim temperaturama  $-60^\circ\text{C}$  i  $-90^\circ\text{C}$  može videti validnost prethodne dve tvrdnje, a takođe se može zaključiti šta to utiče na smanjenje srednjih vrednosti.



Slika 8.1 Poređenje srednjih vrednosti ispitivanih različitih C(T) epruveta na određenim temperaturama

Uticaj temperature posebno se može obraditi i tumačiti iz rezultata dobijenih iz dve studije u ovoj disertaciji. Za to mogu poslužiti eksperimentalni rezultati ispitivanja C(T)50 epruveta na  $-60^\circ\text{C}$  i  $-90^\circ\text{C}$ . Upoređivanjem Weibulovih krivih verovatnoće loma cepanjem dobijene iz rezultata ispitivanja za obe temperature, nesporno se može uočiti uticaj temperature na verovatnoću loma u području prelazne temperature (slika 8.2). Za samo  $30^\circ\text{C}$  razlike verovatnoća loma cepanjem, primera radi pri vrednosti 200 N/mm, je povećana skoro 3 puta. Na prethodno pomenutoj slici 8.1 se može još jednom i videti uticaj temperature na rasipanje dobijenih rezultata, interval očekivanih vrednosti za  $J_c$  pri lomu cepanjem feritnog čelika 20MnMoNi 55 je definitivno manji na nižim temperaturama, a i to je potvrđeno eksperimentalnim rezultatima. Dobijene Weibulove krive verovatnoće loma cepanjem ovog čelika ispitivanjem C(T)50 epruveta na temperaturama na  $-60^\circ\text{C}$  i  $-90^\circ\text{C}$  su temperaturno zavisne i specifično za ove dimenzije ispitivanih epruveta se može zapisati relacija (8.1). Za ovo poređenje uzete su krive za debljine epruveta  $B_{net}$  20 mm (krive označene sa „Weibull fit 2“ i „Weibull fit 4“) iz dobijenih grafika.



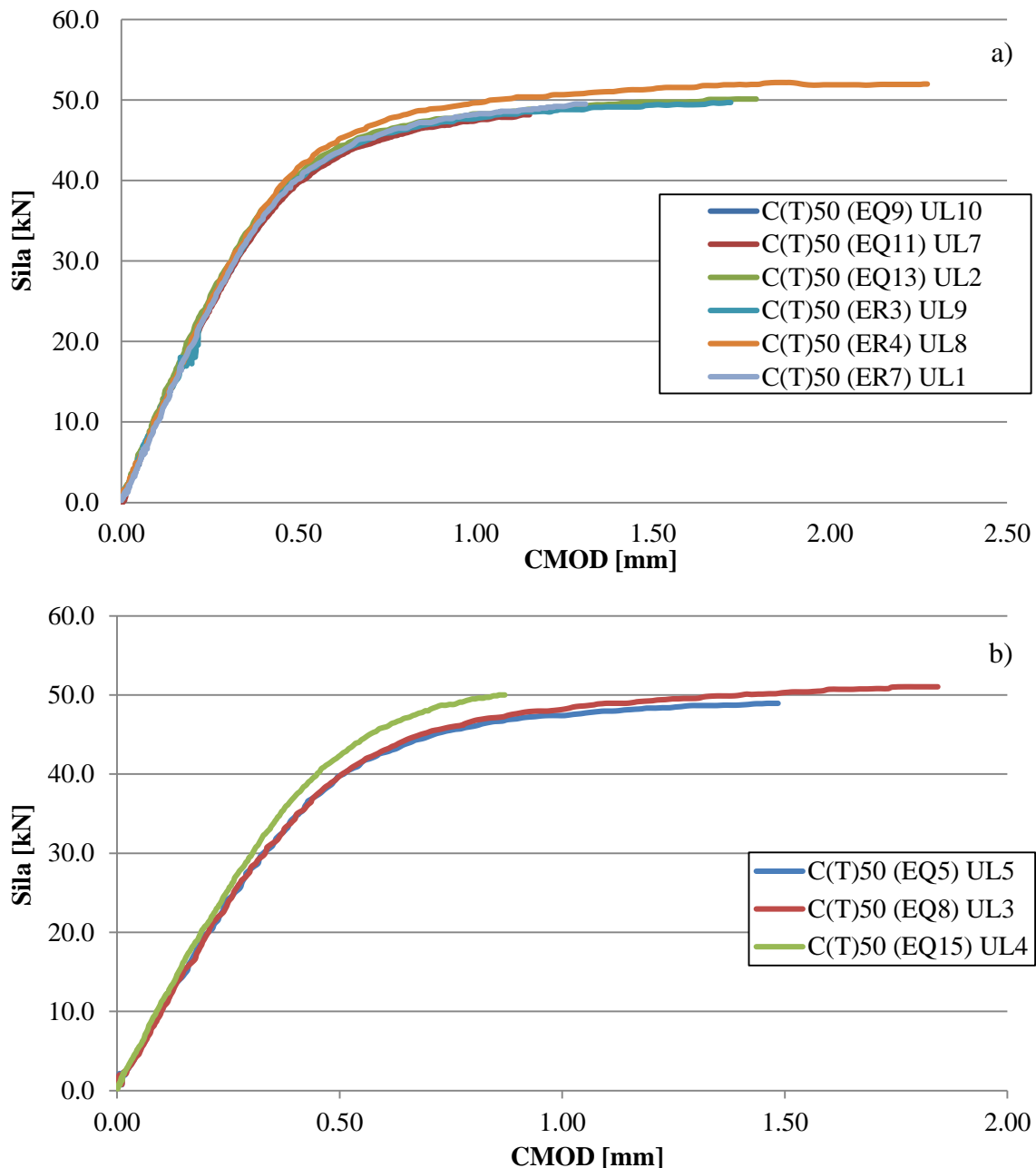


Slika 8.2 Poređenje Weibulovih krivih verovatnoća loma cepanjem C(T)50 epruveta ispitanih na temperaturi -60°C i -90°C

$$\frac{\theta_1 (\text{Weibull fit 2})}{\theta_2 (\text{Weibull fit 4})} = 2,5 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^6 \quad (8.1)$$

## 8.2 DISKUSIJA UTICAJA BRZINE DEFORMISANJA NA DOBIJENE REZULTATE

Posebnu analizu u ovoj disertaciji zahteva uticaj brzine deformacije na dobijene rezultate, konkretno će ovde biti fokus na vrednosti parametra CMOD. U ovom poglavlju direktno su poređene vrednosti CMOD za oba slučaja brzine deformisanja C(T)50 epruveta debljine  $B_{net}$  od 16 mm iz prvog dela studije. Na slici 8.3a prikazano je poređenje vrednosti parametra CMOD izabranih epruveta C(T) epruveta ispitivanih na temperaturi -60°C čije su oznake prikazane na istoj slici desno u čijim slučajevima je brzina deformisanja iznosila 0,02 mm/min. Opseg u kojem su se kretale vrednosti CMOD ispitivanih C(T)50 na ovoj temperaturi iznosi od 1,049 do 2,315 mm. Na slici 8.3b prikazane su vrednosti CMOD parametara za uzorke C(T)50 ispitane na temperaturi -60°C za koje je tokom ispitivanja brzina deformisanja iznosila 0,5 mm/min. Na istoj slici desno mogu se videti oznake izabranih uzoraka C(T)50 epruveta koje su prikazane. Vrednosti CMOD uzoraka za brzinu deformisanja 0,5 mm/min su se kretale od rasponu od 0,896 do 1,852 mm. U oba slučaja može se, kao u svim ispitivanjima u području prelazne temperature, uočiti rasipanje dobijenih vrednosti CMOD-ova, a odavde isto kao i vrednosti  $J_c$ . Iz datih dijagrama poređenja može se uočiti da su vrednosti parametra CMOD manje u odnosu na vrednosti za ispitivanja uzoraka sa manjom brzinom deformisanja. Odavde se može zaključiti da manja brzina deformisanja „odlaže“ lom cepanjem C(T) epruveta čelika 20MnMoNi 55 čak i na tako niskoj temperaturi. Manja brzina deformisanja pruža više vremena plastičnoj deformaciji da se iskaže, što generalno utiče na veće vrednosti CMOD, a time i parametar  $J_c$ . Prethodna tvrdnja može biti povezana sa ponašanjem uzorka C(T)50 UL6 (slika 7.17), ali bi za opšti zaključak bilo potrebno sprovesti još ispitivanja.



Slika 8.3 a) Vrednosti parametara CMOD ispitivanja C(T)50 epruveta ( $B_{net} = 16$  mm) na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$  i njihovo poređenje: brzina deformisanja 0,02 mm/min; b) vrednosti parametara CMOD ispitivanja C(T)50 epruveta ( $B_{net} = 16$  mm) na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$  i njihovo poređenje: brzina deformisanja 0,5 mm/min

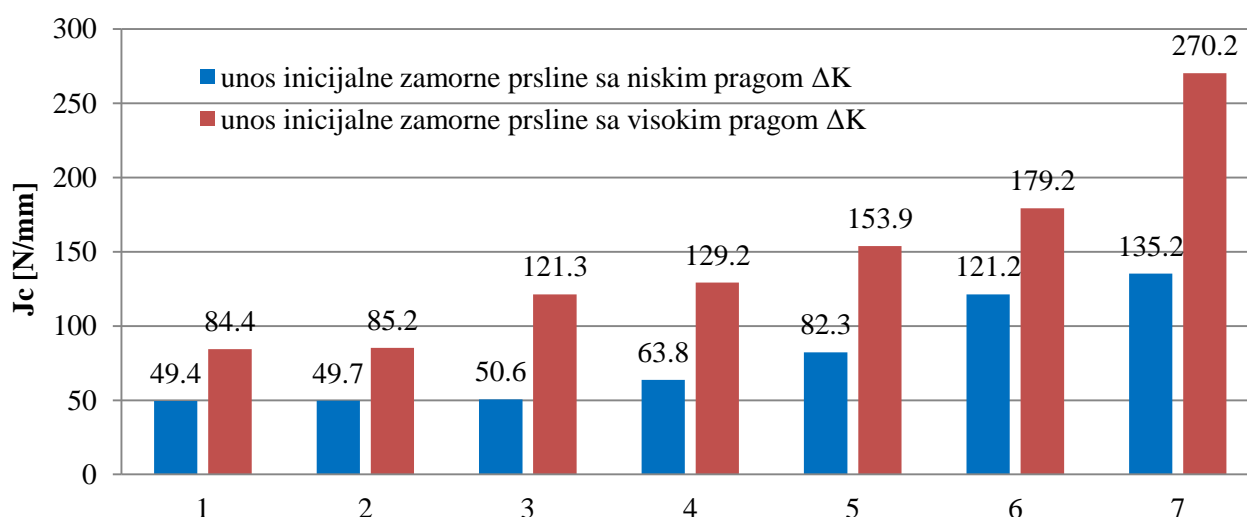
### 8.3 DISKUSIJA UTICAJA UNOSA ZAMORNE PRSLINE NA DOBIJENE REZULTATE

U ovom poglavlju biće analiziran uticaj unosa inicijalne zamorne prsline na C(T)50 epruveta namenjene za ispitivanje na  $-90^{\circ}\text{C}$  na vrednosti parametra  $J_c$  i  $r_c$ . Iz samih rezultata ispitivanja iz tabele 8.2 se generalno ne može ništa zaključiti, odnosno kako i kojoj meri viša ili niža vrednost  $\Delta K$  (prilikom unošenja inicijalne zamorne prsline) utiče na dobijene rezultate ispitivanjem C(T) epruveta. Međutim, sa slike 8.4 može se videti direktno poređene rastuće vrednosti dobijenih rezultata  $J_c$  i time uporediti kako se rasipanje odvija za obe vrste pripremljenih uzoraka, odnosno uticaj formirane zamorne inicijalne prsline. Pored toga, može se uočiti da postoji određena uloga praga  $\Delta K$  i broja ciklusa zamaranja na dobijene vrednosti  $J_c$ . Da li je to zbog nivoa deformacije koja je možda stvorila

neki vid plastičnih deformacija na vrhu prsline, to je potrebno utvrditi i ostavlja prostor za dalju analizu i diskusiju ove studije.

Tabela 8.2 Vrednosti parametra  $J_c$  i  $r_c$  testiranih C(T)50 uzoraka na  $-90^\circ\text{C}$  (levo uzorci pripremljeni sa niskim pragom  $\Delta K$ ; desno uzorci pripremljeni sa visokim pragom  $\Delta K$ )

Tip epruvete	$J_c$ [N/mm]	Parameter $r_c$ [mm]	Tip epruvete	$J_c$ [N/mm]	Parameter $r_c$ [mm]
C(T)50	49,4	/	C(T)50*	84,4	0,31
C(T)50	49,7	0,15	C(T)50*	85,2	0,69
C(T)50	50,6	0,13	C(T)50*	121,3	0,35
C(T)50	63,8	0,16	C(T)50*	129,2	0,42
C(T)50	82,3	0,71	C(T)50*	153,9	/
C(T)50	121,2	1,00	C(T)50*	179,2	0,23
C(T)50	135,2	0,36	C(T)50*	270,2	0,69
C(T)50	176	0,36			
C(T)50	233,6	0,47			



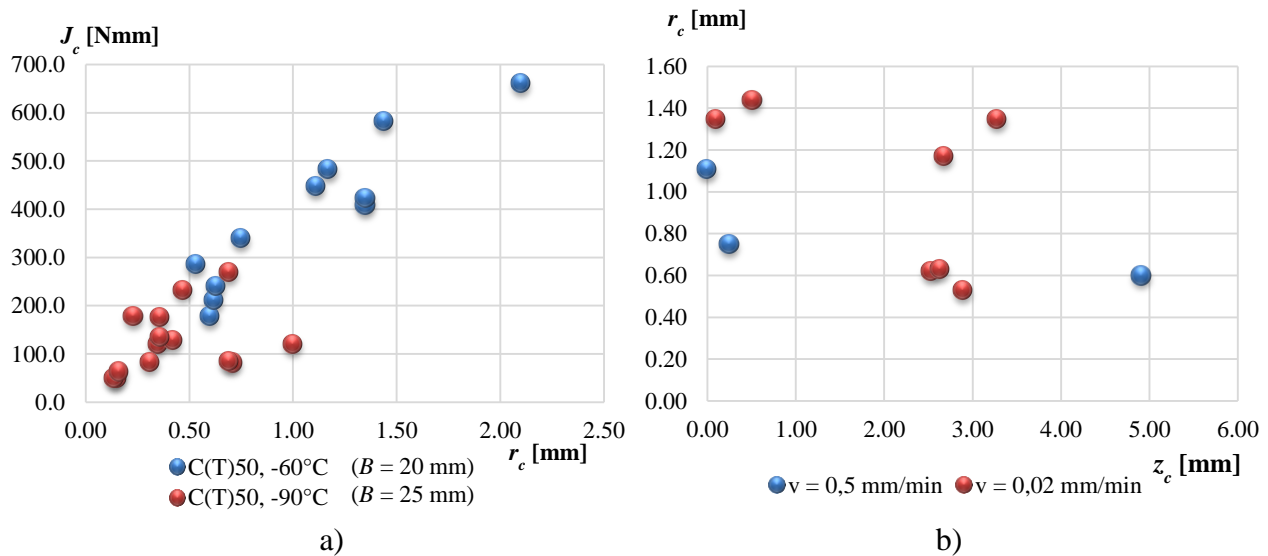
Slila 8.4 Direktno poređenje rastućih vrednosti  $J_c$  dobijenih ispitivanjem C(T)50 uzoraka na  $-90^\circ\text{C}$ ; poređenje pojedinačnih rezultata uzoraka pripremljene sa visokim pragom  $\Delta K = 1230 \text{ Nmm}^{-3/2}$  i nižim pragom  $\Delta K = 492 \text{ Nmm}^{-3/2}$

Ono što se može videti iz tabele 8.2 je rasipanje dobijenih  $J_c$  i kod jednih i kod drugih uzoraka. Mogu se uočiti nešto veće vrednosti  $J_c$  u slučaju uzoraka kojima je zamorna prsline uneta sa visokom vrednošću  $\Delta K$ . Međutim, rasipanje parametra  $r_c$  je veće kod uzoraka kod kojih je unos inicijalne zamorne prsline urađeno sa niskim pragom  $\Delta K$ . Pored toga se mogu uočiti i generalno veće vrednosti ovog parametra kod uzoraka pripremljeni sa nižim  $\Delta K$  u poređenju sa uzorcima pripremljeni sa visokim pragom  $\Delta K$ .

## 8.4 UTICAJ TEMPERATURE NA PARAMETRE $r_c$ I $z_c$

Uticaj temperature ispitivanjem C(T)50 epruveta na parametar  $r_c$  se može videti na dijagramu na slici 8.5a, na kome su pored ovog parametra na ordinati date i vrednosti parametra  $J_c$  ispitivanih epruveta. Ono što se indirektno može videti je i uticaj debljine ispitivanih C(T)50 epruveta iz prve serije ispitivanja. Može se zaključiti da su tačke (rezultati  $J_c$ - $r_c$ ) na ispitnoj temperaturi od  $-60^\circ\text{C}$  više poređane u nekoj linearnoj zavisnosti nego tačke dobijene na nižoj temperaturi, odnosno  $-90^\circ\text{C}$ . Pored toga, uticaj debljine istog tipa C(T)50 epruvete je evidentan, pa rastojanje od vrha inicijalne zamorne prsline do mesta inicijacije loma ima veće vrednosti kod C(T)50 uzoraka manje debljine. Može se

videti da se kod epruveta na nižim temperaturama ( $-90^{\circ}\text{C}$ ) lom odvija generalno po obliku fasete cepanja, što je poznato iz Herensove studije.



Slika 8.5 a) dijagram zavisnosti  $J_c$ - $r_c$  izabranih C(T)50 uzoraka na temperaturama  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$ ; b) dijagram zavisnosti parametara  $r_c$ - $z_c$  i uticaj brzine deformisanja C(T)50 na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$

Na dijagramu na slici 8.5b može se videti zavisnost parametra  $z_c$  (koji predstavlja rastojanje parametra  $r_c$  od mesta inicijacije loma od srednje ose debljine uzoraka) i samog parametra  $r_c$  ispitnih C(T)50 epruveta na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$ , kao i uticaj brzine deformisanja. Generalno se ne može uočiti nikakva zakonitost raspodele, a razlog potencijalno leži i u relativno malom broju ispitivanih uzoraka. Uključivanje još jednog parametra, poput  $J_c$ , na desnoj ordinati prikazanog dijagrama takođe ne menja stvari niti ukazuje na neka dodatna pojašnjenja u vezi zakonitosti koja bi mogla da utiču na tumačenje dobijenih rezultata, sem da je neophodan veći broj ispitivanja.

## 8.5 SKALIRANJE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA (UTICAJ VELIČINE C(T) UZORAKA)

### 8.5.1 Predloženi postupak skaliranja rezultata ispitivanja C(T) epruveta

U ovom poglavlju je prikazana je originalna analiza eksperimentalnih podataka i rezultata, odnosno krivih verovatnoća loma cepanjem u funkciji parametra  $J_c$ . Ova naknadna obrada sa fitovanjem je zasnovana na dobro poznatoj i široko korišćenoj analitičkoj formi, pa je u prvom delu ovog poglavlja prikazan predloženi algoritam skaliranja na osnovu dobijenih rezultata i geometrije C(T) epruvete. Konkretno, urađeno je skaliranje eksperimentalnih vrednosti  $J_c$  ispitivanjem C(T)50 i C(T)100 na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$  u cilju dobijanja kumulativne raspodele verovatnoće  $P(J | W, \beta, \theta)$  za bilo koju veličinu uzoraka. Jedna od osnova koja opravdava ovakav postupak skaliranja je činjenica da je mehanizam plastične deformacije potisnut usled veoma niskih temperatura, u konkretnom primeru  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Skaliranje podataka, odnosno vrednosti  $J_c$ , se radi u cilju dobijanja preklapanja krivih verovatnoće (eng. *collapse of the probability curves*). Naravno, potpuno preklapanje dobijenih krivih nije moguće dobiti za slučaj različitih vrednosti parametra oblika Vejbulove raspodele, odnosno  $\beta$ . U ovoj studiji, koja se zasniva na faznom prelazu (prelaz iz oštećenog u fragmentno stanje), „kolapsiranje” krivih je urađeno oko „kritičnih tačaka”. Teza i ideja ove analize je da se svaka tačka krive verovatnoće  $P(J)$  može tretirati, u neku ruku, kao kritična tačka faznog prelaza, jer  $J_c$  predstavlja vrednost  $J$ -integrala pri kome je ispitivani uzorak u fazi loma cepanjem (prethodna faza je faza oštećenosti koja prelazi u fazu loma). Shodno tome, pošto nije moguće u potpunosti ostvariti preklapanje celokupnih krivih, urađeno je „kolapsiranje” krivih verovatnoće loma cepanjem u okolini

prevojne tačke (eng. *inflection point*). U tom cilju razvijen je skalirajući algoritam na osnovu 2 seta rezultata u cilju dalje predikcije verovatnoća za proizvoljnu veličinu  $C(T)$  epruvete. Predložena procedura skaliranja je inspirisana idejom Mandelbrota o objedinjavajućem opisu prirodnih pojava i podležu nekim prostim zakonima [126].

Procedura skaliranja se sprovodi „u 2 koraka“. Prvi predloženi korak predstavlja skaliranje  $J_c$  i sprovodi se u cilju određenog preklapanja novih krivih u (novom) skaliranom prostoru sa kumulativnim verovatnoćama loma koje odgovaraju verovatnoćama  $F(J_c=\theta) = 1-1/e \approx 0,632$  za  $C(T)$  uzorke. Drugi korak predstavlja  $F$ -skaliranje u cilju obezbeđivanja jednakog nagiba u prevojnim tačkama za kumulativne raspodele u skaliranom prostoru.

Izvođenje započinje prikazanom relacijom dvo-parametarska jednačina Vejbulove raspodele (8.2) korišćena u prvobitnom fitovanju rezultata, pri čemu  $\beta$  i  $\theta$  predstavljaju parametre oblika i razmere, respektivno, Vejbulove kumulativne raspodele, objašnjene u prethodnim poglavljima, dok  $J$  predstavlja vrednost  $J$ -integrala pri lomu cepanjem.

$$F(J | \beta, \theta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{J}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (8.2)$$

Procedura skaliranja započinje izvodima Vejbulove kumulativne raspodele (izraz (8.3)) u cilju određivanja nagiba u  $F$ - $J$  prostoru koja je po definiciji jednaka funkciji gustine raspodele. U cilju određivanja nagiba koji odgovara prevojnoj tački kumulativne Vejbulove raspodele, prvo je potrebno odrediti drugi izvod kumulativne raspodele i uslova relacijom (8.4)

$$\frac{dF(J)}{dJ} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{J}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{J}{\theta}\right)^\beta\right] \equiv f(J | \beta, \theta) \quad (8.3)$$

$$\frac{d^2F}{dJ^2} \Big|_{J=J_\Pi} = \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2 \left(\frac{J_\Pi}{\theta}\right)^{\beta-2} \exp\left[-\left(\frac{J_\Pi}{\theta}\right)^\beta\right] \left[1 - \frac{1}{\beta} - \left(\frac{J_\Pi}{\theta}\right)^\beta\right] = 0 \quad (8.4)$$

U prethodnom izrazu,  $\Pi$  u indeksu  $J$  označava prevojnu tačku  $J_\Pi$  na raspodeli. Koordinata prevojne tačke Vejbulove funkcije je određena izrazom (8.5) i sledi iz (8.4).

$$\frac{J_\Pi}{\theta} = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8.5)$$

Nakon toga, nagib  $S$  Vejbulove kumulativne raspodele sledi iz izraza (8.6). Očigledno, iz ovog sledi da nagib Vejbulove kumulativne raspodele u prevojnoj tački odgovara maksimumu funkcije verovatnoće.

$$S = \frac{dF(J)}{dJ} \Big|_{J=J_\Pi} = \frac{1}{\theta} \Xi(\beta) = f(J) \Big|_{J=J_\Pi} = f_{\max} \quad (8.6)$$

gde je sa  $\Xi(\beta)$  predstavljena funkcija oblika definisana u formi (8.7). Izgled ove funkcije oblika, koja zavisi od parametra oblika Vejbulove raspodele  $\beta$ , je prikazan na slici 8.6. Na ovoj slici su prikazani tipični oblici funkcije kumulativne raspodele za različite vrednosti parametra  $\beta$  (za sigmoidne oblike raspodele je  $\beta > \beta_x \approx 1.35$ ).

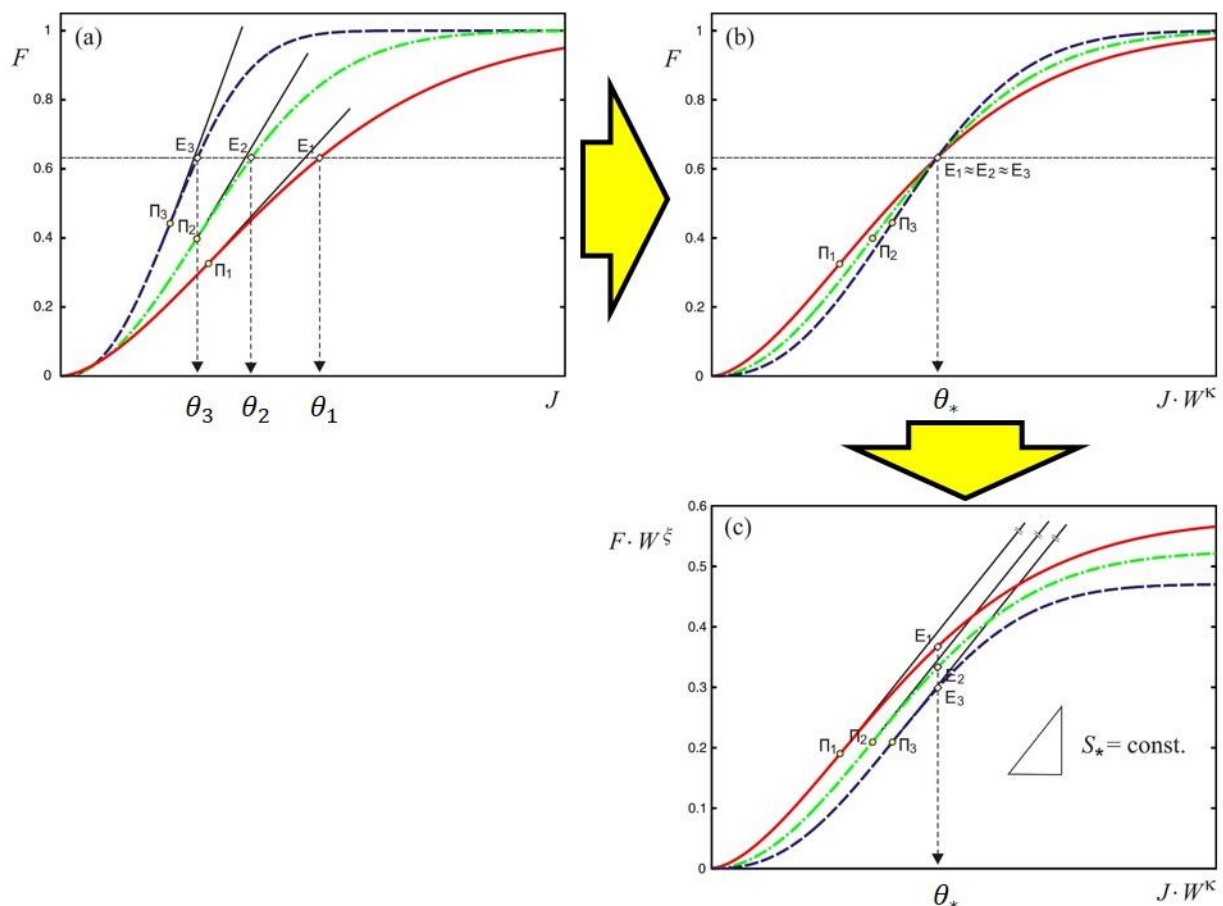
$$\Xi(\beta) = \beta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{1-\frac{1}{\beta}} \exp\left[-\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\right] \quad (8.7)$$



Vrednost funkcije oblika  $\Xi(\beta)$  može biti sračunata za svaku vrednost  $W$  epruvete  $C(T)$  kada se odrede parametri skaliranja  $\kappa$ ,  $\xi$  i konstante  $\theta_*$  i  $S_*$ , odnosno izrazom (8.12).

$$\Xi(\beta|W, \xi) = S_* \theta_* W^{-\xi} \quad (8.12)$$

Vejbulov parametar oblika  $\beta(W, \xi)$  se određuje grafički (sa prethodno prikazane slike 8.8), a na osnovu funkcionalne zavisnosti (8.7), naravno, u slučaju da je poznata vrednost funkcije oblika  $\Xi(\beta)$ . Radi dodatnog pojašnjenja, E-tačke na slici 8.7a predstavljaju tačke vrednosti kumulativne raspodele  $F(J = \theta) = 1 - 1/e \approx 0,632$  za različite širine  $C(T)$  epruvete na ispitnoj temperaturi i  $J$ -skaliranje po horizontalnoj osi je urađeno sa ciljem optimalnog preklapanja upravo ovih tačaka za sve  $C(T)$  epruvete, odnosno sve efektivne širine  $W$ .



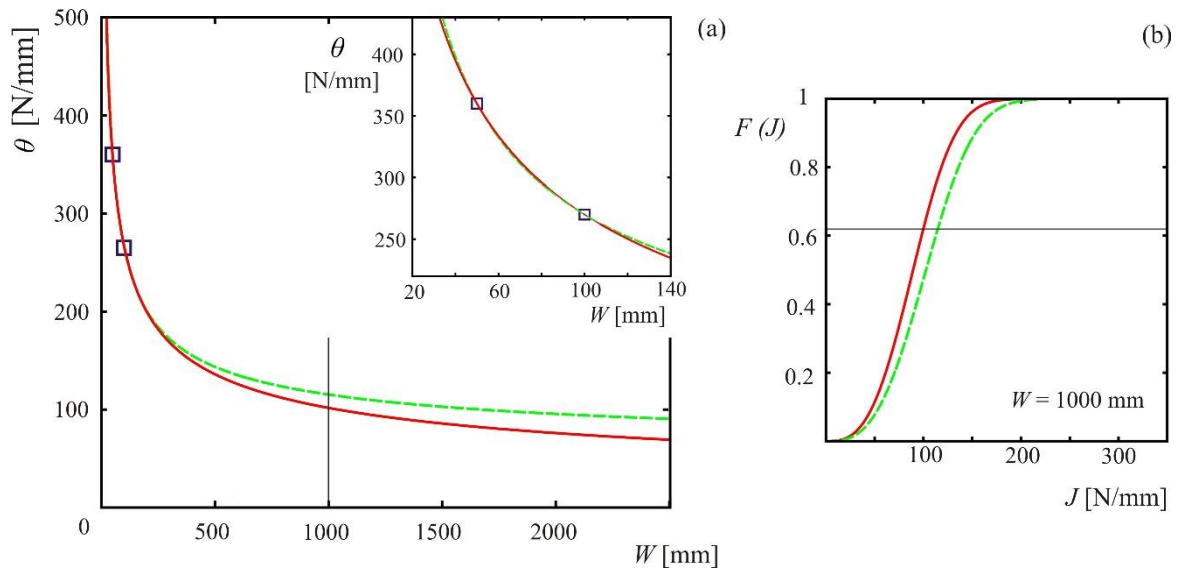
Slika 8.7 Šematska ilustracija skaliranja „u 2 koraka“

Na ovaj način se dobija izraz (8.13). U ovom izrazu uticaj veličine  $C(T)$  uzoraka figurira preko karakteristične veličine epruvete  $W$ , odnosno efektivne širine  $C(T)$  (linearne dimenzije). Uzimajući u obzir geometrijsku sličnost  $C(T)$  epruveta, kao i uslov RSD (u konkretnom slučaju  $W = 2,5B$ ), indirektno je na ovaj način izražena i potrebna debljina  $C(T)$  epruvete, odnosno  $B$ . Izraz za donju među kumulativnih raspodela je izvedena uz pretpostavku  $\theta_\infty \equiv \lim_{W \rightarrow \infty} \theta(W) = 0$ . U opštem slučaju, za Vejbulovu kumulativnu raspodelu se može napisati izraz (8.14), koji uzima u obzir  $\theta_\infty > 0$ . Određivanje  $\theta_\infty$  zahteva ispitivanje barem tri veličina  $C(T)$  uzoraka. U suprotnom, izraz (8.13) pruža konzervativniji pristup granici ili međi, kao što je ilustrovano na slici 8.8 u kome je prikazana zavisnost parametra razmere  $\theta$  Vejbulovih raspodela na osnovu eksperimentalnih ispitivanja  $C(T)50$  i  $C(T)100$  epruveta na  $-60^\circ\text{C}$  (iz glave 7). Generalna forma kumulativne raspodele za  $J_c$  je ekvivalentna modelu Vejbulovog parametra razmere koji uzima uticaj veličine uzorka, odnosno  $\theta(W) = \theta_\infty + \theta_* \cdot W^{-\kappa}$ . Pažljivim analizom dijagrama na slici 8.8 se može uočiti da jednačine (8.8) i (8.13) pružaju donju

među za opštija predviđanja raspodela na osnovu izraza (8.14) u zoni ekstrapolacije. Detalj sa slike 8.8a pokazuje da jednačina (8.8) ne može da daje donju među za izraz (8.14) između ove dve tačke. Iz praktičnog razloga, ove dve krive se preklapaju u zoni interpolacije i u neposrednoj blizini. Sa povećanjem dimenzija epruvete, ove dve krive se razilaze i divergiraju. Na osnovu prethodno rečenog i poznate činjenice o velikom rasipanju vrednosti  $J_c$  na ovim temperaturama, izrazi (8.8) i (8.13) pružaju sasvim dobre procene (odnosno predviđanja) kumulativne raspodele do debljine epruvete  $B \approx 300\div 400$  mm i donje međe kumulativnih raspodela.

$$F(J | \beta, \theta) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{J \cdot W^\kappa}{\theta_*} \right)^{\beta(W, \xi)} \right\} \quad (8.13)$$

$$F(J | \beta, \eta) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{J \cdot W^\kappa}{\theta_* + \theta_\infty W^\kappa} \right)^{\beta(W)} \right\} \quad (8.14)$$



Slika 8.8 a) zavisnost parametra razmere  $\theta$  Vejbulove raspodele od debljine C(T) epruvete; kvadrati označavaju vrednosti parametre razmere  $\theta$  Vejbulove raspodele za C(T)50 i C(T)100 uzorke na  $-60^\circ\text{C}$ ; crvenom linijom je prikazan je slučaj  $\theta_\infty = 0$  (opisan izrazom (8.8), dok je isprekidanom zelenom prikazan opštiji  $\theta_\infty = 50$  N/mm (koji odgovara izrazu (8.14)); b) crvenom linijom je predstavljena donja među za isprekidanu zelenu liniju, koja pruža konzervativniju procenu raspodela za veće dimenzije uzoraka

Iz  $\Xi(\beta)W^\xi = \text{const.}$  i iz izraza (8.8) mogu odrediti parametri razmere skaliranja za sve raspoložive rezultate ispitivanja C(T) i fitovanih kumulativnih raspodela (tačnije, za sve vrednosti  $W_i$  ispitivanih epruveta). U slučaju malog (preciznije, nedovoljnog) broja raspoloživih podataka (kao što će biti slučaj u konkretnom primeru u narednom poglavlju) potrebno je dodatno uraditi optimizaciju skaliranja. Parametri optimizacije u cilju određivanja parametara skaliranja se mogu odrediti na osnovu izraza (8.15) i (8.16). Za opšti slučaj  $\theta_\infty > 0$ , parametar razmere treba biti zamenjen razlikom  $\theta - \theta_\infty$ .

$$\kappa = \log_{\left(\frac{W_{i+1}}{W_i}\right)} \left( \frac{\theta_i}{\theta_{i+1}} \right) \quad (8.15)$$

$$\xi = \log_{\left(\frac{W_{i+1}}{W_i}\right)} \left[ \frac{\Xi(\beta_i)}{\Xi(\beta_{i+1})} \right] \quad (8.16)$$



### 8.5.2 Skaliranje rezultata ispitivanja na $-60^{\circ}\text{C}$ čelika 20MnMoNi 55

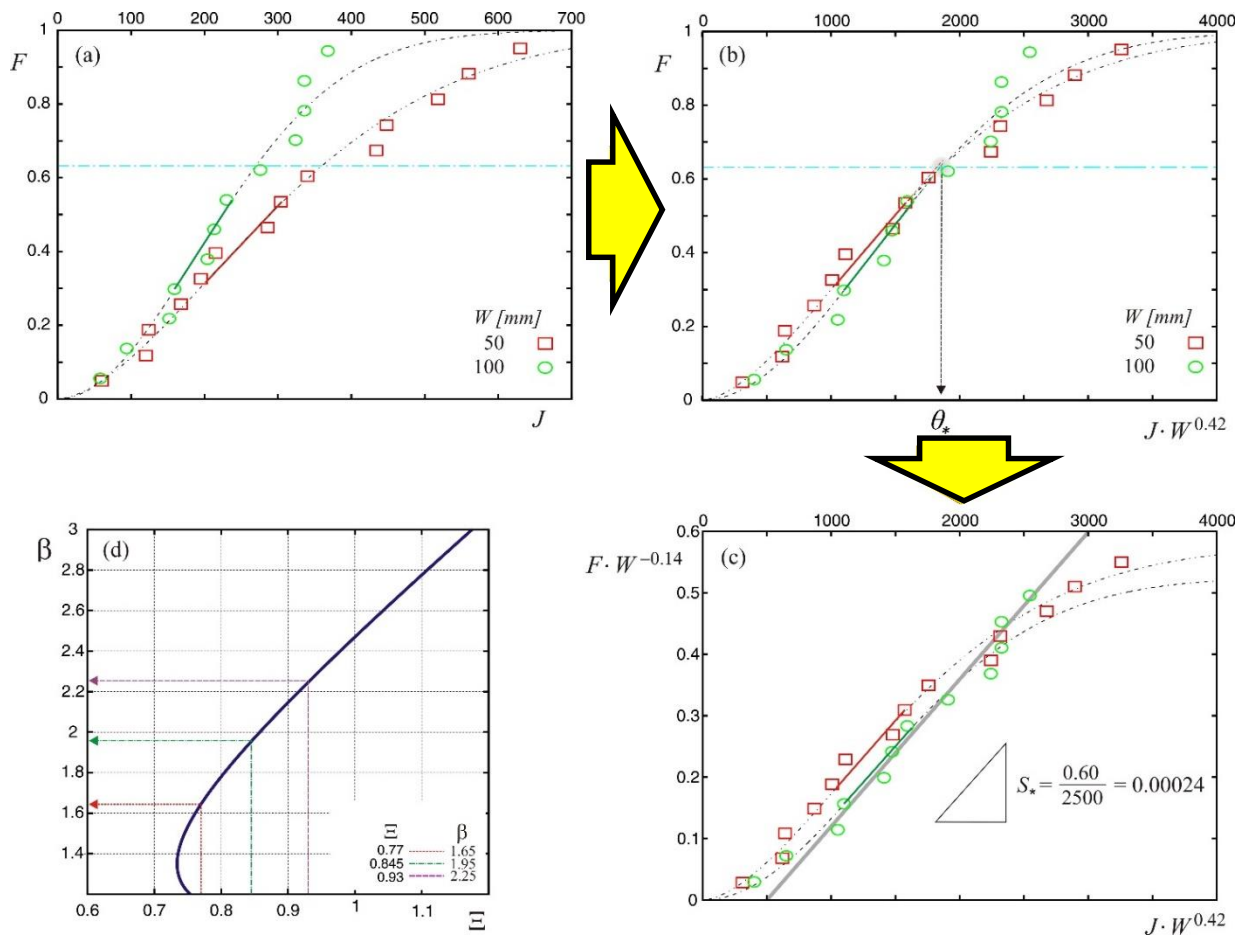
Opisani postupak skaliranja „u 2 koraka“ prikazan je za rezultate  $J_c$  ispitivanja C(T)50 i C(T)100 epruvete na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$  za epruvete koji ispunjavaju uslov  $W/B = 2,5$ . Cilj skaliranja je dobijanje izraza sličnom (8.13).

Rezultati ispitivanja C(T)200 epruveta na ovoj temperaturi nisu uzeti u razmatranje zbog samo 2 podatka ispitivanja i nisu od praktičnog značaja za ovaj postupak skaliranja. Osnova koja opravdava predloženi postupak skaliranja je geometrijska sličnost ovih epruveta, kao što je već i napomenuto u prethodnom tekstu ove disertacije, a sam pomenuti uslov (koji istovremeno i predstavlja i uslov RSD) to i matematički dokazuje. Širine  $W$  ovih epruveta, kao što se iz oznaka istih mogu videti, su 50 i 100 mm, respektivno. Iz tabela 7.4 i 7.5 se može videti da set podataka koji ispunjava ovaj uslov se sastoji od 14 i 12 rezultata, respektivno i taj set rezultata dat je u tabeli 8.3.

Tabela 8.3 Prikaz  $J_c$  ispitanih C(T)50 i C(T)100 uzoraka na  $-60^{\circ}\text{C}$  upotrebljenih za skaliranje

C(T)50	$J_c$	C(T)50	$J_c$	C(T)50	$J_c$	C(T)100	$J_c$	C(T)100	$J_c$	C(T)100	$J_c$
1	60,0	6	215,0	11	448,0	1	57,5	6	213,4	11	336,3
2	120,0	7	286,0	12	518,0	2	93,5	7	229,8	12	368,2
3	124,0	8	304,0	13	560,0	3	152	8	276,3		
4	168,0	9	340,3	14	630,0	4	159,1	9	324,5		
5	195,0	10	434,0			5	203,7	10	335,6		

Prikaz dve dvo-parametarske Vejbulove kumulativne raspodele verovatnoće loma na osnovu rezultata iz table 8.3 se može videti na slici 8.9a. Ono što je uočljivo je da mali broj podataka ispitivanja C(T)100 uzoraka utiče na izgled sigmoidnog oblika raspodele, odnosno krivu, naročito oko gornje horizontalne asimptote. Skaliranje je urađeno u jednoj iteraciji, u skladu sa prikazanom procedurom u prethodnom poglavlju. Dodatna iteracija u cilju optimizacije skaliranja je u ovom slučaju bila nepotrebna, jer je problem deterministički za slučaj korišćenja samo dve veličine uzoraka. Parametar razmere (skaliranja)  $\theta_*$  iznosi  $\theta_* = 1850$  na osnovu dobijenog  $\kappa = 0.42$ , kao što je ilustrovano na slici 8.9b. Prevojne tačke  $J$ -skaliranih krivih sa slike 8.9b su različite što ukazuje na činjenicu da su parametri oblika  $\beta$  Vejbulove kumulativne raspodele različiti, a to ukazuje na potrebu za  $F$ -skaliranjem ( $\zeta \neq 0$ ). Paralelni nagibi kumulativnih raspodela u skaliranom prostoru  $F \cdot W^{\zeta} - J \cdot W^{\kappa}$  su dobijeni za  $\zeta = -0.14$  i  $S_* = 0.00024$ , kao što je ilustrovano na slici 8.9c. Dakle, za set eksperimentalnih podataka prikazan u tabeli 8.3 dobijeni su sledeći parametri skaliranja:  $\kappa = 0.42$ ,  $\zeta = -0.14$ ,  $\theta_* = 1850$  i  $S_* = 0.00024$ . Vrednosti funkcije oblika su izračunate izrazom (8.12). Na ovaj način je moguće odrediti funkciju kumulativne Vejbulove raspodele  $J_c$  za proizvoljne vrednosti efektivnih širina epruveta  $W$  na osnovu predložene procedure skaliranja. Parametri oblika  $\beta$  Vejbulove raspodele određuju se na osnovu dobijenih vrednosti funkcije oblika korišćenjem funkcionalne zavisnosti (8.7) prikazane na slici 8.9d.

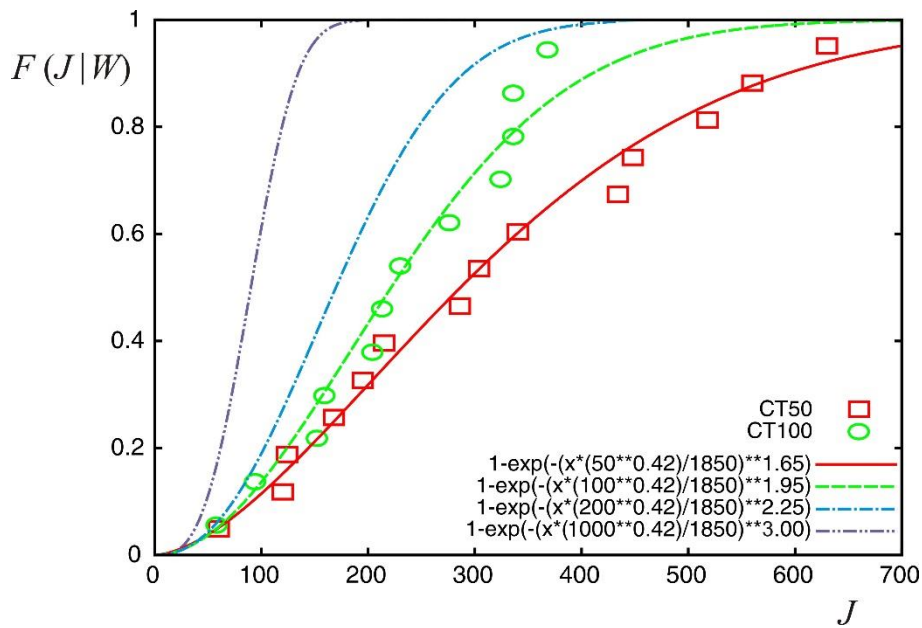


Slika 8.9 Procedura skaliranja seta eksperimentalnih rezultata C(T)50 i C(T)100 epruveta čelika 20MnMoNi 55 na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ : a) fitovanje rezultata iz tabele 8.3 ispitivanjem C(T)50 i C(T)100; b) skaliranje po horizontalnoj osi; c) skaliranje po vertikalnoj osi; d) zavisnost funkcije oblika  $\Xi$  i parametra oblika  $\beta$  Wejbulove kumulativne raspodele

Konačno, dvo-parameterska Wejbulova kumulativna raspodela se može zapisati u obliku (8.17). U ovom izrazu je parametar oblika Wejbulove kumulativne raspodele  $\beta$  zavisan od efektivne širine C(T) epruvete (odnosno,  $W$ ), što je prikazano promenom ovog parametra na slici 8.9d.

$$F(J|W) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{J \cdot W^{0.42}}{1850}\right)^{\beta(W)}\right\} \quad (8.17)$$

Prikazanom procedurom moguće je dobiti predviđanje verovatnoće lomova za proizvoljnu veličinu C(T) epruvete čelika 20MnMoNi 55 na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ , a time i donju među kumulativne raspodele sa povećanjem dimenzija C(T) epruvete. Treba naglasiti da  $J$  predstavlja vrednost  $J_c$  izražene u N/mm, dok je širina  $W$  C(T) epruvete u mm. Na ovaj način je uvedena zavisnost od veličine C(T) epruveta u području prelazne temperature ovog čelika. Na slici 8.10 prikazana je ilustracija primene izraza (8.17) dobijen predloženom postupkom skaliranja, odnosno u konkretnom slučaju predikcije verovatnoće loma cepanjem za C(T)200 i C(T)1000 epruvete. Na osnovu slike 8.8 i odgovarajuće diskusije, važno je istaći suštinsku razliku između dve predikcije ekstrapolacijom prikazane na slici 8.10: kriva koja odgovara C(T)200 predstavlja veoma pouzdano predviđanje verovatnoće loma, dok kriva koja odgovara C(T)1000 predstavlja konzervativnu donju među verovatnoće loma. Sa daljim povećanjem efektivne širine ( $W > 1000$  mm), predikcija donje međe postaje sve konzervativnija.



Slika 8.10 Predikcije verovatnoće loma cepanjem epruveta C(T)200 i C(T)1000 na osnovu predložene procedure skaliranja i izraza (8.17) za feritni reaktorski čelik 20MnMoNi 55 na temperaturi  $-60^{\circ}\text{C}$

Treba istaći, prvo, činjenicu da su fitovani izvorni podaci sa tačnošću koja je u granicama rasipanja eksperimentalnih podataka. Druga stvar koja je vredna pomena je da su fitovanje i procedura skaliranja urađeni na osnovu relativno skromnog broja podataka, odnosno vrednosti  $J_c$ .

## 9 ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati obe serije ispitivanja C(T)50 uzoraka različitih dimenzija doprinose rasvetljavanju ponašanja čelika 20MnMoNi 55 u prelaznom temperaturnom režimu. Analizirani su uticaji brzine zadatog opterećenja, temperature ( $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$ ) i veličina unete plastične deformacije (preko vrednost  $\Delta K$ ) oko vrha prsline u fazi pripreme uzoraka po standardnoj procedure za ispitivanje. Svi navedeni uticaji u određenim opsezima pogoduju pojavi krtog loma. Postavlja se pitanje u kojoj meri navedeni uticaji „odlažu“ li „ubrzavaju“ nestabilni rast prsline. Analizom parametara CMOD,  $J_c$  i  $r_c$  dobijeni su određeni odgovori.

Statističkim testovima dobijene su zadovoljavajuće vrednosti kumulativne Vejbulove verovatnoće loma cepanjem u zavisnosti od temperature i dimenzije ispitivanih C(T) epruveta. Ovi testovi ukazuju na visok nivo pouzdanosti dobijenih krivih. Čak i najmanje vrednosti nivoa poverenja (pValue) u odnosu na ostale (koji se kreću u rangu od 96 do 99.6%) pokazuju dovoljno visok nivo poverenja predikcije datih krivih. Naravno, veći broj eksperimentalnih uzoraka bi uticao na dobijanje pouzdanije dvo-parametarske Vejbulove raspodele, a time i na veći nivo poverenja dobijenih krivih. Na osnovu eksperimentalnih rezultata i dobijenih dijagrama kumulativne verovatnoće loma cepanjem je moguće uraditi relativno pouzdano predviđanje ponašanja čelika 20MnMoNi 55 u području prelazne temperature i time uočiti uticaj temperature i dimenzije C(T) epruveta. Kod uzoraka manjih dimenzija manja je verovatnoća loma cepanjem pri proizvoljnoj izabranoj vrednosti  $J_c$  nego kod uzoraka većih dimenzija.

Kao i mnoge studije, i ova predstavlja pokušaj tumačenja uočenog velikog rasipanja dobijenih vrednosti  $J_c$ . Uticaj veličine ispitivanih C(T) epruveta i njihovo ponašanje je objašnjeno kroz uticaj rasipanja parametra  $J_c$  (slučajne promenljive) i Vejbulovom kumulativnom raspodelom verovatnoće loma cepanjem ovih epruveta. Uočena pravilnost ponašanja dobijenih Vejbulovih krivih verovatnoće loma cepanjem čelika 20MnMoNi 55 ispitivanjima C(T)50 epruveta na dvema temperaturama ( $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-90^{\circ}\text{C}$ ) predstavljena relacijom (8.1) ukazuje na potencijalnu temperaturnu i dimenzionu zavisnost parametra razmere Vejbulove raspodele.

Dodatni zaključci koji se mogu izvesti iz ove studije koji se tiču uticaja brzine deformacije tokom ispitivanja i unosa inicijalne zamorne prsline na krt lom čelika 20MnMoNi 55 su:

- Ispitivanjem C(T)50 uzoraka na  $-60^{\circ}\text{C}$  sa dve brzine deformisanja pokazan je uticaj iste na nastanak krtog loma preko parametra CMOD. Veća vrednost brzine deformacije tokom ispitivanja, tačnije, 0.5 mm/min je dala manje vrednosti CMOD nego manja vrednost brzine deformacije 0,02 mm/min. Međutim, navedena promena brzine deformisanja nije uticala na vrednosti  $J_c$ .
- Parametar CMOD uzorka čije je ispitivanje započeto sa nižom brzinom deformacije „odlaže“ lom cepanjem, čime je dobijena najveća vrednost  $J_c$  u odgovarajućoj grupi uzoraka.
- Vrednosti  $J_c$  kod uzoraka kod kojih je unos inicijalne zamorne prsline sa visokom vrednošću praga  $\Delta K$  i manjim brojem ciklusa zamaranja na prvi pogled nisu se razlikovali od rezultata uzoraka na kojima je inicijalna zamorna prsline uneta sa nižom vrednošću  $\Delta K$ . Međutim, direktnim poređenjem pojedinačnih vrednosti ovog parametra mogu se uočiti nešto veće vrednosti  $J_c$  kod uzoraka pripremljenih sa visokim  $\Delta K$  i nižim brojem ciklusa. Na ovaj način se ipak uočava uticaj unete inicijalne zamorne prsline i plastične deformacije, jer veće

vrednosti  $J_c$  ukazuju na veće prisustvo veće plastična deformacija ispred vrha prslina koja je „odložila” lom cepanjem ne temperaturi od  $-90^\circ\text{C}$ .

- Rasipanje vrednosti parametra  $r_c$  kod uzoraka kod kojih je inicijalna zamorna prslina uneta sa visokom  $\Delta K$  je manje, dok su i vrednosti  $r_c$  su generalno nešto niže.

Posebno interesantno je rasipanje vrednosti  $J_c$  i  $r_c$  kod uzoraka ispitivanih na  $-90^\circ\text{C}$ . Manje vrednosti  $r_c$  kod uzoraka pripremljene sa visokom vrednošću  $\Delta K$  mogu se pripisati uticaju upravo gorepomenute veće plastične deformacije oko vrha prslina koja se suprostavlja širenju prslina i u trenutku loma dostiže malu dužinu, dok je kod uzoraka pripremljenih sa nižim pragom  $\Delta K$  obrnuto, pa su vrednosti nešto veće. Takođe se može zaključiti je da vrednosti parametra  $J_c$  uzoraka na kojima je inicijalna zamorna prslina uneta sa nižim pragom  $\Delta K$  ukazuju na konzervativnije podatke. Time snižavaju donju granicu žilavosti loma u ovoj seriji ispitivanih epruveta, čime se nameće zaključak da ovakva priprema (sa nižim  $\Delta K$ ) ima i svoje prednosti, jer je konzervativnija i pruža podatke koji mogu biti više na strani pouzdanosti i integriteta konstrukcije od ovog čelika.

Ideja skaliranja rezultata ispitivanja  $C(T)$  epruveta na  $-60^\circ\text{C}$  je bila dobijanje empirijskog izraza verovatnoće loma u funkciji  $J_c$  za proizvoljne veličine uzorka na datoj temperaturi. Osnova za skaliranje i uopšte analizu uticaja veličine  $C(T)$  se zasniva na geometrijskoj sličnosti  $C(T)$  uzoraka. Predložen je algoritma skaliranja „u 2 koraka“ sa ciljem predikcije verovatnoća loma cepanjem za proizvoljnu veličinu epruvete. U dobijenoj relaciji koja ima za cilj analizu uticaja veličine  $C(T)$  uzorka čelika 20MnMoNi 55, promenljiva veličina je efektivna širina epruvete  $W$ . Poznato je da se debljina konstrukcije, naročito u oblasti primene ovog materijala, uzima kao merodavna prilikom projektovanja ili procene integriteta konstrukcije. Zbog veze debljine  $B$  i efektivne širine  $W$  uzorka (uslova RSD) indirektno je izražena zavisnost od debljine  $B$ . Naravno, prikazano rešenje predstavlja, u najvećoj meri, nelinearnu ekstrapolaciju. Važno je istaći da predloženi postupak skaliranja ima za cilj predviđanje vrednosti kumulativne raspodele loma cepanjem ovog čelika na temperaturi  $-60^\circ\text{C}$ , uprkos izuzetno male veličine statičkog uzorka. Ovime se očigledno ističe osjetljivost izgled kumulativne raspodele od broja raspoloživih podataka, u konkretnom slučaju, rezultata  $J_c$ . Pored toga, u zavisnosti od granične vrednosti Vejbulovog parametra razmere za neograničen sistem  $\theta_\infty$ , donja međa dobijena ekstrapolacijom eksperimentalnih podataka predstavlja manje ili više konzervativnu procenu za veličine uzoraka koji su od praktičnog značaja.

Ovim ispitivanjima otvoreno je mnogo pitanja. Jedno od njih je činjenica da je ostavljen prostor analize uticaja brzine opterećenja i dimenzija uzoraka simultano na dobijene rezultate. Manje vrednosti za „Weibull fit 3“ i „Weibull fit 4“ krive nameću potrebu za većim brojem ispitivanja, ali ipak i dalje ostaje veći izazov tumačiti ih na pravi način. Drugo, ostavljen je prostor za dodatna ispitivanja u širem opsegu temperatura u cilju provere dobijene zavisnosti. Treće, dodatnim ispitivanjima bi se mogla utvrditi zavisnost brzine ispitivanja i temperature na žilavost, u pomenutom širem rasponu temperatura. Četvrto, većim brojem ispitivanja, predloženi postupak skaliranja je moguće usavršiti, uzimanjem u obzir svega prethodno rečenog, čime bi se povećala pouzdanost predviđanja. U idealnom slučaju, sa većim brojem raspoloživih podataka, celokupno skaliranje bi bilo moguće uraditi grafičkom optimizacijom na osnovu eksperimentalnih podataka. Prethodno dobijena temperaturna zavisnost Vejbulovih parametara bi mogla biti analizirana (potvrđena ili pobijena) i skaliranjem uz veći broj podataka, odnosno u širem rasponu dimenzija uzoraka i širem rasponu temperatura.

## LITERATURA

- [1] ASTM E1820-16 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. 2016.
- [2] Lancaster, J.F., *Engineering Catastrophes, Causes and Effects of Major Accidents* 3rd Edition ed. 2005: Woodhead Publishing.
- [3] H. Kobayashi, H. Onoue, *Brittle fracture of Liberty Ships: Failure Knowledge Database, 100 Selected Cases*.
- [4] M. Oruč, R. Sunulahpašić, *Lomovi i Osnove Mehanike Loma*. 2009, Zenica: Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica.
- [5] S. Sedmak, V. Grabulov, D. Momčilović, *Chronology of Lost Structural Integrity Initiated from Manufacturing Defects in Welded Structures*. *Structural Integrity and Life*, 2009. 9(1): p. 39–50.
- [6] D. J. Benac, N. Cherolis, D. Wood, *Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in Pressure Vessels*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2016. 16: p. 55–66.
- [7] Lonsdale, H., *Ammonia Tank Failure - South Africa*. in *Ammonia Plant Safety (AIChE)* 1975.
- [8] N. Filipović, K. Gerić, S. Sedmak, *Loading Condition Effect on The Fracture Of Welded Thin-Walled Storage Tank*. *Structural Integrity And Life*, 2007. 7(1): p. 21–28.
- [9] N. Filipović, K. Gerić, *Brittle and Ductile Fracture in Service of Pressure Vessels*, in *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures*, Springer, E.E. Gdoutos, Editor. 2006.
- [10] *EN 13445: Unfired pressure vessels*, 2014.
- [11] *EN ISO 21028-1: Toughness requirements for materials at cryogenic temperature - Part 1: Temperatures below -80 °C*, 2017.
- [12] *EN ISO 21028-2:2018 Cryogenic vessels — Toughness requirements for materials at cryogenic temperature — Part 2: Temperatures between -80 °C C and -20 °C*, 2018.
- [13] L. Jeremić, B. Đorđević, I. Šapić, S. A. Sedmak, N. Milovanović, *Manufacturing and Integrity of Ammonia Storage Tanks*. *Structural Integrity and Life*, 2020. 20(2): p. 123–129.
- [14] Anderson, T.L., *Fracture Mechanics, Fundamentals and Application*. 2005.
- [15] W. M. Garrison Jr, N.R.M., *Ductile fracture*. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1987. 48(11): p. 1035-1074.
- [16] N. Radović, V.G., M. Smiljanić, M. Antić, *Ni Alloyed Steels For Low Temperature Service*. *Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije (Welding and Welding Construction)*, 2003. 1: p. 14-20.
- [17] M. Stewart, O. T. Lewis, *Pressure Vessels Field Manual: Materials Selection for Pressure Vessels*, in *Common Operating Problems and Practical Solutions*. 2013. p. 95-132.
- [18] François, D., *SECTION 7.5 - Brittle Fracture*, in *Handbook of Materials Behavior Models*. 2001. p. 566-576.
- [19] Gerić, K., *Prsline u zavarnim spojevima (monografija)*. Tehničke nauke - monografije ed. 2005, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
- [20] B. Đorđević, S.S., D. Tanasković, M. Gajin, F. Vučetić, *Failure analysis and numerical simulation of slab carrying clamps*. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2021. 55: p. 336-344.
- [21] D. Tanasković, M. Arandelović, B. Đorđević, L. Jeremić, S. A. Sedmak, M. Gajin, *Repair attempts of cold crack on forklift made of C45 steel: Case study*. *Welding and Material Testing*, 2020. 4: p. 25-28.
- [22] Sedmak, A., *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija (monografija)*. 2003: Mašinski fakultet Beograd.
- [23] Knott, J.F., *Fundamentals of Fracture Mechanics*. 1973: Butterworth & Co.
- [24] Sedmak, S., *Uticaj zareza i prslina na pojavu loma pri elastičnoj i plastičnoj deformaciji*, in *Doktorska disertacija*. 1976, University of Belgrade: Belgrade.
- [25] Đorđević, V., *Mašinski materijali*. 2003, Beograd: Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [26] Gdoutos, E.E., *10. Section: Micromechanics of Fracture*, in *Fracture Mechanics - An Introduction*. 2005, Springer.

- [27] ASTM E208: *Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels*, 2017.
- [28] A. A. Griffith, *The phenomena of rupture and flow in solids*. Phil. Trans. Roy. Soc. Lon-don.: p. 163-198.
- [29] Irwin, G. R., *Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys*. 1956, Naval Research Lab., Washington, D.C.
- [30] Inglis, C.E., *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*. Proc. Inst. Naval Arch. 55, 1913: p. 219-241.
- [31] G. R. Irwin, J. A. Kies, *Fracturing and fracture dynamics*. Welding Journal. Res. Sup., 1952. 31(2): p. 95-100.
- [32] G. R. Irwin, J. A. Kies, *Critical energy rate analysis of fracture strength*. Welding Journal. Res. Sup., 1954. 33(4): p. 193-198.
- [33] Irwin, G.R. *Plastic zone near a crack and fracture toughness*. in *Proc. 7th Sagamore Research Conf. on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material*. . 1960. Racquette Lake, New York.
- [34] Irwin, G.R., *Fracture, Handbuch der Physik VI*. 1958, Springer-Verlag.
- [35] Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. J. Mech. Phys. Solids, 1960. 8: p. 100-104.
- [36] Wells, A.A., *Application of fracture mechanics at and beyond general yielding*. British Welding Journal 1963. 11: p. 563-570.
- [37] Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. J. Appl. Mech. , 1968. 35: p. 379-386.
- [38] L. Jeremić, A.S., B. Petrovski, B. Dorđević, S. Sedmak, *Structural Integrity Assessment of Welded Pipeline Designed with Reduced Safety*. Technical Gazette, 2020. 27(5): p. 1461-1466.
- [39] N. Milovanović, A.S., M. Arsic, S. A. Sedmak, Ž. Božić, *Structural integrity and life assessment of rotating equipment*. Engineering Failure Analysis, 2020. 113: p. 104561.
- [40] ASTM E399-12 *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials*. 2012.
- [41] WESTERGARD, H.M., *Bearing Pressures and Crack*. Journal of Applied Mechanics, 1939. 6: p. 49-53.
- [42] *ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials ESIS P2-92, TC1*, 1992.
- [43] Čamagić, I., *Analiza napona i deformacija zavarenih spojeva niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u prisustvu prslina (magistarski rad)*. 2009, Univerzitet u Prištini, Srbija: Kosovska Mitrovica.
- [44] ASTM E1290-07e3 *Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement*, 2007.
- [45] ASTM E1921-17a *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_o$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*. 2017.
- [46] ASTM E1823-13 *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. 2013.
- [47] Sedmak, S., *Standardna ispitivanja mehanike loma*, in *Eksperimentalne i Numeričke Metode Mehanike Loma u Oceni Integriteta Konstrukcija*, A.S. S. Sedmak, Editor. 2000, TMF, GOŠA institut, Jugoslovenski Savez za Zavarivanje: Beograd.
- [48] S. Sedmak, Z.B., *Fracture Mechanics Standard testing*, in *From Fracture mechanicsto Structural Integrity Assesment (IFFMASS 8), Monograph from Summer School of Fracture Mechanics*, Z.R. S. Sedmak, Editor. 2004: Beograd. p. 95-122.
- [49] ASTM E647-08 *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. 2008.
- [50] V. I. Prokhorov, O. Yu. Makarov, *Techniques for Fatigue Precracking in Different Shape Specimens*. in *Irradiation effects and mitigation. Proceedings of the IAEA Specialists Meeting. Working material*. 1997.

- [51] P. Paris, G.S., *Stress Analysis of Cracks*, in *Fracture Toughness Testing and its Applications* (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1965). 1965. p. 30-81.
- [52] S. A. Sedmak, Z. Burzić, S. Perković, R. Jovičić, M. Arandžević, L. Radović, N. Ilić, *Influence of welded joint microstructures on fatigue behaviour of specimens with a notch in the heat affected zone*. *Engineering Failure Analysis*, 2019. 106: p. 104162.
- [53] M. Jovanović, I. Čamagić, S. A. Sedmak, P. Živković, A. Sedmak, *Crack Initiation And Propagation Resistance Of HSLA Steel Welded Joint Constituents*. *Structural Integrity and Life*, 2020. 20(1): p. 11-14.
- [54] Sedmak, S.A., *Procena Integriteta i Veka Zavarenih Spojeva Mikrolegiranih Čelika Povišene Čvrstoće Pri Dejstvu Statičkog i Dinamičkog Opterećenja*. 2019, Univerzitet u Beogradu: Beograd.
- [55] B. Đorđević, A. Sedmak, S. A. Sedmak, U. Tatić, M. Pavišić, J. Perović, M. Milošević, *The Use of Non-Contact Optical Optical Systems for Determination of Fracture Mechanics Parameters*. *Welding & Material Testing*, 2014(2): p. 4.
- [56] B. Đorđević, U. Tatić, F. Vučetić, M. Milošević, S. A. Sedmak. *Effect of DIC equipment calibration on deformation measuring errors*. in *NANT Second International Conference on Modern Methods of Testing and Evaluation in Science*. 2015. Belgrade, Serbia.
- [57] B. Đorđević, U. Tatić, S. A. Sedmak, M. Milošević, A. Sedmak. *Digital Image Correlation Technique Application On Welded Joint - Advantages And Disadvantages*. in *Proceedings Of The 4th International Scientific Conference On Advances In Mechanical Engineering ISCAME 2016*, . 2016. Debrecen, Hungary.
- [58] I. Čamagić, S. A. Sedmak, A. Sedmak, Z. Burzić, A. Todić, *Impact Of Temperature And Exploitation Time On Plane Strain Fracture Toughness,  $K_{IC}$ , In A Welded Joint*. *Structural Integrity and Life*, 2017. 17(2): p. 239–244.
- [59] *DVM - Merkblätter. Ermittlung von Rißinitiierungs - weten und Rißwiderstandskurven bei Anwendung des J-Integrals*, DVM 002. June 1987.
- [60] Schwalbe, K.H., *Discussion: "Finite Element Solutions of Crack-Tip Behavior in Small Scale Yielding"* *Journal of Engineering Materials and Technology* (Transactions of the ASME), 1977. 99(2): p. 186–188.
- [61] J. Heerens, D. T. Read, *Fracture Behaviour of a Pressure Vessel Steel in the Ductile-to-Brittle Transition Region*, in *NISTIR 88-3099*. 1988.
- [62] Petrovski, B., *Određivanje žilavosti loma u području prelazne temperature*, in *Monografija – Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u ocenu integriteta konstrukcija (Summer school of Fracture Mechanics, 1997)*. 2000. p. 143-156.
- [63] Heerens, J., *Rißabstrumpfung, Spaltbruch im Übergangsbereich und Stabiles Rißwachstum - Untersucht mit den Methoden der Nichtlinearen Bruchmechanik*. 1990, GKSS 90/E/31 (ISSN 0344-9629).
- [64] B. Mutavdžić, E. Nikolić Đorić, *Statistika*. 2018, Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu.
- [65] Bertsche, B., *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Determination of Component and System Reliability. 2008: Springer.
- [66] Milčić, D., *Pouzdanost mašinskih sistema*. 1st edition ed, ed. R.B. V. Miltenović. 2005, Niš: Univerzitet u Nišu.
- [67] Vujanović, N., *Teorija Pouzdanosti Tehničkih Sistema*. 2nd edition ed. 1989, Split: Vojnoizdavački i Novinski Centar.
- [68] Ramović, R. M., *Pouzdanost Sistema - Elektronskih, Telekomunikacionih I Informacionih*, ed. S.P. Vitomir Milanović, Zoran Petrović. 2005, Beograd: Katedra za Mikroelektroniku i tehničku fiziku.
- [69] D. C. Montgomery, G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3rd edition ed. 2003: John Wiley & Sons, Inc.
- [70] G. Ivanović, D.S., *Pouzdanost Tehničkih Sistema - zbirka rešenih zadataka*. 1987: Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu.



- [71] G. Ivanović, D. Stanivuković, I. Beker, *Pouzdanost tehničkih sistema*. 2010, Novi Sad: FTN, Mašinski fakultet Beograd, Vojna Akademija.
- [72] M. Benšić, N. Šuvak, *Primijenjena statistika*. 2013, Osijek: Sveučilište J.J. Strossmayera, Odjel za matematiku.
- [73] A. J. Krasowsky, Yu. A. Kashtalyan, V. N. Krasiko, *Brittle-to-ductile transition in steels and the critical transition temperature*. International Journal of Fracture, 1983. 23: p. 297–315.
- [74] ASM Handbook, V.P.a.S.I., Steels, and High-Performance Alloys. 1990.
- [75] Argon, A.S., *Mechanics and Physics of Brittle to Ductile Transitions in Fracture*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2000. 123(1): p. 1-11.
- [76] Begley, J.A., Toolin, P. R., *Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of a Ni-Cr-Mo-V steel sensitive to temper embrittlement* International Journal of Fracture, 1973. 9(3): p. 243–253.
- [77] Campbell, J.E., *Plane-Strain Fracture-Toughness Data for Selected Metals and Alloys*. 1969, Office of the Director of Defense Research and Engineering: Columbus, Ohio 43201.
- [78] T. R. Mager, P. C. Riccardella, E. T. Wessel, *Fracture Mechanics for Heavy Section Steel Nuclear Pressure Vessels* Nuclear Engineering and Design (North-Holland Publishing Company), 1972. 20: p. 181-200. .
- [79] I. Milne, G. Chell, *Effect of Size on the J Fracture Criterion*, , in *Elastic-Plastic Fracture* (ed. J. Landes, J. Begley, and G. Clarke) 1979: West Conshohocken, PA: ASTM International. p. 358-377.
- [80] Dawes, M., *Elastic-Plastic Fracture Toughness Based on the COD and J-Contour Integral Concepts*, Elastic-Plastic Fracture (ed. J. Landes, and G. Clarke) Editor. 1979: West Conshohocken, PA: ASTM International. p. 307-333.
- [81] Landes, J.D., *The Effect of Size, Thickness and Geometry on Fracture Toughness in the Transition*. 1992, GKSS.
- [82] J. D. Landes, J. Heerens, K. Shwalbe, B. Petrovski, *Size, Thickness and Geometry Effects on Transition Fracture*. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct, 1993. 16/11: p. 1135-1146.
- [83] J. Landes, U.Z., J. Heerens, B. Petrovski, and K. Schwalbe, *Single-Specimen Test Analysis to Determine Lower-Bound Toughness in the Transition*. in *Fracture Mechanics: Twenty-Fourth Volume*, ed. J. Landes, D. McCabe, and J. Boulet (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994: p. 171-185.
- [84] J. Rice, M. A. Johnson, *The Role of Large Crack Tip Geometry Changes in Plane Strain Fracture*, in *Inelastic Behaviour of Solids*, M.F. Kanninen, Editor. 1970, McGraw-Hill. p. 641-670.
- [85] J. D. Landes, D. H. Shaffer, *Statistical Characetrision of Fracture in the Transition Region*. in *Proceedings of the Twelfth National Symposium on Fracture Mechanics, ASTP STP 700, American Society for Testing and Materials*. 1980. Philadelphia.
- [86] Wallin, K., *The Size Effect in  $K_{Ic}$  Results*. Enginnering Fracture Mechanics, 1985. 22(1): p. 149-163.
- [87] K. Törrönen, T. Saario, K. Wallin, J. Forstén, *Mechanism Based Evaluation of Materials Behavior and Reference Curves*. Nuclear Engineering and Design, 1984. 81(1): p. 35-50.
- [88] T. Anderson, D. Stienstra, *A Model to Predict the Sources and Magnitude of Scatter in toughness Data in the Transition Region*. Journal of Testing and Evaluation, 1989. 17(1): p. 46-53.
- [89] D. Stienstra, T. L. Anderson, L. J. Ringer, *Statistical Inferences on Cleavage Fracture Toughness Data*. Journal of Engineering Materials and Technology, 1990. 112(1): p. 31-37.
- [90] D. E. McCabe, J. G. Merkle, R. K. Nanstrad, *A Perspective on Transition Temperature and  $K_{Ic}$  Data Charatcetrisation, Fracture Mehcanics*. 24th vol., STM STP 1207, 1994: p. 215-232.
- [91] U. Zerbst, J. Heerens, B. Petrovski, *Abschätzung Der Untergrenze Des Bruchwiderstandes Im Duktil-Sproden Übergangsbereich*. 1992, GKSS.

- [92] U. Zerbst, J. Heerens, K.-H. Schwalbe, *Estimation of Lower Bound Fracture Resistance Of Pressure Vessel Steel in The Transition Regime*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 1993. 16(11): p. 1147-1160.
- [93] E. Džindo, Z. Radaković, B. Petrovski, S. Tadić, S. Petronić, S. Sedmak and B. Đorđević, *Fracture Toughness in the Transition Temperature Region*, in *Structural Integrity of Welded structures XII, ISCS17 conference, ISBN: 978-3-0357-1277*. 2017: Timișoara, Romania. p. 92-97.
- [94] Wei-Sheng, L., *On the statistical modeling of cleavage fracture toughness of structural steels*. Mechanics of Materials, 2016. 101: p. 81-92.
- [95] C. Berejnoi, J. E. Perez Ipiña, *Fracture Toughness of Ferritic Steels in the Ductile-to-Brittle Transition Region*. Fracture Mechanics - Properties, Patterns and Behaviours, 2016.
- [96] T. L. Anderson, R. H. Dodds, *Specimen Size Requirements for Fracture Toughness Testing in the Transition Region*. Journal of Testing and Evaluation, 1991(19/1): p. 123-134.
- [97] T. L. Anderson, *Crack tip parameters for large scale yielding and low constraint configurations*. International Journal of Fracture, 1989. 41: p. 79-104.
- [98] Irwin, G.R., *Fracture Mode Transition for a Crack Traversing a Plate*. Journal Basic Engineering, 1960. 82(2): p. 417-425.
- [99] Merkle, J.G., *Evaluations of the Irwin  $\beta_{Ic}$  adjustment for small specimen fracture toughness data*. Nuclear Engineering and Design, 1985. 86(1): p. 111-117.
- [100] D. E. McCabe, U. Zerbst, J. Heerens, *Development of Test Practice Requirements for a Standard Method on Fracture Toughness Testing in the Transition Range*. 1993, Geesthacht GKSS.
- [101] K. H. Schwalbe, J. D. Landes, J. Heerens, *Classical Fracture Mechanics Method*. 2007.
- [102] G. Pluvinae, J. Capelle, M. Hadj Méliani, *A Review of the Influence of Constraint on Fracture Toughness*. Structural Integrity and Life, 2014. 14(2): p. 65-78.
- [103] C. Ruggeiri, R. H. Doods, K. Wallin, *Constraint effects on reference temperature,  $T_0$ , for ferritic steels in the transition region*. Engineering Fracture Mechanics, 1998. 60(1): p. 19-36.
- [104] X. Gao, R. H. Dodds Jr, *Constraint effects on the ductile-to-brittle transition temperature of ferritic steels: a Weibull stress model*. International Journal of Fracture 2000. 102: p. 43-69.
- [105] T. L. Anderson, *Constraint Effects on Fracture Toughness in the Ductile-Brittle Transition Region*. 2020: Welding Research Council inc.
- [106] Bažant, Z.P., *Size effect*. International Journal of Solids and Structures 2000. 37(1-2): p. 69-80.
- [107] Williams, E., *Some observations of Leonardo, Galileo, Mariotte and others relative to size effect*. Annals of Science, 1957. 13(1): p. 23-29.
- [108] Weibull, W., *A Statistical theory of strength of materials*. Ingeniörsvetenskapsakademiens handlingar. 1939, Stockholm: Generalstabens litografiska anstalts förlag, .
- [109] Bažant, Z.P., *Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal*. Journal of Engineering Mechanics, 1984. 110(4): p. 518-535.
- [110] Kaplan, M.F., *Crack propagation and the fracture concrete*. ACI J., 1961. 58 (11).
- [111] Z. P. Bažant, J. Planas, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. 1998.: CRC Press.
- [112] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*. Cement and Concrete Research, 1976. 6(6): p. 773-781.
- [113] A. Carpinteri, G. Ferro, S. Ivernizzi, *A Truncated Statistical Model for Analyzing the Size-Effect on Tensile Strength of Concrete Structures*, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings of FraMCoS-2*. 1995. Zurich: Aedificatio Publishers. p. 557-570.
- [114] A. Carpinteri, B. Chiaia, *Multifractal scaling law for the nominal strength variation of concrete structures*, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, edited by Folker H. Wittmann*. 1994, Aedificatio Publishers. p. 581-596.

- [115] S. Mastilović, *Some Sigmoid and Reverse-Sigmoid Response Patterns Emerging from High-Power Loading of Solids*. Theoretical and Applied Mechanics, 2018. 45(1): p. 95–119.
- [116] *RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis*, RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Zdeněk P. Bažant, chair). Materials and Structures, 2015. 48.
- [117] G. Timár, F. Kun, H. A. Carmona, H. J. Herrmann, *Scaling laws for impact fragmentation of spherical solids*. Physical Review E, 2012. 86: p. 016113.
- [118] W-S. Lei, G. Qian, Z. Yu, F. Berto, *Statistical size scaling of compressive strength of quasi-brittle materials incorporating specimen length-to-diameter ratio effect*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019. 104: p. 102345.
- [119] M. Genet, G. Couégnat, A. P. Tomsia, R. O. Ritchie, *Scaling strength distributions in quasi-brittle materials from micro- to macro-scales: A computational approach to modeling Nature-inspired structural ceramics*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014. 68: p. 93-106.
- [120] Bažant, Z.P., *Scaling of quasibrittle fracture: asymptotic analysis*. International Journal of Fracture, 1997. 83: p. 19–40.
- [121] B. Djordjevic, A. Sedmak, B. Petrovski, A. Dimic, *Weibull Probability Distribution for Reactor Steel 20MnMoNi55 Cleavage Fracture in Transition Temperature*. Procedia Structural Integrity, 2020. 28: p. 295-300.
- [122] B. Đorđević, A. Sedmak, B. Petrovski, S.A. Sedmak, Z. Radaković, *Load and Deformation Effects on Brittle Fracture of Ferritic Steel 20MnMoNi 55 in Temperature Transition Region*. Structural Integrity and Life (EISSN 1820-7863), 2020. 20(2): p. 184–189.
- [123] B. Djordjevic, A. Sedmak, B. Petrovski, A. Dimić, *Probability distribution on cleavage fracture in function of  $J_c$  for reactor ferritic steel in transition temperature region*. Engineering Failure Analysis, 2021: p. 105392.
- [124] R. B. D'Agostino, M. A. Stephens, *Goodness-of-fit-techniques (Statistics: a Series of Textbooks and Monographs, Vol. 68)*. Goodness-of-fit-techniques (Statistics: a Series of Textbooks and Monographs. Vol. 68. 1986.
- [125] *WOLFRAM MATHEMATICA 12.0 Software*. Available from: [www.wolfram.com](http://www.wolfram.com).
- [126] D. Stauffer, A. Aharony, *Introduction To Percolation Theory*. 1992, London: Taylor & Francis.

## **BIOGRAFSKI PODACI AUTORA**

Branislav R. Đorđević je rođen 11.06.1988. u Smederevu. Osnovnu školu „Dositej Obradović“ završio je u Vranovu kod Smedereva, a srednju Tehničku školu u Smederevu. Mašinski fakultet u Beogradu je upisao 2009. godine. Osnovne akademske studije je završio 2012. godine, dok je master akademske studije završio 2014. godine na katedri za Tehnologiju materijala (modul Zavarivanje i zavarene konstrukcije). Doktorske studije je upisao novembra 2015.

Tokom 2014. i 2015. godine kandidat je učestvovao na projektu MCAST kao saradnik i pomoćnik prilikom organizovanja i držanja nastave na engleskom jeziku i bio je angažovan na zadacima tehničke podrške prilikom izrade audio i video nastavnog materijala. Tokom 2015. i 2016. godine angažovan je kao saradnik i konstruktor laboratorijske opreme za ispitivanje biomedicinskih uređaja. Druga zaduženja su mu bila pisanje radnih izveštaja i izvođenje eksperimenata. Ovaj projekat je realizovan pod rukovodstvom prof. dr Nenada Filipovića sa Fakulteta Inženjerskih Nauka Univerziteta u Kragujevcu. Od jula 2016. godine angažovan je u Inovacionom centru Mašinskog Fakulteta u Beogradu kao istraživač-pripravnik na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja TR35011 „Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature” pod rukovodstvom prof. dr Ljubice Milović sa Tehnološko-metalurškog Fakulteta Univerziteta u Beogradu. Od aprila 2019. angažovan je i u Imenovanom telu Inovacionog centra Mašinskog Fakulteta u Beogradu za razvrstavanje opreme pod pritiskom. Tokom 2020. i 2021. angažovan je na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu u cilju izrade pisanih vežbi i pripreme istih na predmetu Mehanika 1 u letnjem semestru.

Kandidat je učestvovao u organizaciji međunarodnih konferencija NT2F14, TEAM 2015, ECF22 i dr. Kandidat je učesnik brojnih međunarodnih konferencija i autor izlaganih radova, poput konferencija ISCAME 2016 u Debecenu, FRACT3 u Alžiru, ICF14 na Rodosu, IRMES 2017 u Trebinju, KOD 2018 u Novom Sadu, NT2F18 u Lisabonu, ECF22 u Beogradu i dr.

Kandidat poseduje i licence Lead Auditora SRPS ISO 9001 i internog proverivača prema standardu SRPS ISO 17020.

### **Radno iskustvo**

2014 – septembar 2015, Inovacioni centar Mašinskog Fakulteta u Beogradu Kraljice Marije 16. Beograd (saradnik/tehnička podrška)

2015 – 2016: BioIRC, Prvoslava Stojanovića 6, Kragujevac (istraživač/konstruktor)

2016 – do danas: Inovacioni centar Mašinskog Fakulteta u Beogradu, Kraljice Marije 16. Beograd (istraživač pripravnik/istraživač saradnik)

2019 – do danas: Imenovano telo za opremu pod pritiskom Inovacionog Centra, Kraljice Marije 16, Beograd (Rukovodilac za kvalitet za kontrolno telo)

## **Prilog 1**

### **Izjava o autorstvu**

**Potpisan**

Branislav R. Đorđević

**broj indeksa**

D14/2015

**Izjavljujem:**

da je doktorska disertacija pod naslovom:

### **ŽILAVOST FERITNOG REAKTORSKOG ČELIKA U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Beograd, 18.05.2021.

**Potpis doktoranda**

---

## Prilog 2

### Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Branislav R. Đorđević

Broj indeksa: D14/2015

Studijski program: Doktorske akademske studije

Naslov rada: **ŽILAVOST FERITNOG REAKTORSKOG ČELIKA U PODRUČJU  
PRELAZNE TEMPERATURE**

Mentor: Prof. dr Aleksandar Sedmak

Potpisan: Branislav R. Đorđević

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portal **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

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

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

Beograd, 18.05.2021.

**Potpis doktoranda**

---

## Prilog 3

### Izjava o korišćenju

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

#### **ŽILAVOST FERITNOG REAKTORSKOG ČELIKA U PODRUČJU PRELAZNE TEMPERATURE**

koja je moje autorsko delo.

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

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Beograd, 18.05.2021.

**Potpis doktoranda**

---

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 najslobodnija 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 prerade. 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 prerade. 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.