



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



**PRILOG PROCENE VEKA
KONSTRUKCIJE TORNJA
POSTROJENJA ZA ISTRAŽIVANJE
NAFTE I GASA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Kandidat
Mr Milenko Stašević

Mentor
Prof. Dr Katarina Gerić

Novi Sad, 2014.



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Миленко Сташевић, магистар техничких наука
Ментор, МН:	Проф. Др Катарина Герић
Наслов рада, НР:	Прилог процене века конструкције торња постројења за истраживање нафте и гаса
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Република Србија
Година, ГО:	2014.
Издавач, ИЗ:	
Место и адреса, МА:	23 000 Зрењанин, Србија, 4.јули 40/9
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	(11/170/-/31/73/60/3)
Научна област, НО:	Наука о материјалима и инжењерски материјали (машинство)
Научна дисциплина, НД:	Механика лома, Испитивање материјала, Век конструкција
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Замор, методе ширења прслине, метода густине енергије деформације, процена преосталог века.
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека факултета
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Предмет ове докторске дисертације је дефинисање метода и процедуре за процену века конструкције торња постројења за истраживање нафте и гаса. Дати су резултати експерименталних истраживања ради анализе отпорности према прслинама при статичком и при променљивом оптерећењу експлоатисаног и новог материјала констркције торња постројења за истраживање нафте и гаса.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	2014.
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Растлав Шостаков, ванредни професор Члан: Др Александар Седмак, редовни професор Члан: Др Стеван Максимовић, научни саветник Члан: Др Себастијан Балаш, доцент Члан, ментор: Др Катарина Герић, редовни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	
Type of record, TR :	Textual Ounted Article
Contents code, CC :	
Author, AU :	MSc Milenko Stašević
Mentor, MN :	Prof. Katarina Gerić, PhD
Title, TI :	Contribution assessment life of construction derrick plant for investigation oil and gas
Language of text, LT :	serbian
Language of abstract, LA :	serbian/english
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Republic of Serbia
Publication year, PY :	2014.
Publisher, PB :	
Publication place, PP :	
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	(11/170/-/31/73/60/3)
Scientific field, SF :	Materials Science and engineering materials (mechanical engineering)
Scientific discipline, SD :	Fracture Mechanics, Testing of Materials, Life Constructions
Subject/Key words, S/KW :	Fatigue, crack propagation methods, strain energy density method, residual life estimation.
UC	
Holding data, HD :	
Note, N :	
Abstract, AB :	The topic of this doctoral dissertation is definition methods and proceduries for an analysis of an assessmen life of construction derrick plant for investigation oil and gas. The results of experimental investigation performed for the analysis of crack resistance under static and under variable loading eksploatacion and new of materials of construction derrick plant for investigation oil and gas.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	2014.
Defended Board, DB :	President: Rastislav Šostakov, PhD
	Member: Aleksandar Sedmak, PhD
	Member: Stevan Maksimović, PhD
	Member: Sebastijan Baloš, PhD
	Member, Mentor: Katarina Gerić, PhD
	Menthor's sign

ZAHVALNICA

Doktorski rad je u osnovi je izrađen u Službi razvoja i projektovanja, pogona Održavanje - Zrenjanin, NIS ad Gazprom neft, Novi Sad. Ipak, veliki deo rada je urađen pomoću većeg broja lica i organizacija.

Menadžmentu kompanije NIS ad Gazprom neft, na čelu sa generalnim direktorom Kirilom Kravčenkou, zahvaljujem na razumevanju i omogućenoj podršci za izradu rada. Nadam se da će izvodi iz ovog rada, naći praktičnu primenu u kompaniji, na povećanju bezbednosti rada naftaške opreme.

Društvu za vek i integritet konstrukcija (DIVK) iz Beograda, zahvaljujem na upoznavanju sa prslinama i analizi veka konstrukcije. Tu je i stvorena osnovna ideja rada.

Mentoru rada, prof. dr Katarini Gerić i članovima komisije za ocenu i odbranu rada: prof. dr Rastislav Šostakov, prof. dr Aleksandar Sedmak, prof. dr Stevan Maksimović i docent dr Sebastijan Baloš, izražavam posebnu zahvalnost na svestranoj i dragocenoj pomoći pri izradi doktorske disertacije.

Vojno tehničkom institutu - katedri za eksperimentalnu čvrstoću iz Beograda, na čelu sa dr Zijahom Burzićem i njegovim saradnicima, zahvaljujem na realizaciji eksperimentalnih ispitivanja.

Konačno, realizacija ovog rada, ne bi bila moguća, bez nesebičnog angažovanja kolega iz kompanije NIS ad. Ovim putem se, najsrdačnije zahvaljujem svakom od njih.

u Zrenjaninu, decembar 2013.

Autor

SADRŽAJ

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

1. UVOD	1
2. METODOLOŠKI KONCEPT DISERTACIJE	4
2.1. Problem istraživanja	4
2.2. Predmet istraživanja	4
2.3. Cilj istraživanja	5
2.4. Hipoteze u istraživanju	5
2.5. Dosadašnja istraživanja	6
2.6. Metode istraživanja	12
2.7. Naučna i društvena opravdanost istraživanja	12
4. RUDARSKE OPERACIJE	14
3.1. Postrojenje za istraživanje nafte i gasa	14
3.2. Osnovni podaci	15
3.3. Toranj	15
3.4. Redovne rudarske operacije	16
3.4.1. <i>Spuštanje sprava</i>	18
3.4.2. <i>Vađenje sprava</i>	19
3.4.3. <i>Bušenje cementnog čepa</i>	20
3.5. Nepredvidive rudarske operacije	21
3.5.1. <i>Instrumentacija</i>	21
4. OSNOVE MEHANIKE LOMA	23
4.1. Greške u osnovnom materijalu konstrukcija	23
4.2. Značaj mehanike loma	24
4.3. Osnovne definicije mehanike loma	28
4.3.1. <i>Osnovni oblici obrazovanja površine preloma</i>	28
4.3.2. <i>Faktor intenziteta napona</i>	29
4.4. Primena parametara mehanike loma	31
4.5. Analiza zamora sa stanovišta mehanike loma	33
4.5.1. <i>Koncept linearno elastične mehanike loma (LEML)</i>	33
4.5.2. <i>Koncept elasto plastične mehanike loma (LPML)</i>	38
4.6. Pogodnost za upotrebu	38
5. POGRAM I PLAN ISPITIVANJA	40
5.1. Materijal	41
5.2. Uzorkovanje	42
5.3. Određivanje zateznih osobina	42
5.4. Udarne ispitivanja	43
5.5. Određivanje žilavosti loma K_{Ic} pri ravnoj deformaciji	47
5.6. Ispitivanje promenljivim opterećenjem	54
5.7. Određivanje parametara rasta zamorne prsline	56
5.8. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor	59
5.8.1. <i>Osvrt na ponašanje materijala pri MCZ</i>	60
5.8.2. <i>Ciklična naponsko deformaciona kriva i kriva stabilizovanih histereza</i>	62
5.8.3. <i>Osnovna kriva i modifikovane krive MCZ</i>	63

5.8.4. Ispitivanje otpornosti na MCZ	69
5.9. Makro i mikrostrukturalna ispitivanja	70
6. REZULTATI ISPITIVANJA	72
6.1. Materijal	72
6.2. Određivanje zateznih osobina	72
6.3. Udarne ispitivanja	74
6.4. Određivanje žilavosti loma K_{Ic} pri ravnoj deformaciji	86
6.5. Ispitivanja promjenljivim opterećenjem	89
6.6. Određivanje parametara rasta zamorne prsline	90
6.7. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor	92
6.8. Makro i mikrostrukturalna ispitivanja - rezultati	101
6.8.1. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka OM	101
6.8.2. Površina preloma uzoraka za zatezanje	103
6.8.3. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka na žilavost	105
6.8.4. MZIS novi i eksloatisani OM	107
7. METODE PROCENE PREOSTALOG VEKA KONSTRUKCIJE TORNJA	110
7.1. Procena preostalog veka primenom konvencionalnih metoda	111
7.1.1. Opšte napomene	111
7.1.2. Zakoni širenja prsline pri cikličnim opterećenjima konstantne amplitude	112
7.1.3. Parisov zakon	112
7.1.4. Modifikovani Parisov zakon	114
7.1.5. Zakon širenja Walker-a	115
7.1.6. Formanov zakon širenja	115
7.1.7. Uključivanje efekata plastifikacije u zakon širenja	116
7.1.8. Procena veka strukturalnih elemenata pri opštem spektru opterećenja	116
7.1.9. Procena preostalog veka	117
7.1.10. Uticaj oblika spektra opterećenja na brzinu širenja prsline	118
7.1.11. Numerički primeri: Proračunska analiza širenja prsline primenom konvencionalnih zakona širenja	119
7.2. Procena preostalog veka primenom metoda gustine energije deformacije	123
7.2.1. Osnove metode GED	125
7.2.2. Formulisanje modela za procenu preostalog veka na bazi GED	126
7.2.3. Faktor intenziteta napona	127
7.2.4. Numerički rezultati širenja prsline na bazi GED	129
7.3. Poređenje rezultata širenja prsline primenom različitih pristupa	131
7.4. Zaključne napomene po pitanju primene GED	133
7.5. Procena preostalog veka za realni spektar opterećenja	133
8. ANALIZA REZULTATA	140
8.1. Hemijski sastav i mikrostrukturalna ispitivanja	140
8.2. Zatezne osobine	140
8.3. Udarne ispitivanja	140
8.4. Kritični faktor K_{Ic} intenziteta napona	144
8.5. Ispitivanja promjenljivim opterećenjem	144
8.6. Primena mehanike loma pri proučavanju zamora	145
8.7. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor	145
8.8. Rezultati metoda za procenu preostalog veka konstrukcije tornja	153
8.8.1. Procena preostalog veka elemenata konstrukcije tornja primenom	

<i>konvencionalnih zakona širenja prsline</i>	147
8.8.2. <i>Procena preostalog veka elemenata konstrukcije tornja primenom konvencionalnih zakona širenja prsline</i>	148
8.8.3. <i>Verifikacija metoda za određivanja preostalog veka konstrukcije tornja</i>	148
8.8.4. <i>Određivanje preostalog veka konstrukcije tornja za realni spektar opterećenja</i>	148
9. ZAKLJUČAK	150
10. PRILOZI	152
10.1. Dijagrami rudarskih operacija	152
10.2. Slike havarija naftaških postrojenja	156
10.3. Zbirni pregled rezultata ispitivanja	158
11. LITERATURA	162

LISTA OSNOVNIH SKRAĆENICA I OZNAKA

MKE - metoda konačnih elemenata

FIN - faktor intenziteta napona

GED - metoda gustine energije deformacije

PP_VEK - Procena Preostalog veka elemenata konstrukcija (programski paket)

F - opterećenje

t - vreme

IBR - ispitivanje bez razaranja

LEML - linearno elastična mehanika loma

EPML - elasto plastična mehanika loma

EM - eksploatisani materijal (materijal iz eksploatacije)

NM - novi materijal

CTOD (δ) - otvaranje vrha prsline

δ_{Ic} - kritično otvaranje vrha prsline

δ^* - dužina process zone u kojoj se pretpostavlja zamorno oštećenje (zona oštećenja)

J - J (džej) integral

J_{Ic} - kritični J integral

J_{el} - elastične komponenta J integrala

J_{pl} - plastične komponente J integrala

S - gustina energije deformacije

a - dužina prsline

a_i - tekuća vrednost dužina prsline

a_c - kritična dužina prsline

a_0 - početna dužina prsline

a_d - dozvoljena dužina prsline

Δa - priraštaj dužine prsline

a_{ol} - dužina prsline pre pojave preopterećenja

σ - udaljeni napon

σ_m - srednji napon

σ_m^* - lokalni srednji napon u zona oštećenja

σ_y^* - ciklična granična čvrstoća

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - komponente napona σ

τ_{xy} - tangencijalni napon

S_{\min} (σ_{\min}) - minimalni napon

S_{\max} (σ_{\max}) - maksimalni napon

x, y, z - koordinate i koordinatne ose

r - poluprečnik zaobljenja prsline, poluprečnik otvora

r_{cy} - dužina zone plastifikacije oko vrha prsline

r_{ol} - dužina tekuće zone plastifikacije oko vrha prsline

θ - ugao posmatranja prsline

Y - faktor geometrije

$\frac{da}{dN}$ - brzina rasta prsline

χ - nivo opterećenja

N - broj ciklusa

N_i - tekuća vrednost broja ciklusa

N_u - ukupan broj ciklusa

N_f - ukupan broj ciklusa do inicijacije (stvaranja) prsline

N_p - ukupan broj ciklusa propagacije (širenja) prsline

N^* - broj ciklusa za širenje prsline kroz zonu δ^*

K_c, K_{Ic} - žilavost loma materijala

K, K_I - faktor intenziteta napona

K_{\max} - maksimalni faktor intenziteta napona

K_{\min} - minimalni faktor intenziteta napona

$K_{\max, ol}$ - vrednost FIN pre pojave preopterećenja

ΔK_{th} - opseg praga faktora intenziteta napona

ΔK_{th0} - opseg praga faktora intenziteta napona za koeficijent asimetrije $R=0$

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

$R = K_{\min}/K_{\max}$ ($R = S_{\min}/S_{\max}$) - odnos faktora intenziteta napona

V_p - pomeranje

E - Young-ov modul elastičnosti

F_{GY} - dinamička sila napona tečenja

F_M - maksimalna sila na krivoj sila - vreme

F_F - sila početka nestabilnog rasta prsline

F_A - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline

s_{GY} - deformacija na početku plastičnog loma ligamenta

s_M - deformacija pri maksimalnoj sili

s_F - deformacija pri inicijaciji nestabilnog rasta prsline

s_A - deformacija na kraju nestabilnog rasta prsline

s_T - deformacija na kraju krive sila - deformacija, pri čemu je kraj ove sile definisan kao 0,02 od maksimalne sile

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

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

m - masa

v_0 - početna brzina udara

t_0 - trenutak vremena

$s(t)$ - ugib

A_{uk} - ukupna energija udara

A_I - energiju za stvaranje prsline

A_P - energiju za širenje prsline

F_L - nazivna granična sila

B - širina SEB epruvete

L - raspon između oslonaca

b - dužina ligamenta

R_T - efektivni napon tečenja

$R_{p0,2}$, R_e - granica tečenja

R_m - zatezna čvrstoća

W , w - širina epruvete

% DL - ocena dela duktilnog loma

$\frac{dJ}{da}$ - nagib regresione krive

a_{i-1} - prethodna dužina prsline

$C_i = \operatorname{tg}\alpha_i$ - nagib posmatrane linije rasterećenja

$C_{i-1} = \operatorname{tg}\alpha_{i-1}$ - nagib prethodne linije rasterećenja

η_{i-1} - koeficijent za SEB epruvete

A_{pl} - plastična komponenta energije

B_N - neto širina epruvete

ν - Poasonov koeficijent

S_a - amplituda napona

S_f - trajna dinamička čvrstoća

ϵ - ukupna deformacija

$\Delta \epsilon$ - ukupna deformacija,

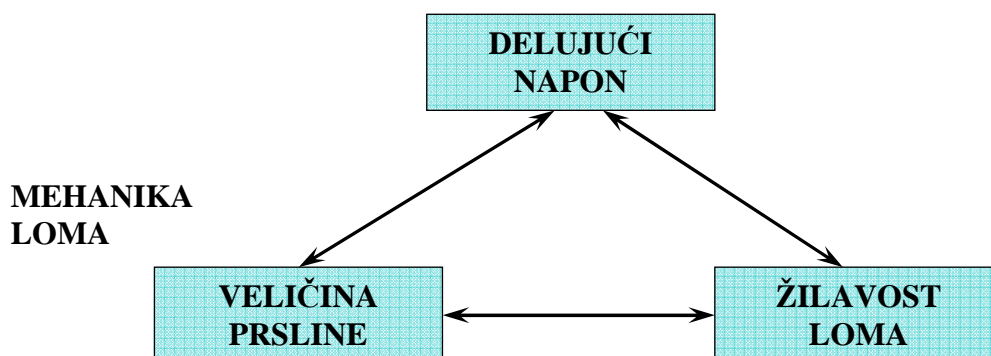
$\Delta \epsilon_e$ - ukupna elastična deformacija

$\Delta \varepsilon_p$ - ukupna plastična deformacija
 R_ε - faktor asimetrije
 n' - eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja
 S - napon
 e_a - amplituda deformacije
 S_a - amplituda napona
 K' - koeficijent ciklične čvrstoće
 σ' - koeficijent zamorne čvrstoće
 ε' - koeficijent zamorne duktilnosti
 b - eksponent zamorne čvrstoće
 c - eksponent zamorne duktilnosti
 Y - korektivna funkcija za određivanje faktora intenziteta napona
 C, m - Parisove konstante širenja prsline
MCZ - malociklični zamor
VCZ - visokociklični zamor
 $A\%$ - izduženje
 ω_p - energiju nastalu usled plastične deformacije
 $I_{n'}, \psi$ - konstante zavisne od indeksa ojačavanja n'
 W_c - apsorbovanu energija za vreme ciklusa opterećenja.

1. U V O D

Sigurnost u eksploataciji konstrukcija predstavlja veoma aktuelan problem i kao takav jeste predmet istraživanja različitih grana tehnike. Za bezbednost konstrukcija, veoma je važno da se obuhvate utvrđeni parametri osobina materijala i podaci o uslovima njihove eksploatacije. Vek konstrukcije je uslovljen dobrim izborom materijala odgovarajućih osobina i kvaliteta i kvalitetno izabranom i dobro sprovedenom tehnologijom izrade, pod uslovom da opterećenja budu u skladu sa očekivanim. Potrebni podaci o tome, treba da se dobiju i iz analize eksploatacijskih oštećenja. Posmatranje promena na konstrukcionim materijalima u uslovima eksploatacije, se praktično sprovodi tokom celokupnog radnog veka, i to pri planiranim i vanrednim remontima, za potrebe rekonstrukcije i revitalizacije konstrukcija i u slučaju njihovih havarija. Praćenje i kontrola osobina konstrukcionih materijala kod opterećenih delova, predstavljaju osnovni pokazatelj pouzdanosti njihovog rada.

Naučna oblast, koja se bavi problemima prslina i njihovog uticaja na ponašanje materijala i konstrukcija naziva se mehanika loma. Ona je počela svoj razvoj početkom XX veka radovima Inglisa o koncentraciji napona [1.1] i Grifita o brzini oslobađanja energije [1.2], a pedesetih godina Irvin je postavio temelje linearno elastične mehanike loma uvođenjem faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti [1.3,1.4]. Od tada, mehanika loma beleži i prve značajne praktične uspehe objašnjenjem lomova brodova i mlaznih aviona [1.5]. Sledeći njen razvoj je proširenje na elasto plastičnu oblast analizom plastične zone ispred vrha prslina [1.5,1.6] i uvođenjem odgovarajućih parametara otvaranja vrha prslina [1.7] i J integrala [1.8] u području zamora [1.9]. Uporedo sa gore navedenim sledio je i razvoj numeričkih metoda u strukturalnoj analizi konstrukcija i mehanici loma [1.10 - 1.15]. Primena mehanike loma od samog njenog početka zasniva se na dvostrukom tumačenju njenih parametara: sa jedne strane oni predstavljaju opterećenje i geometriju konstrukcija, uključujući geometriju prslina, a sa druge strane svojstvo materijala, odnosno njegovu otpornost na rast prslina. Osnovna uloga mehanike loma je da matematički poveže tri promenljive veličine, napon, veličinu greške i žilavost loma. Na ovaj način je uspostavljen klasični trougao mehanike loma, sl. 1.1, što omogućava da mehanika loma postane jedan od temelja nove naučne oblasti - integriteta konstrukcija. Drugačije rečeno, umesto da se bavi samo analizom loma, mehanika loma je postala značajan alat u rukama inženjera, koji imaju zadatak da spreče lom konstrukcije.



Slika 1.1. Trougao mehanike loma.

Mehanika loma je uvela promenu razmišljanja u inženjerskoj praksi, tj. uvela je prihvatanje neminovnosti postojanja prslina i sličnih grešaka u konstrukcijama i neophodnost njihove analize i uticaja na vek konstrukcija.

Pod integritetom konstrukcija [1.12], podrazumeva se naučna oblast, koja obuhvata analizu stanja, dijagnostiku ponašanja, procenu veka i revitalizaciju konstrukcija. Ovo znači da, osim uobičajene situacije u kojoj treba proceniti integritet konstrukcije, kada se ispitivanjem bez razaranja otkrije greška, ova oblast obuhvata i analizu naponskog stanja konstrukcije bez prslina, najčešće metodom konačnih elemenata (MKE). Ovakvo se dobija precizna raspodela napona i deformacija, koja omogućava da se utvrde "kritična" mesta u konstrukciji, čak i pre pojave prslina [1.13,1.14,1.15]. Ovakav način razmišljanja, posebno je važan za konstrukcije, koje su izložene radnim uslovima tipičnim za nastanak prslina, kao što su zamor, korozija, povišene temperature i pritisci, itd.

Kada se radi o proceni veka konstrukcija opterećenih cikličnim opterećenjima ona se može podeliti u dve oblasti i to: (i) do pojave inicijalnog oštećenja i (ii) za vreme širenja prslina. Ovo su u osnovi dve tematske naučne oblasti koje se po pravilu proučavaju nezavisno. Pri proučavanjima procene veka do pojave inicijalnog oštećenja koriste se analitičke i numeričke metode za određivanje naponskih stanja u kritičnim lokacijama u sprezi sa odgovarajućim kriterijumima, iskazano preko broja ciklusa, kada će se pojaviti inicijalno oštećenje. Kada se radi o proceni veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prslina, koriste se različiti zakoni širenja prslina. Za ove vrste analiza, odnosno za procene veka za vreme širenja prslina po pravilu se koriste konvencionalni zakoni širenja prslina (Paris, Forman, ...), za koje je potrebno odrediti dinamičke karakteristike ponašanja materijala. Kod proračunskih procena veka za vreme širenja, pored dinamičkih karakteristika materijala, potrebno je odrediti faktor intenziteta napona (FIN). Kada se radi o jednostavnijim strukturnim elementima postoje analitički izrazi za FIN. Međutim kod složenih geometrijskih oblika konstrukcija i oštećenja u vidu površinskih prslina poslednjih godina se po pravilu koriste singularni konačni elementi [1.16,1.17]. Singularni konačni elementi se koriste za precizno određivanje FIN s jedne, kao i za uspostavljanje analitičkih izraza za FIN s druge strane. Pored konvencionalnih zakona širenja prslina gde su potrebne dinamičke konstante ponašanja materijala, tokom poslednjih godina uvodi se metod gustine energije deformacije [1.17] (GED), gde nisu neophodne ove dinamičke konstante, već se koriste iste ciklične karakteristike materijala, koje se koriste i za procenu veka do pojave inicijalnog oštećenja. Ovaj pristup se pokazao racionalnim, jer koristi iste ciklične karakteristike materijala, kako za procenu veka do pojave inicijalnog oštećenja, tako i za analizu širenja prslina. U poglavlju 7 data je celovita proračunska procedura procene preostalog veka (za vreme širenja prslina) elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prslina. Ova procedura je primenljiva i na procenu preostalog veka tornja. Svakako u takvim procenama se pretpostavljaju inicijalna oštećenja u kritičnim delovima elemenata konstrukcija.

Radi ostvarenja postavljenog zadatka, identifikacije kvaliteta i pouzdanosti materijala konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, izloženog delovanju, promenljivog opterećenja i atmosferskih uslova, izvršeno je ispitivanje eksploatacionog konstrukcionog čelika (od koga je napravljen toranj) i novog čelika predviđenog za

popravku oštećenih delova tornja. Kako bi dobili kompletnu sliku ponašanja materijala, potrebno je pre svega obuhvatiti sledeće podatke:

- geometriju tornja,
- radne uslove (opterećenje, broj ciklusa) i
- osobine materijala.

Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja, osnovni doprinos ove disertacije je u implementaciji izvedenih istraživanja, kao i u definisanju kriterijuma prihvatljivosti, koji će omogućiti sigurnost u eksploataciji konstrukcije tornjeva postrojenja za istraživanje nafte i gasa.

2. METODOLOŠKI KONCEPT DISERTACIJE

2.1. Problem istraživanja

Sastavni delovi postrojenja za istraživanje nafte i gasa, koji rade na otvorenom (u atmosferskim uslovima), u koje spadaju i tornjevi, predstavljaju kritična mesta zbog specifičnih radnih zadataka. Znajući da se mnoga postrojenja širom sveta koriste već toliko dugo, da su pojedini delovi u upotrebi duže od projektovanog radnog veka, ovo pitanje posebno dobija na značaju. Mogući otkaz na ovim delovima, predstavljao bi opasnost ne samo po rad postrojenja, već i po sredinu, koja ih okružuje i ljude koji ih opslužuju.

2.2. Predmet istraživanja

Predmet ove doktorske disertacije, je procena preostalog veka konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa (u daljem tekstu tornja), namenjenog za rad u atmosferskim uslovima. Zavarene komponente i spojevi nisu uzeti u razmatranje. Prema tome, ova analiza se odnosi na osnovni materijal konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa.

Treba imati na umu da su delovi postrojenja za istraživanje nafte i gasa, u eksploataciji izloženi delovanju promenljivog opterećenja, koja predstavljaju realnu opasnost za pojavu oštećenja. U slučaju postojanja oštećenja, potrebno je precizno proceniti preostali vek delova tornja i doneti odluku o njegovoj daljoj eksploataciji. Zbog toga je porastao značaj produženja radnog veka i revitalizacije, kao načina da se starija postrojenja zadrže u pogonu. Pri tome se pod revitalizacijom podrazumeva osiguranje potpunog iskorišćenja veka, pomoću selektivne zamene delova.

Ukupni vek konstrukcije (izražen u broju ciklusa odnosno broju godina rada) sastoji se iz: veka do pojave inicijalne prsline i veka širenja te prsline do loma (preostali vek). Za procenu preostalog veka, najvažnije su karakteristike koje opisuju pojavu i rast prsline, pod uticajem promenljivog tj. dinamičkog opterećenja. Zamorne prsline, koje nastaju na konstrukcijski glatkim i homogenim delovima, usled lokalne koncentracije napona na neizbežnim konstrukcijskim prelazima i promenama poprečnih preseka, još uvek nije moguće opisati nekim jednostavnim matematičkim zavisnostima opterećenja, napona, veličine poprečnog preseka i karakteristika materijala. Za ovo se koriste empirijski izvedeni obrazci, po pravilu uslovljeni obimnim laboratorijskim i eksperimentalnim i ispitivanjima. U ovom slučaju, opšte prihvaćena karakteristika je zamorna čvrstoća ili tzv. dinamička čvrstoća, u okviru koje se primenom Velerove krive određuje vek elementa bez prsline, izražen brojem ciklusa. U vezi sa tim, projektovanje delova konstrukcija na osnovu mogućeg zamora materijala zasnovano je na korišćenju zamorne čvrstoće i iskustvenim preporukama, koje su izvedene analizom otkaza delova u eksploataciji. Dalje razmatranje ponašanja materijala oko vrha prsline vrši se na osnovu mikromehaničkog aspekta umesto globalnog aspekta, odnosno po principu konstruisanja sa sigurnošću od loma, kod koga se preostali vek određuje, kao period rasta prsline (izražen brojem ciklusa), od neke početne veličine do kritične veličine prsline pri kojoj nastupa lom.

Prikupljena saznanja i rezultati ispitivanja o rastu zamorne prsline su omogućila, da se sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vek rada tornja koji sadrži neku grešku tipa prsline i na taj način proceni koliko toranj može da radi do sledeće kontrole (izražen u broju ciklusa). Čak i najodgovorniji delovi tornja se ne zamenjuju, pre nego što se redovnim kontrolama ne otkriju prsline ili slične greške i uzrok njihovog nastanka, tj. da li prsline miruje ili nastavlja da raste do loma.

Analiza procene preostalog veka korišćenja tornja sastoji se iz:

1. Ispitivanja karakteristika materijala, i to:
 - zateznih karakteristika,
 - hemijskog sastava,
 - udarnih karakteristika na instrumentiranom Šarpijevom klatnu, sa razdvajanjem energija stvaranja i energije širenja prsline,
 - makro i mikrostrukture,
 - parametara visokocikličnog zamora (konstruisanje Velerove krive),
 - parametara malocikličnog zamora,
 - parametara mehanike loma,
 - parametara rasta zamorne prsline.
2. Određivanje naponsko deformacijskog stanja i definisanje kritičnih mesta na tornju u toku eksploatacije (primenom metode konačnih elemenata, MKE).
3. Procena preostalog veka korišćenja tornja (koristeći razne metode).

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, istraživan je i analiziran uticaj vremena eksploatacije na ponašanje materijala tornja, a sve u cilju procene preostalog veka tornja izrađenog od konstrukcionog čelika.

2.3. Cilj istraživanja

Osnovni cilj istraživanja u okviru ove disertacije je, da se na osnovu izvršenih mehaničko eksploatacijskih ispitivanja, definišu metode i procedura za pouzdanu procenu preostalog veka tornja.

2.4. Hipoteze u istraživanju

Osnovna hipoteza od koje se pošlo je da u slučaju tornja izrađenog od konstrukcionog čelika, izloženog promenljivom opterećenju, problemi u eksploataciji se po pravilu javljaju u delovima tornja.

Višegodišnji period eksploatacije postrojenja za istraživanje nafte i gasa (tornjevi su u eksploataciji više od 30 godina), nametnuo je traženje odgovora na dva osnovna pitanja:

- U kakvom su stanju materijal, delovi i sam toranj nakon 30 godina eksploatacije, tj dato je poređenje osobina eksploataisanog (EM) i novog materijala tornja (NM) i
- Da li je, na osnovu izvršenih eksperimentalnih istraživanja, moguće dati proceduru, kojom se može izvršiti procena preostalog veka korišćenja tornja.

Osnovni parametri mehanike loma kao što su žilavost loma, K_{Ic} , kritični J - integral, otvaranje vrha prsline (CTOD), rast zamorne prsline da/dN i prag zamora, ΔK_{th} , mogu

se primeniti za analizu ponašanja tornja izloženog promenjivom opterećenju prilikom izvršenja rudarskih operacija i za procenu preostalog veka tornja.

2.5. Dosadašnja istraživanja

Značaj ovih istraživanja posebno dobija na težini, imajući na umu aktuelne trendove revitalizacije opreme, u koju spadaju i tornjevi postrojenja za istraživanje nafte i gasa.

Zbog bezbednosti rada konstrukcija, procena njihovog veka je veoma interesantna za mnoge istraživače u svetu. Iz nje postoji veliki broj objavljenih naučnih radova. Procena veka se može posmatrati na određenim konstrukcijama (mostovi, tornjevi, avioni, vozila, posude pod pritiskom, itd.), ili ponaosob na njenim delovima, ili uopšteno na bilo kojim mašinskim konstrukcijama.

Određivanje i procena radnog veka elemenata mašinskih konstrukcija i mašina, opterećenih zamornim opterećenjima su potrebna, kako pri projektovanju tako i za definisanje intervala kontrole za otkrivanje i otklanjanje oštećenja nastalih u eksploataciji. Postoje različiti pristupi procene njihovog veka.

Interesantan je način određivanja veka starog železničkog mosta od čelika [2.1], na liniji Peking - Šenjang. Vek je eksperimentalno određen korišćenjem originalnih uzoraka (zakovane grede) sa centralnim rupama bez površinskih oštećenja. Na osnovu analize materijala, ispitivanja zamora i verovatnoće raspodele zamornog veka predviđen je vek sa dva nivoa opterećenja mosta (sa vozom na njemu i bez njega).

Rezultati ispitivanja pokazuju da vek mosta utvrđuje isti ekvivalent normalne raspodele napon - amplituda (može se izraziti kao ekvivalentna funkcija) i da je on umanjen zbog površinskih oštećenja u svom dugogodišnjem radu.

Predstavljeni su izrazi za izračunavanje veka (vek stvaranja prsline)

$$N_f = 1.13 \times 10^{14} (\Delta\sigma_{eqv}^{1.82} - 177.7^{1.82})^{-2}$$

i vek širenja prsline

$$N_p = 1.19 \times 10^{14} (\Delta\sigma_{eqv}^{1.82} - 171.5^{1.82})^{-2}$$

koji su u funkciji sa amplitudom napona $\Delta\sigma_{eqv}$.

Za određivanje radnog veka delova u vazduhoplovnoj industriji, usled prsline nastalih ubacivanjem čaura u limove koji se spajaju, primenjuje se uobičajena procedura [2.2]. Različite dimenzije čaura (procenat proširenja prečnika rupa (u rasponu od 0 do 5,58%) su primenjene na uzorke ploča sa rupama od legure aluminijuma 7475-T7351. Radi procene veka je određivano naponsko polje oko čaura kao i distribucija zaostalih napona.

Cikličnim opterećenjem došlo je do stvaranja prsline i njena dužina je praćena pomoću sistema video kamera. Ustanovljeno je da širenje prsline zavisi od dimenzija čaure i da vek širenja prsline najveće čaure poboljšava faktor koncentracije napona, a naponi su u granicama dozvoljenih. Hladna ekspanzija materijala vrši se oko rupe (ubacivanjem čaura) i ima blagotvoran uticaj na vek. Ovo poboljšanje u suštini zavisi od dimenzija čaura i primenjenog napona. Numerička analiza je izvršena korišćenjem MKE pomoću elemenata u tri dimenzije, i dobijeni rezultati su u saglasnosti sa eksperimentalnim.

Procena veka širenja prsline (N_p) u materijalu [2.3], korišćenjem Parisovog zakona i NASGRO softvera daje postupak za njegovo približno određivanje na osnovu poznavanja zateznih karakteristika materijala (za čelik i legure aluminijuma i titana).

Procena sigurnosti veka konstrukcija zahteva informacije kao što su žilavost loma, faktor intenziteta napona (FIN), brzina rasta prsline itd. Predloženi teorijski pristup zasnovan na proširenoj Grifitovoj teoriji koristi se za određivanje žilavosti loma materijala i rasta prsline za većinu legura. Jednostavni koncept zasniva se na korišćenju osnovnih napreznja, npr. jednoaksijalno naprezanje, da se dobiju osnovni podaci. Pošto se metoda zasniva na empirijskim obrascima, potrebna je njena validacija na stvarnim uzorcima. Pomoću eksperimentalnih analiza su dobijena je žilavost loma i brzina rasta prsline. Takođe je predloženo da se, sa poznavanjem zateznih osobina stvori univerzalni alat za analizu različitih materijala. Na ovaj način može se optimizirati broj eksperimentalnih testova neophodnih za dobijanje karakteristika materijala za procenu veka.

Određivanje karakteristika materijala je od izuzetne važnosti u projektovanju i određivanju preostalog veka industrijskih komponenti. Metode procene preostalog veka su verifikovane u softveru NASGRO.

Eksperimentalno ispitivanje zamora i loma, zahteva detaljnu pripremu uzoraka, merenje rasta prsline i tumačenje dobijenih podataka, koji su skupi i dugotrajni. Da bi podaci bili validni, potrebno je izvršiti veliki broj ispitivanja. Stoga, bilo koja metoda koja omogućuje smanjenje broja eksperimentalnih ispitivanja, će pomoći smanjenju troškova bez ugrožavanja bezbednosti.

Predložena tehnika koristi osnove mehanike loma (ML) da uspostavi vezu između plastičnih oštećenja i rasipanja energije za aksijalno naprezanje sa osnovnim podacima ML. Metod koristi energiju rasipanja u aksijalnom naprezanju da predvidi žilavost (K_c) i žilavost loma materijala (K_{Ic}) kao i geometriju prsline na osnovu plastičnog oštećenja na vrhu prsline. Ova metoda omogućuje da se pri rastu prsline odrede Parisove konstante C, m.

Da bi uspostavili i potvrdili ovu metodologiju u industrijskoj praksi, proračuni su izvedeni za određene materijale i geometriju uzoraka. Međutim, kako bi bila u potpunosti prihvatljiva za različite materijale, potrebna je njena potvrda. Dodatna analiza, treba da pokaže osnovne fizičke razloge za odnose između aksijalnog napona i Parisovih karakteristika materijala. Nekoliko legura aluminijuma, titana i čelika su selektovani u NASGRO bazu podataka materijala sa eksperimentalnim vrednostima: prag zamora ΔK_{th} , K_{Ic} , da/dN, itd.

Parametarska analiza je sprovedena da kvantifikuje efekte statičkih vučnih karakteristika na predviđanje loma za tri različite klase materijala: čelik i legure aluminijuma i titana.

Predloženi analitički/empirijski pristup primenjuje prošireni Grifitov metod za procenu rasipanja energije na vrhu prsline, a koji koristi jednostavne zavisnosti napon - deformacija i može da bude pouzdani alat za određivanje žilavosti i rasta prsline za klasične legure metala. Dati su brojni praktični primeri sa brojnim vrednostima

pojedinih veličina za materijale: čelik i legura aluminijuma i titana, koje koristimo u mehanici loma za određivanju veka širenja prsline (N_p) različitih konstrukcija.

Analitičko/empirijski model za procenu veka elemenata konstrukcija [2.4], u području visokocikličnog zamora (VCZ), pod dejstvom kombinovanih opterećenja konstantnih amplituda, prikazuje određivanje veka i poređenje sa eksperimentalnim rezultatima. Model koristi kriterijum ograničenja zamora dat sa sledećim izrazom: $\max T_a + \alpha_\infty \sigma_{H,\max} \leq \gamma_\infty$, gde je T_a - generalisana amplituda napona, $\sigma_{H,\max}$ - hidrostatički pritisak, a $\alpha_\infty, \gamma_\infty$ - konstante materijala. On je posebno razvijen za delove aviona od čelika SM45C i može adekvatno da se primeni i za druge materijale. Izlazni rezultati modela su dijagrami napon - broj ciklusa (Velerove krive) za razne vrste naprezanja, koje su u saglasnosti sa eksperimentalnim.

Metodologija i proračunska procedura za procenu veka do pojave inicijalnih oštećenja [2.5], razmatra procenu veka elemenata konstrukcija u području malocikličnog zamora, gde se u analizi koriste eksperimentalno određene malociklične karakteristike materijala.

Legure aluminijuma LY12CZ, čelik 40CrNiMo i čelik BHW35 za posude pod pritiskom su ispitane malocikličnim opterećenjem. Predstavljen je odnos cikličnog opterećenja i odnos napon - deformacija. Napravljen je ciklični model ojačavanja ili omekšavanja krive napon - deformacija. Ispitivanja su pokazala da amplituda cikličnog napona ima grešku na početku nekoliko ciklusa i pre loma, ali eksperimentalne vrednosti su u dobroj saglasnosti sa onima, koje je predvideo predloženi model.

Metodologija za procenu veka elemenata konstrukcija u domenu malocikličnog zamora, kada su elementi opterećeni tako da prekoračuju granicu elastičnog ponašanja materijala, data je u radu [2.6].

Opisana je akumulacija oštećenja za analizu veka strukturnih elemenata pod neproporcionalnim opterećenjem. Akumulacija oštećenja je pravilno formulisana i povezana sa krivom ojačavanja materijala.

Numerički algoritam se dekomponuje na dva bloka izračunavanja. Prvi predstavlja, proračun napona, koristeći tenzor napona. Drugi blok, koji sadrži funkciju akumulacije oštećenja, je projektovan za procenu varijacije na meru akumulacije oštećenja.

Praktični primeri su urađeni na delovima mašina od čelika SAE 1045 i čelika za cevi L290 GA. Predloženi model akumulacije oštećenja, omogućava da se definiše broj ciklusa ili veoma sigurna primena ukupnih zamornih opterećenja na delovima mašina.

Proračunska procena veka, razmatra elemente konstrukcija do pojave, kao i za vreme širenja prsline, uključujući efekte korozije [2.7]. Rad je posvećen efektima korozije na visokociklični zamor, gde je ispitivanje vršeno sa visokom frekvencijom (20 kHz), kod valjanih čelika za proizvodnju lanaca za pričvršćenje naftnih platformi na moru. Glatki uzorci lanaca su ispitivani za tri različita uslova spoljne sredine: u vazduhu, u vazduhu posle korozije i u protočnoj morskoj vodi.

Procena preostalog veka se definiše brzinom propagacije kratke prsline ("short"), male i dugačke prsline. Pokazano je da usled protoka morske vode, zamorni vek u visokocikličnom režimu rada zavisi od procesa korozije. Zamorna čvrstoća se značajno smanjuje (za 50 MPa) na uzorcima sa korozijom.

Proces rasta prsline [2.8], razmatra slučajeve, kada se prsline nalazi u unutrašnjosti same epruvete (ovakva oštećenja pa i same pojave se u literaturi definišu kao "riblje oko") opterećene cikličnim opterećenjima. Prikazani su numerički modeli širenja prsline na bazi modifikovanog konvencionalnog Parisovog zakona.

Pri opterećenju između 10^6 i 10^8 ciklusa može doći do stvaranja prsline, ne samo na površini, nego i u unutrašnjosti materijala tzv. "riblje oko". Na osnovu ovog razmatranja, data je formula za preostali vek i zaključeno je da rast prsline "riblje oko" nije značajan deo ukupnog veka u eksploataciji sa visokocikličnim opterećenjem za nekoliko čelika i legura titanijuma. Pored toga, rast kratkih prsline je brži od dugih, za ista nominalna opterećenja.

Projektovanje pouzdane i sigurne tehničke opreme zahteva od projektanta primenu efikasnih metoda za procenu veka. Proračunska procedura za procenu veka elemenata konstrukcija do pojave inicijalnog oštećenja (stvaranja prsline) [2.9], zasniva se na korišćenju cikličnih karakteristika materijala, onih karakteristika materijala koje se u našem radu koriste za analizu širenja prsline i procenu preostalog veka. Data je primena malocikličnog zamora (MCZ) na modelu sa akumulisanim oštećenjima i primena Manson - Coffinove jednačine za određivanje veka stvaranja prsline (N_f).

Akumulacija oštećenja u strukturi materijala, kao posledica eksploatacije je višestruki proces. Ona počinje sa stvaranjem prsline u blizini greške materijala, njenom postepenom razvoju i širenju do loma. Prikazani pristup analizira vek strukturnih elemenata opterećen višeksijalnim, neproporcionalnim malocikličnim opterećenjima i sastoji se iz dva bloka proračuna. U prvom bloku se određuju komponente napona i tenzor deformacija. Drugi blok sadrži zavisnosti, koje određuju rast anizotropnih mera akumulacije oštećenja (povezan na fizičkom planu) i kriterijume inicijacije prsline (kriterijum deformacije, napona i energetski kriterijum). Eksperimentalna verifikacija navedenog pristupa je data za čelike (SAE 1045, L 290GA i SNCM 630). Ona pokazuje dobro slaganje proračuna i eksperimenta.

Predložena metoda je primenjiva za određivanje veka MCZ i praktična je za inženjerske proračune na drugim strukturama materijala i nehomogenim naponskim poljima.

U radu [2.10], je korišćen jednostavan inženjerski pristup predviđanja veka zasnovan na mehanici loma, kojim se proverava vek za različite uslove ispitivanja strukture u prisustvu prethodne korozije i zaostalih napona, koristeći široki softver mehanike loma.

Delovi imaju strukturna oštećenja, kao što su: poroznost, praznine, diskontinuiteti, koji mogu dovesti do stvaranja prsline. Proračun veka je rađen koristeći softver AFGROW i NASPRO 3.0., koji mogu pružiti praktične i pouzdane uslove za analizu veka konstrukcije u prisustvu prethodne korozije i zaostalih napona. Oba softvera imaju iste podatke za analizu rasta prsline: geometriju prsline, opterećenje, brzinu rasta prsline, žilavost materijala itd. Pristup je proveren eksperimentalnim programom, koji se sastoji iz sledećih ispitivanja:

- uzorci sa zavarenim spojem su opterećeni konstantnim amplitudama opterećenja i različitim odnosom opterećenja $R=0,1; 0,5; -1$,
- na prethodno korodiranim uzorcima (korozija je tretirana kao površinska prslina) zavarenih spojeva, koji se opterećuju sa konstantnim amplitudama opterećenja i odnosom opterećenja $R=0,1$,
- standardnim uzorcima zavarenih spojeva sa centralnim otvorom, opterećenih standardnim spektrom opterećenja FALSTAFF (kod krila lovačkog aviona),
- standardnim uzorcima materijala sa centralnim otvorom, opterećenih standardnim spektrom opterećenja FALSTAFF.

Ispitivanja su vršena na uzorcima legure AA2024-T3. Kao izlazni rezultati dobijene su Velerove krive za različite uzorke i vrste opterećenja, koje pokazuju da su eksperimentalni rezultati u saglasnosti sa kompjuterskim simulacijama iz korišćenih programa.

Stvarne prsline koje se pojavljuju u realnim konstrukcijama su vrlo oštri zarezi kod kojih je poluprečnik zaobljenja veličine dimenzija kristalne rešetke. Takvu geometriju prsline teško je izraditi mehaničkom obradom. U radu je korišćena epruveta s jednostavnom geometrijom koja je izrađena mehaničkom obradom. Izabrani materijal je čelik 42CrMo4V [2.11]. Određivanje parametara rasta zamorne prsline podrazumeva ispitivanje brzine rasta te prsline i faktora C i m u Parisovoj jednačini. Poznavanje parametara koji određuju brzinu širenja prsline u predkritičnoj fazi je od velike važnosti za procenu veka trajanja ciklički opterećene konstrukcije, odnosno za utvrđivanje intervala kontrolnih pregleda.

Određivanje radnog veka za zupčanike se zasniva na postojanju kontaktnog zamora između dva spregnuta zuba i može se razdvojiti na dva dela: stvaranje mikroprsline, usled akumulacije dislokacija i plastičnih deformacija i rasta prsline. Stvaranje prsline zavisi od mikrostrukture, napona i makro geometrije.

Korišćenjem programa MSC Fatigue, u radu [2.12] je određen ukupan vek zupčanika simulacijom kontaktnog zamora (materijal zupčanika je čelik 42 CrMo4). Određene su ciklične karakteristike materijala (potrebne za određivanje veka stvaranja prsline) i parametri Parisove jednačine (potrebni za određivanje veka širenja prsline). Program MSC Fatigue je univerzalni program za određivanje veka trajanja pojedinih delova, mašina i raznih konstrukcija.

Uz pomoć numeričke simulacije može se predvideti rast prsline i njene greške u tri dimenzije (3D), u realnim delovima (poljoprivredne mašine, hidraulična presa, železnički točak itd.) [2.13]. Programski paket ADAPCRACK 3D (sa svojim modulima), se koristi za definisanje brzine rasta zamorne prsline u 3D strukturama i određivanje veka.

Osnovna znanja o rastu prsline omogućavaju da se identifikuje rizik od preloma u ranoj fazi projektovanja mašine. Na taj način je moguće sprečiti njen lom. Pored toga, ključ mehanike loma je proučavanje oštećenja i prenos tog znanja na analizu drugih delova mašina, odnosno konstrukcija.

Određivanje radnog veka velikih dizel motora brodova, analizom rasta prsline korišćenjem metode graničnog elementa i metode konačnih elemenata je dato u radu [2.14]. Predložena metoda određuje strategiju rešenja konačnih elemenata modela, koji sadrži aproksimaciju realne prsline. Metoda je potvrđena kroz numeričko upravljanje rasta prsline u odnosu na rast u uzorku.

Predložena metoda za izračunavanje rasta prsline u tri dimenzije sastoji se od nekoliko koraka:

- Ručni unos konačnih elemenata,
- Unos graničnih elemenata,
- Pokretanje programa,
- Unos početne geometrije prsline,
- Definisane parametara loma i
- Pokretanje automatizovane procedure rasta prsline.

Pored navednog potrebno je posmatrati i sledeće:

- Modifikaciju mreže konačnih elemenata,
- Probni test na motoru sa velikim udarima,
- Uticaj ukupne mreže konačnih elemenata modela na analizu rasta inicijalne prsline i procena FIN duž prsline.
- Analiza rasta prsline od njene inicijacije pa sve do loma strukture uz postojanje testova za analizu i
- Poređenje sa eksperimentima i opservacija rada mašine.

Metoda pokazuje dobro slaganje sa eksperimentom i može biti korišćena za obavljanje tačne numeričke procene LEML.

Proračunska procedura za procenu veka elemenata konstrukcija opterećenih cikličnim opterećenjima [2.15], do pojave stvaranja oštećenja (prsline), kombinuje nelinearnu strukturnu analizu konstrukcija na bazi metode konačnih elemenata u sprezi sa odgovarajućim kriterijumima za početna (inicijalna) oštećenja. Ona se može koristiti u proceni veka kod složenih elemenata avionskih konstrukcija, kao i niza drugih, koji su pod dejstvom cikličnih opterećenja i opterećenja u obliku opšteg spektra. Numerička procena veka [2.16], smanjuje veoma obimna skupa istaživanja na zamor i daje kritične zone konstrukcija sa druge strane. Predložena procedura je primenjena na elementima konstrukcije sa geometrijskim diskontinuitetima, koji predstavljaju izvore koncentracije napona. Poređenje dobijenih numeričkih rezultata pokazuje dobro slaganje sa eksperimentalnim, što opravdava primenu navedene procedure.

Metoda za analizu širenja prsline [2.17], tj. procenu preostalog veka elemenata konstrukcije tipa oplata krila aviona sa početnim oštećenjima (prslinama), je bazirana na energetskom kriterijumu, odnosno gustini energije deformacije (GED). U okviru predložene metode koriste se parametri (ciklične karakteristike materijala), koji su potrebne do pojave stvaranja prsline. Ona je korišćena za procenu veka polja oplata za dva primera, koji se javljaju u praksi: u uslovima dejstva aksijalnog i biaksijalnog opterećenja konstantne amplitude. Za date primere su određeni FIN analitičkim putem, kojima se u proračun uključuje geometrija elementa konstrukcije i tip spoljašnjeg opterećenja.

Materijal za izradu polja oplata je legura aluminijuma 2219 T851, za koji su određene ciklične karakteristike.

Kao izlazni rezultati, iz navedene metode, određen je broj ciklusa do pojave loma (dijagrami a - N) za gore navedne primere. Dobijeni broj ciklusa do loma za dva različita opterećenja pokazuje, da je vek polja oplata smanjen za oko 50%, ukoliko na polje oplata dejstvuje biaksijalno opterećenje.

Predložena metoda je pogodna za procenu preostalog veka, jer ne zahteva dodatne eksperimente za određivanje dinamičkih parametara, već se koriste parametri za malociklični zamor. Ako se za neki element konstrukcije određuje ukupan vek, odmah posle određivanja veka do pojave početne prsline, moguće je odrediti broj ciklusa do loma.

2.6. Metode istraživanja

Da bi se izvršila procena preostalog veka tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, korišćene su sledeće naučno istraživačke metode:

- Modeliranje i simulacija spadaju u veoma moćne metode za analizu sistema. One na zgodan način obezbeđuju dobijanje stvarnih informacija o proizvodu koji se razvija, ili proizvoda koji postoji. Modeliranje za svoj rad koristi metodu konačnih elemenata (MKE). Simulacija je široko primenjena u situaciji kada direktni eksperiment nije ekonomski opravdan. Ona omogućava licu, koje ga analizira da dođe do brzih izlaznih rezultata određenog proizvoda. Osnovna primena simulacije je, da se istraže efekti alternativnih karakteristika sistema na njegove performanse, bez proizvodnje i testiranja svake varijante. Proces modeliranja i simulacije ne može se zamisliti bez primene računara. Brojni su primeri velikih kompanija koje koriste super računare i specijalno građene programske pakete, na osnovu kojih grade razvoj svojih proizvoda.
- Analiza i sinteza je primenjena pri upoznavanju postojećih radova u oblasti bezbednosti konstrukcija i nakon završenih istraživanja.
- Apstrakcija i konkretizacija je primenjena nakon dobijanja svih informacija o uticaju eksploatacionih uslova na vek konstrukcije,
- Eksperimentalne metode predstavljaju jedan od instrumenata rada, koji koriste istraživači u naporima da proizvedu kvalitetan proizvod. Ona je posebno pronašla svoje mesto kod naftaške opreme u svim fazama rada. Za sprovođenje eksperimentalnih ispitivanja urađen je veliki broj standardnih epruveta, sa ciljem da se definišu osnovne karakteristike ispitivanog materijala. Epruvete su definisane na osnovu važećih standarda ponaosob za svako ispitivanje. Takođe, urađen je i određeni broj kompleksnih epruveta (sa otvorom), u cilju definisanja eksploatacijskih svojstava i cikličnih karakteristika ispitivanog materijala. Za merenje naponsko deformacijskog stanja na realnom tornju u toku njegovog ispitivanja, korišćeni su rezultati iz magistarskog rada.
- Indukcija i dedukcija, nakon završenih eksperimentalnog ispitivanja indukcijom će se doći do opštih zaključaka o veku konstrukcije.

2.7. Naučna i društvena opravdanost istraživanja

Promene na konstrukcijama u uslovima eksploatacije se praktično prate tokom celokupnog radnog veka, i to pri planiranim i vanrednim remontima, za potrebe rekonstrukcije i revitalizacije tornja i u slučaju havarijskih oštećenja. Kontrola osobina konstrukcionih materijala opterećenih delova tornja, izloženog atmosferskim uslovima,

predstavlja osnovni pokazatelj pouzdanosti njegovog rada. Zbog ovoga je značajna procena preostalog veka tornja. Vek konstrukcije tornja je istekao, kada za dalju upotrebu ne postoji njegova dovoljna sigurnost, ili kada iz razloga ekonomičnosti nije opravdano njeno dalje korišćenje i ulaganje u popravke.

Višegodišnji period eksploatacije (preko 30 godina), prouzrokovao je određena oštećenja na delovima tornja. Stvaranje ovih oštećenja je zahtevala vrlo ozbiljan pregled same konstrukcije tornja, kao i popravku oštećenih delova. Popravka tornja je uključivala i zamenu delova tornja novougrađenim materijalom. Mehaničko eksploatacione i strukturne osobine materijala tornja su analizirane ispitivanjem uzoraka eksploatisanog (koji je bio u eksploataciji preko 30 godina) i novog materijala.

Eksperimentalna istraživanja ove doktorske disertacije su realizovana u više faza, i to:

- Mehaničko metalurška i eksploataciona ispitivanja u laboratorijama za eksperimentalnu čvrstoću i metalne materijale Vojno - tehničkog instituta u Beogradu i laboratoriji Departmana za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu,
- Primena softwera za preostali vek PP_VEK na Vojno tehničkom institutu u Beogradu i
- Statičko ispitivanje tornja remontnog postrojenja na ispitnoj stanici kompanije NIS ad Gazprom neft, Novi Sad - Elemir.

3. RUDARSKE OPERACIJE

3.1. Postrojenje za istraživanje nafte i gasa

Za obezbeđenje nesmetane eksploatacije nafte i gasa, pored bušenja na određenu dubinu, potrebno je izvršiti naknadni remont bušotine.

Shodno tome, možemo reći da se remontni radovi moraju sprovoditi u dva različita slučaja i sa različitim ciljem:

- nakon izvedenog bušenja, radi puštanja bušotine u eksploataciju,
- u toku same eksploatacije, radi otklanjanja nedostataka i oštećenja, koja se javljaju tokom eksploatacije.

Navedene radove izvodi postrojenje za istraživanje nafte i gasa (remontno postrojenje) [3.1, 3.2, 3.3], sl.3.1.

Kada je reč o poremećajima, koji mogu dovesti do smanjenja ili potpunog onemogućavanja eksploatacije, treba reći da oni mogu biti dvojake prirode. Sa jedne strane može se govoriti o oštećenjima opreme za eksploataciju, koju, zbog mesta na kome se koristi, nazivamo podzemnom opremom, a sa druge strane o poremećajima zemljišta u pribušotinskoj zoni.

Vađenje oštećenog alata i njegova zamena su veoma česte pojave i upravo se remontna postojenja koriste u tu svrhu. Moguće je da usled urušavanja ili iz nekih drugih razloga dođe do zaglavljivanja bušačkog pribora, te je i ove neispravnosti potrebno otkloniti, ipak, najčešći problemi vezani su za poremećaje u pribušotinskoj zoni.

Kako se bušenje izvodi na velikim dubinama, praktično je neizbežan prolaz kroz slojeve zemljišta izdašne vodom i nepostojanje slojeva sklonih urušavanju.

Prisustvo vode u bušotini zagušuje podzemnu opremu urušenim materijalom, što umanjuje nivo eksploatacije, te se ove pojave moraju izbeći.

Remontana postrojenja za istraživanje nafte i gasa, sl.3.1, su projektovana da obave tri postupka, koja obezbeđuju dovođenje bušotine u ispravno stanje:

- vađenje opreme za eksploataciju, zamena oštećenih delova i vraćanje istih u radni položaj,
- zamenu fluida u bušotini,
- manji zahvati bušenja u slučajevima urušavanja ili potrebe za cementiranjem slojeva.



Slika 3.1. Remontno postrojenje [3.2].

3.2. Osnovni podaci

Za dalju analizu razmatrano je remontno postrojenje sa sledećim karakteristikama [3.2], sl.3.1.

- proizvođač: IPS, Eldorado, Cansas, USA,
- oznaka - tip: Cardwell II KB 210 A,
- godina proizvodnje: 1977.,
- visina tornja: 29,26 m,
- maksimalna nosivost na kuki: 976 kN .

3.3. Toranj

Toranj postrojenja za istraživanje nafte i gasa [3.1], sl.3.2, predstavlja čeličnu, rešetkastu, noseću strukturu kompleksne geometrije i tehnologije izrade, sa nizom elemenata koji obezbeđuju ostvarenje projektovanih funkcija, poput nošenja bušaćeg alata, vađenje alata kod zaglavljivanja i slično.

U zavisnosti od funkcije, koja se ostvaruje i radnog položaja određenih delova strukture, noseći elementi u procesu eksploatacije trpe različita opterećenja kao posledicu statičkih i kinematskih uticaja, uz dodatna dinamička opterećenja.

Navedena opterećenja izazivaju u nosećoj konstrukciji i vrlo kompleksna stanja napona. Da bi se obezbedio bezbedan i siguran rad postrojenja, sva opisana stanja napona moraju biti na adekvatan način uzeta u obzir.



Slika 3.2. Toranj remontnog postrojenja [3.1].

3.4. Redovne rudarske operacije

Prilikom remonta bušotina remontno postrojenje izvršava redovne rudarske operacije date u tabela 3.1, odnosno literaturi [3.4, 3.5, 3.6].

Sve ove operacije izvode takozvane manevre prilikom spuštanja i vađenja tubinga (niz proizvodnih cevi - sprava) u bušotinu. Ovo su osnovne operacije na osnovu kojih dolazimo do spektra opterećenja odnosno spektra napona tornja, kojeg kasnije koristimo za proračun preostalog veka (tačka 7).

Tabela 3.1. Redovne rudarske operacije.

Redni broj	Naziv operacije
1.	Osvajanje i ispitivanje intervala
2.	Osvajanje i ispitivanje intervala
3.	Referencija ili dopucavanje dela intervala
4.	Ugradnja dubinske sigurnosne opreme
5.	Ugradnja duple proizvodne opreme
6.	Hemijska obrada otvorenog intervala
7.	Ugradnja dubinske pumpe
8.	Ugradnja gas lifta
9.	Ugradnja protiv peščanog filtera
10.	Izolacija intervala cementacijom preko pakera ili retajnera
11.	Izolacija intervala blindiranim pakerom ili retajnerom
12.	Izolacija prodora podinske vode polimerima i učvršćenje pribušotinske zone smolama
13.	Stabilizacija peskova sistema "Gravelpack"
14.	Frakturiranje otvorenog intervala
15.	Remont bušotinske opreme
16.	Remont duple proizvodne opreme
17.	Čišćenje bušotine
18.	Konzervacija bušotine
19.	Likvidacija bušotine

Za analizu veka tornja je uzet tubing (niz proizvodnih cevi) sa sledećim karakteristikama:

- dubina (dužina kolone) 400 do 3000 m, uzeto je 2000 m,
- prečnik tubinga 1,35 do 4 cola, uzeto je 2 7/8" cola (prečnik 73 mm),
- kvalitet materijala J-55,
- masa tubinga 9,6 kg/m,
- dužina 1 tubinga 9 m,
- masa 1 tubinga 86,4 kg,

- dužina 1 cuga (2 sastavljena tubinga) 2x9 m,
- masa 1 cuga 172,8 kg,
- težina 1 cuga 1,728 kN,
- normativ spuštanja i vađenja 1 cuga, 25 cugova/sat, odnosno 144 s po cugu,
- masa kolone tubinga za 2000 m je 19180 kg,
- broj cugova za 2000 m je 111,
- masa pokretnog koloturja i kuke je 2000 kg,
- maksimalno opterećenje tornja je kolona tubinga i pokretnog koloturja i kuke, 211,8 kN,
- podaci u dijagramima 3.3 do 3.6 su dobijeni merenjem vremena i opterećenja u toku rada tekuće rudarske operacije na postrojenju, a u prilogu 10.1. dati su detaljni dijagrami navedenih rudarskih operacija.

3.4.1. *Spuštanje sprava*

Spuštanje sprava je osnovna operacija koju izvodi izabrano postrojenje.

Ona se sastoji u formiranju kolone cevi - tubinga, međusobnim nastavljanjem cugova putem navojnih spojeva, do konačne dubine bušotine.

Na sl. 3.2, pored tornja se vide cugovi, koji čekaju ugradnju.

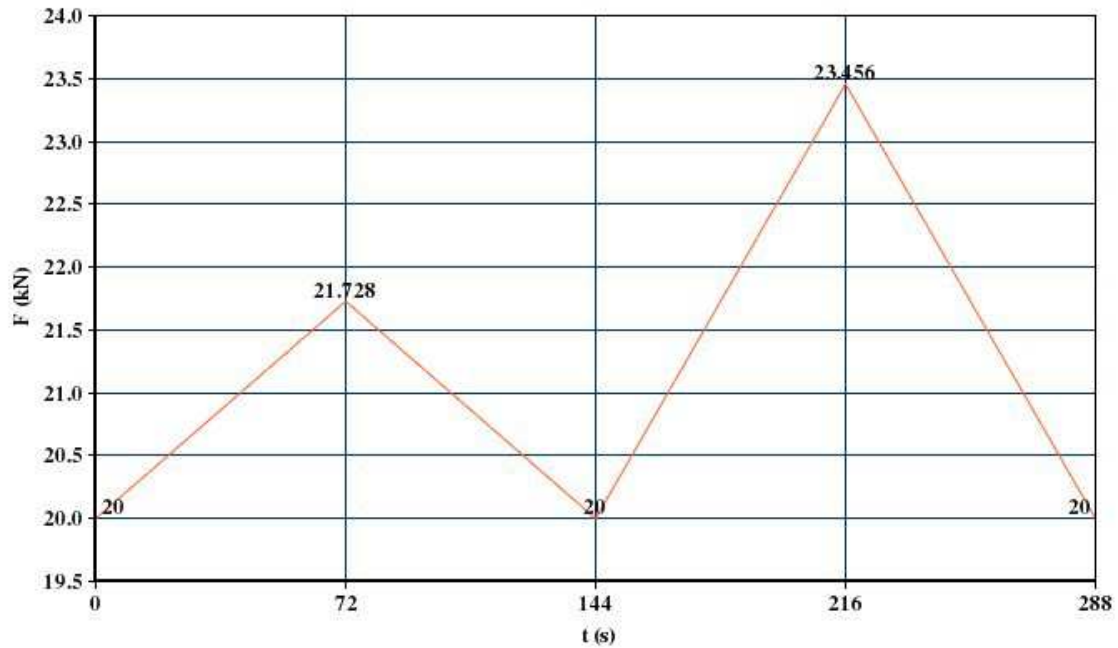
Na vrh kolone se postavlja alat - sprava (putem navojnog spoja) za izvršenje određene rudarske operacije. Prilikom nastavljanja kolone (zavijanje cuga), vrši se rasterećenje tornja na početnu vrednost i sve tako do konačnog formiranja kolone.

Karakteristike ove rudarske operacije, date u tabeli 3.2. i sl. 3.3 i 10.1 su:

- početno opterećenje na kuki je 20 kN od sopstvene mase i pokretnog koloturja,
- dodatno opterećenje je težina cuga (18 m) od 1,728 kN x 111 ciklusa - cugova, do 211,808 kN,
- priraštaj povećanja opterećenja je 1,728 kN, svakih 144 sekundi,
- krajnje opterećenje kuke tornja je 211,8 kN,
- vreme trajanja spuštanja 1. cuga je 144 sekundi,
- broj dešavanja operacije 1 x dnevno, prosek.

Tabela 3.2. Spuštanje sprava.

t(s)	0	72	144	216	288
F(kN)	20	21,728	20	23,456	20



Slika 3.3. Spuštanje sprava.

3.4.2. Vađenje sprava

Vađenje sprava je suprotna operacija od spuštanja sprava.

Ona se sastoji u demontaži kolone cevi - tubinga, međusobnim rastavljanjem cugova putem navojnih spojeva, do konačnog vađenja sprava.

Na sl. 3.2, pored tornja se vide cugovi, koji su izvađeni.

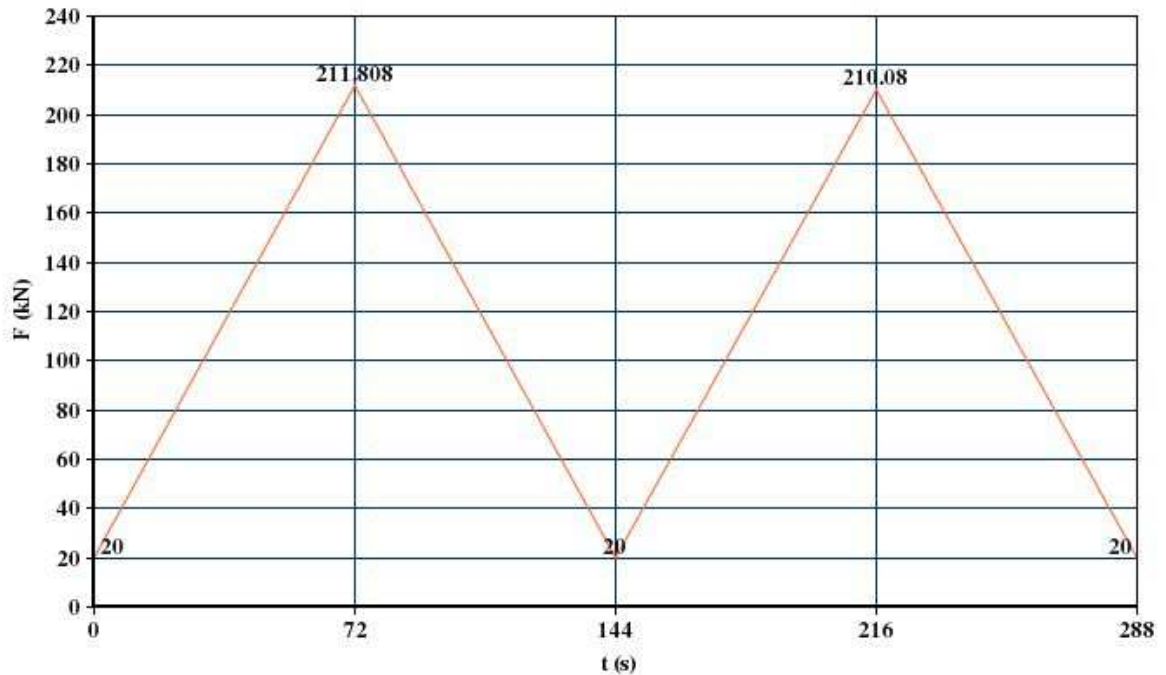
Prilikom vađenja kolone (odvijanje cuga), vrši se rasterećenje tornja na početnu vrednost i sve tako do konačnog vađenja kolone tj. sprava.

Karakteristike ove rudarske operacije, date u tabeli 3.3 i sl. 3.4 i 10.2 su:

- početno opterećenje na kuki je 211,8 kN i ono se smanjuje prilikom odvijanja cuga za 1,728 kN x 111 ciklusa - cugova, do 20 kN,
- priraštaj smanjenja opterećenja je 1,728 kN, svakih 144 sekundi,
- krajnje opterećenje kuke tornja je 2000 kg,
- vreme trajanja vađenja 1. cuga je 144 sekundi,
- broj dešavanja operacije 1 x dnevno, prosek.

Tabela 3.3. Vađenje sprava.

t(s)	0	72	144	216	288
F(kN)	20	211,808	20	210,080	20



Slika 3.4. Vađenje sprava.

3.4.3. Bušenje cementnog čepa

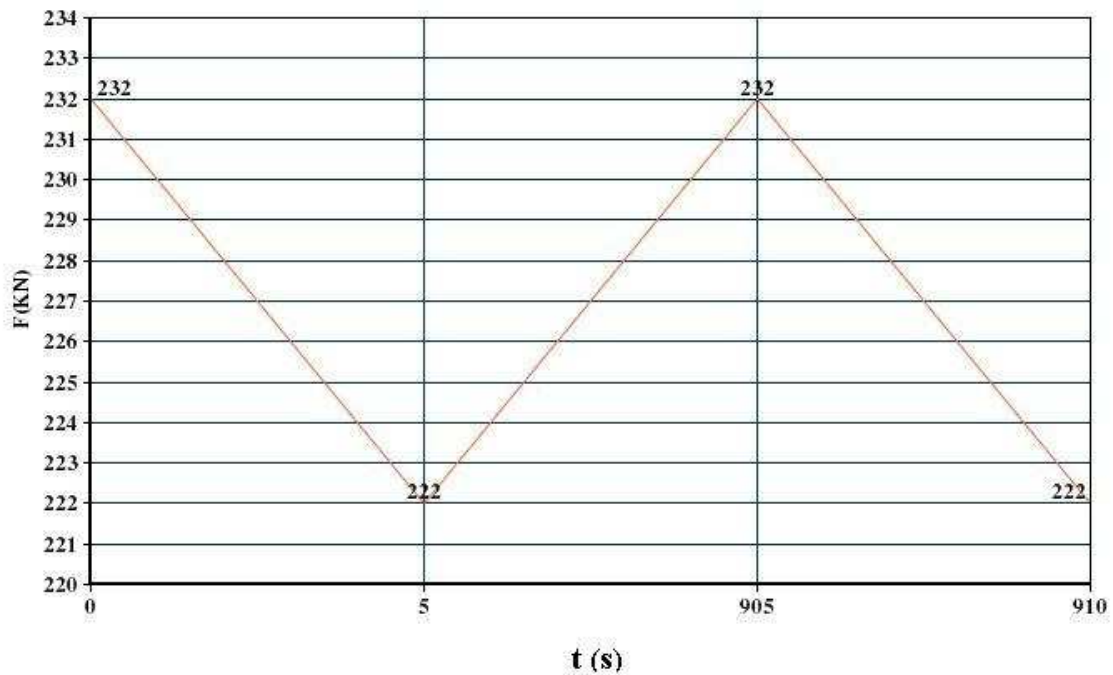
Tokom remonta bušotine postoji potreba za cementiranjem određenih njenih delova, kako bi dobili razdvojene intervale za izvršenje određenih operacija. Nakon izvršenja navednih operacija sledi bušenje ugrađenih cementnih čepova.

Karakteristike ove rudarske operacije, date u tabeli 3.4. i sl. 3.5 i 10.3 su:

- bušenje cementnog čepa dubine 4 m,
- opterećenje 232 kN,
- vreme trajanja 3620 s,
- broj dešavanja operacije 10 x godišnje, prosek.

Tabela 3.4. Bušenje cementnog čepa.

t(s)	0	5	905	910
F(kN)	232	222	232	222



Slika 3.5. Bušenje cementnog čepa.

3.5. Nepredvidive rudarske operacije

Nepredvidive rudarske operacije [3.6, 3.7], su nepoželjne i veoma nepovoljno deluju na remonto postrojenje.

Obično se radi o spašavanju bušotine za dalju proizvodnju nafte i gasa.

To je sledeća operacija:

- instrumentacija - zaglava alata u bušotini.

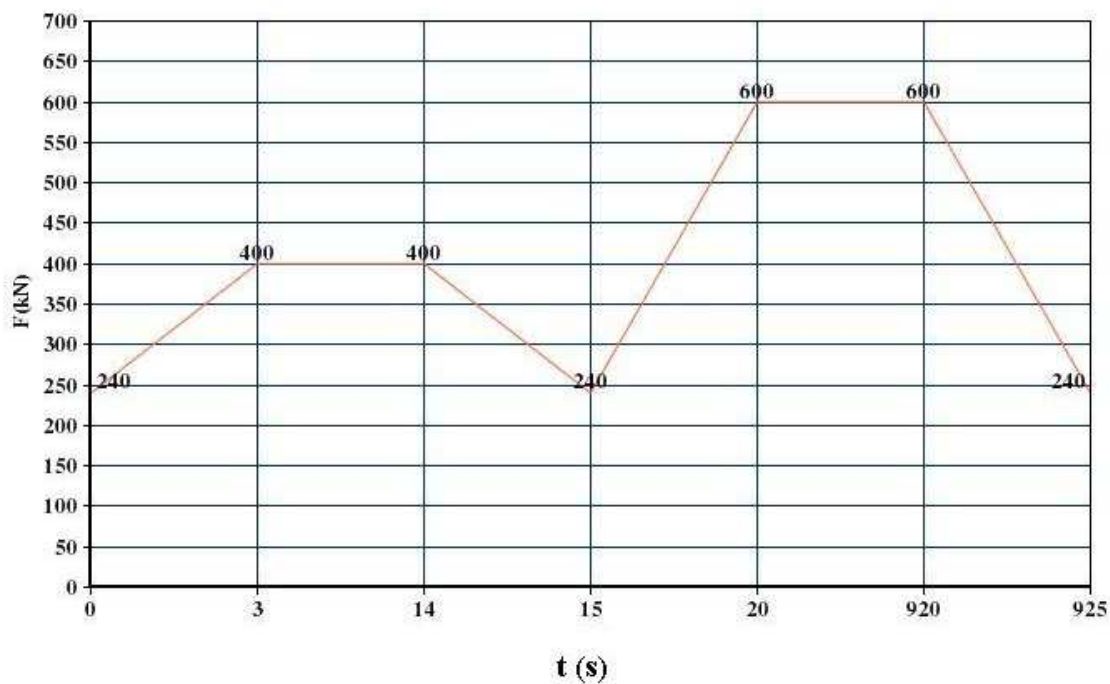
3.5.1. Instrumentacija

Karakteristike ove rudarske operacije, date u tabeli 3.5. i sl. 3.6 i 10.4 su:

- nepoželjna operacija,
- ekstremna operacija, u pitanju je zaglava alata u bušotini,
- broj dešavanja 5 x godišnje, prosek,
- traje oko mesec dana sa ponavljanjem dnevne operacije,
- bamperisanje (udarač), 5 x dnevno, a ne svaki dan.

Tabela 3.5. Instrumentacija.

t(s)	0	3	14	15	20	920	925
F(kN)	240	400	400	240	600	600	240



Slika 3.6. Instrumentacija.

Na osnovu razmatranja dnevnih izveštaja rada uzetog postrojenja, za dalju analizu veka tornja usvojen je prosek operacija za jednu godinu rada i to:

- 365 operacija, spuštanje sprava,
- 365 operacija, vađenje sprava,
- 10 operacija, bušenje cementnog čepa i
- 5 operacija, instrumentacija - zaglava sprava u bušotini.

Za ovaj spektar realnih rudarskih operacija u poglavlju 7 odrediće se preostali vek tornja.

4. OSNOVE MEHANIKE LOMA

4.1. Greške u materijalu konstrukcija

Greške u materijalu konstrukcija su neminovne, one prate konstrukciju tokom izrade njenih elemenata, njihovih spajanja i tokom njenog veka trajanja. One su specifične za pojedine tehnološke postupke proizvodnje sastavnih elemenata i konstrukcije uopšte [4.1]. U našem slučaju razmatranje se odnosi na osnovni materijal elemenata konstrukcije tornja, koji su dobijeni valjanjem [4.2], [4.3].

Pod pojmom greške materijala elemenata konstrukcije podrazumeva se unutrašnja (prslina, ukljućak) ili spoljna nehomogenost (zarezi, površinska poroznost), kao i geometrijska odstupanja oblika i dimenzija. One mogu da se otkriju ispitivanjem bez razaranja (najčešće ultrazvukom, radiografski, penetrantima i magnetnim fluksom).

Klasifikacija grešaka u valjanim proizvodima može biti po nehomogenosti, odstupanju dimenzija i oblika [4.3]. Površinske greške kod valjanih proizvoda mogu se svrstati u tri grupe: greške metalurške prirode (prslina, nalepci, ukljućci troske), greške usled plastične prerade (prevaljanost, pruge pri valjanju, linije klizanja, prslina) i greške nastale naknadnom obradom poluproizvoda.

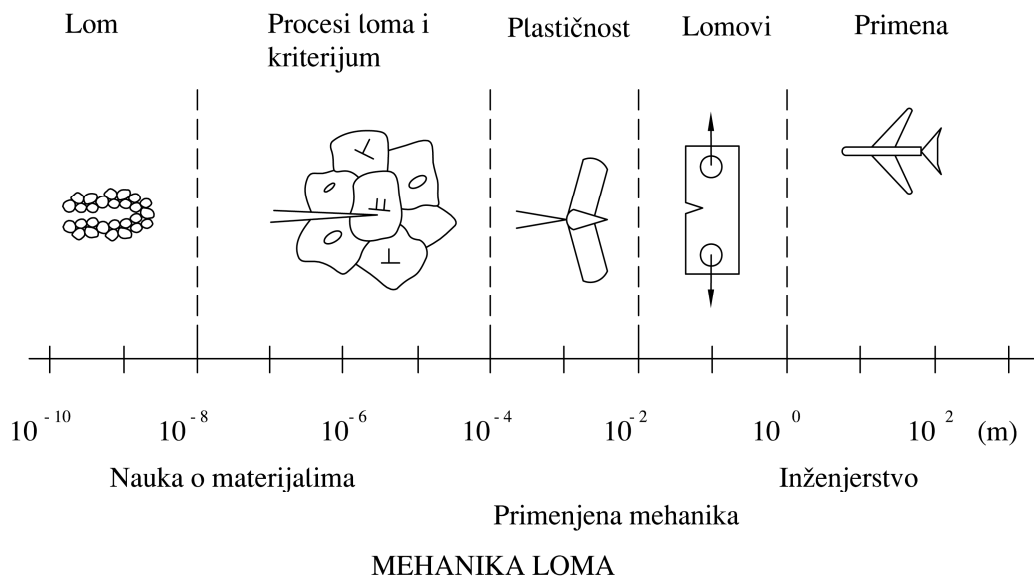
Poroznost ili gasni mehurovi su šupljine ispunjene gasom, koje nastaju u fazi očvršćavanja metala. Najčešći uzroci nastanka gasnih mehurova su nečistoće (vlaga, masnoća, oksidi) u osnovnom materijalu, nedovoljno umiren osnovni metal, nedovoljna zaštita metalne kupke i prebrzo hlađenje.

Najveći problem u ovakvim istraživanjima je taj, da li će prslina u materijalu konstrukcija, u uslovima tipičnim za neku konstrukciju mirovati, u kom slučaju je konstrukcija bezbedna, ili će rasti i eventualno dovesti do njenog loma. Rast prslina može da bude spor i stabilan, ako ga prate plastične deformacije ispred vrha prslina, ili brz i nestabilan, ako plastičnih deformacija praktično nema. U okviru linearno elastične mehanike loma izučava se nestabilan rast prslina, koji izaziva krti lom, a stabilan rast prslina se izučava u okviru elasto plastične mehanike loma, koji izaziva žilav lom. U oba slučaja primenjuju se odgovarajući kriterijumi loma, koji se dobijaju iz energetske ravnoteže opterećenog tela sa prslinom, poređenjem parametara mehanike loma sa odgovarajućim svojstvima materijala. Na taj način se, u okviru linearno elastične mehanike loma poredi faktor intenziteta napona sa žilavošću loma, a u okviru elastoplastične mehanike loma otvaranje prslina ili J integral sa njihovim kritičnim vrednostima.

U prilogu 10.2. date su fotografije havarija naftaških postrojenja. Glavni uzrok navedenih havarija je vetar i ljudski faktor, a retko je zamor materijala, korozija itd.

4.2. Značaj mehanike loma

Mehanika loma je inženjerska disciplina, koja se bavi proučavanjem razvoja prslina u krtim i kvazikrtim telima. Ona ima dvojaki smisao. U prvom smislu on se odnosi na istraživanje uslova razvoja prslina. U drugom smislu ona obuhvata i deo otpornosti materijala, koji se odnosi na završnu fazu procesa deformisanja pod delovanjem opterećenja. Na ovaj način, mehanika loma predstavlja disciplinu u kojoj je neizbežno povezivanje teorijskih razmatranja sa eksperimentalnim rezultatima, sa jedne, i sa pojavom lomova i havarija u eksploataciji konstrukcija, sa druge strane. Kako bi se što uspešnije primenila mehanika loma, potrebno je posedovati i predznanja iz disciplina kao što su mehanika deformabilnog tela, teorija elastičnosti i plastičnosti i nauka o materijalima, koje su njen sastavni deo, kao što je šematski prikazano na sl. 4.1 [4.4].



Slika 4.1. Oblasti primene mehanike loma [4.4].

Prilikom projektovanja konstrukcija, kao što su tornjevi, posude pod pritiskom, mostovi, brodovi, vazduhoplovi, vozila itd., jedan od osnovnih ciljeva je da se njihove zahtevane performanse optimizuju sa stanovišta sveobuhvatne cene materijala, konstruisanja, izrade, eksploatacije i održavanja. Kako bi se ovi ciljevi ostvarili, projektant polazi od pretpostavljenih radnih opterećenja i eksploatacionih uslova, izračunava napone u raznim elementima konstrukcije i upoređuje ih sa kritičnim naponima za odgovarajući oblik oštećenja, koje može da se pojavi. Delovi konstrukcije se zatim dimenzionišu u skladu sa izabranim materijalom, kako bi se predupredila pojava otkaza u bilo kom obliku. Postoje sledeći uzroci otkaza:

- Preterana elastična deformacija,
- Preterana plastična deformacija, i
- Lom.

Projektanti se u praksi najčešće koncentrišu na prva dva moguća oblika oštećenja polazeći od pretpostavke da će pravilnim izborom materijala i dimenzionisanjem elemenata, tj. ograničavanjem nivoa napona u njima sprečiti pojavu loma. Ovo razmišljanje nije uvek ispravno što je u praksi potvrđeno otkazima i lomovima velikog

broja konstrukcija pri naponima nižim od granice tečenja materijala. Dakle, delovi konstrukcija mogu da sadrže niz slabih mesta koja nastaju pri tehnološkom postupku dobijanja i prerade sirovog materijala, izradi, montaži, termičkoj obradi, zavarivanju i u toku eksploatacije. Iskustva i ispitivanja su potvrdila da u konstrukcijama praktično uvek postoji neki oblik diskontinuiteta i grešaka u materijalu. One mogu biti mikronske veličine, ali nekad mogu postojati i prsline od nekoliko centimetara. Savremene metode ispitivanja bez razaranja (IBR) za utvrđivanje grešaka u materijalu kao što su ultrazvučna i radiografska, iako su značajno unapređene, ne mogu uvek da otkriju veoma male greške u materijalu kao što su prsline, poroznost itd.

Kontrolisanje može uticati da se smanje ili otklone neke greške u materijalu, ali se one, u načelu, ne mogu izbeći. Jedan od glavnih zaključaka je, da se pri pravilnom projektovanju konstrukcija sa stanovišta sigurnosti u razmatranje moraju uzeti svi mogući oblici otkaza konstrukcije. Mehanika loma se bavi problemima stabilnog ili nestabilnog rasta neke već postojeće ili tokom eksploatacije inicirane prsline, kao i analizom oštećenja i lomova konstrukcija nastalih rastom prsline [4.5].

Osnovni zahtev pri projektovanju i dimenzionisanju bilo koje inženjerske konstrukcije je, da u periodu predviđenog veka eksploatacije ne dođe do nekog vida oštećenja, usled koga će ona izgubiti funkcionalnost. Dakle, do gubitka funkcije konstrukcije, može se doći na više načina. Najsloženiji i najopasniji način je onaj koji je u načelu opisan kao "krti lom". Korišćenje materijala visoke čvrstoće i relativno visoke vrednosti napona tečenja, u inženjerskoj praksi može biti praćeno neočekivanim pojavama.

Tradicionalno do sada, se sigurnost konstrukcija u odnosu na navedene oblike mogućeg otkaza postizala dimenzionisanjem delova na osnovu dopuštenih napona $\sigma_{dop.}$. I pored ispunjenja strogih zahteva na bazi stepena sigurnosti, ovakav pristup konstruisanja nije dovoljno pouzdan, jer se otkazi i havarije dešavaju. Za ovaj dokaz mogu poslužiti mnogobrojni primeri lomova raznih tipova konstrukcija: čeličnih mostova, rešetkastih nosećih struktura, brodova, vazduhoplova, posuda i cevovoda pod pritiskom itd. Pojedine od njih su posledica loših konstrukcijskih i tehnoloških rešenja, ali su uzrok velikog broja nesreća bile skrivene greške u materijalu koje su tokom eksploatacije prerasle u makro prslinu i lom.

Na kraju možemo reći, da projektovanje zasnovano na klasičnim kriterijumima sigurnosti, koji uključuju koncepciju dopuštenih napona i stepene sigurnosti različitih vrsta, nije dovoljno pouzdano da obezbedi konstrukcijsku celinu delova. Postoji mogućnost da ovaj nedostatak može biti odlučujući, ako tokom eksploatacije dođe do pojave nekog (ili svih) uticaja, od kojih navodimo sledeće:

- primena zavarenih konstrukcija sa zaostalim naponima nepoznate veličine,
- niska radna temperatura ili udarno opterećenje,
- velike dimenzije delova,
- promenljivo (zamorno) opterećenje i
- korozija ili agresivna sredina.

Da bi stvorio pouzdanu konstrukciju projektant će primeniti postavke mehanike loma pri:

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

Osnovni uzrok loma kod velikog broja konstrukcija je nastanak i širenje prslina kao posledice greške ili druge nesavršenosti u materijalu. Rast ovih prslina je prouzrokovan delovanjem statičkih i dinamičkih opterećenja, a u velikom broju slučajeva pomognut i atmosferskim uticajima (temperatura, vlažnost, koroziona sredina).

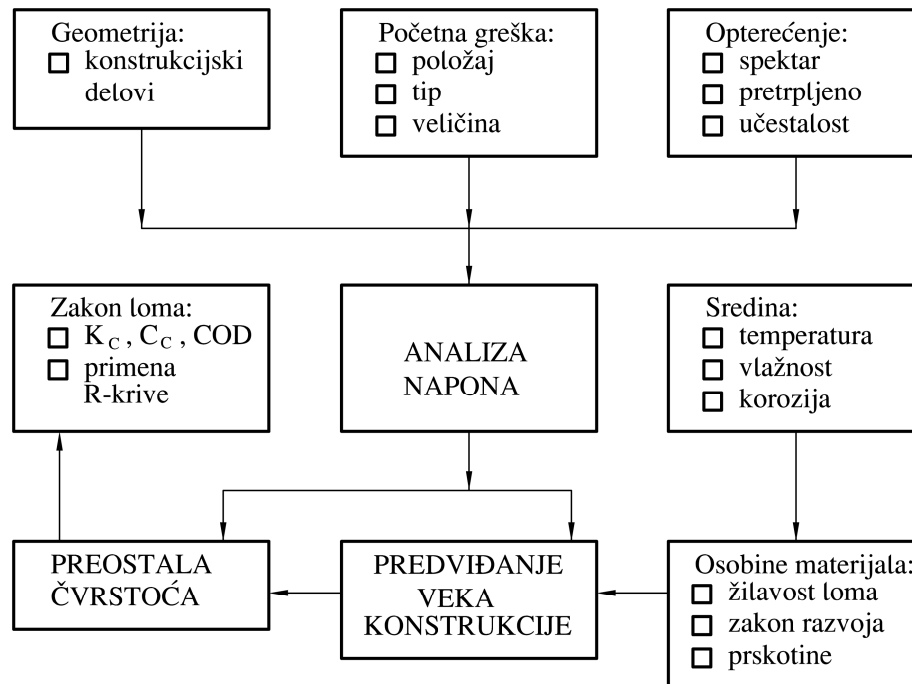
Pri projektovanju konstrukcija mora se uzeti u obzir i čvrstoća i trajnost delova koji sadrže posebno grešku tipa prsline kao najopasniju grešku. Trajnost delova konstrukcije zavisi od brzine širenja prsline (tačke 8.1 i 8.2), odnosno od brzine smanjenja nosivosti, kao posledice do kritičnog razvoja prsline.

Prslina dostiže kritičnu veličinu " a_{cr} " posle određenog kritičnog vremenskog perioda, posle tog vremena nosivost dela postaje manja od projektovanog opterećenja, tako da dolazi do iznenadnog i prevremenog otkaza konstrukcije odnosno katastrofalnog loma. Kako bi se obezbedila sigurnost konstrukcije, projektovanje je potrebno izvršiti prema specifičnim zahtevima u pogledu greške tako da se nikad ne dozvoljava razvoj početne prsline do njene kritične veličine (dužine), jer bi se u tom slučaju smanjilo projektno granično opterećenje ispod propisanog nivoa (F_{min}) u toku radnog veka konstrukcije. Dakle, na vek konstrukcije utiče čitav niz različitih faktora kao što su: maksimalni i radni napon, učestalost opterećenja, zaostali naponi, čvrstoća materijala, veličina prsline, oblik prsline, brzina razvoja prsline, uticaj radne sredine, korozija itd.

Prilikom predviđanja preostalog veka konstrukcije polazi se od pretpostavke da prslina već postoji ili da je nastala u početnom periodu veka konstrukcije. Metodologija predviđanja je prikazan na sl. 4.2 i obuhvata sledeće faze:

- Geometrija: Polazni podatak za analizu napona je određivanje geometrije konstrukcije, koja se projektuje.
- Definisane greške: Primenom ispitivanja bez razaranja utvrđuje se prisutstvo, veličina i oblik greške u različitim fazama razvoja kao i određivanje kritičnog položaja u posmatranom delu. Napomena: Mogu se utvrditi samo greške veće od praga osetljivosti primenjene metode.
- Opterećenje: Potrebno je odrediti tačnu vrednost radnih opterećenja kao i sve promene radnog opterećenja. Napomena: Ako radno opterećenje nije moguće izmeriti, onda se ono preračunava iz deformacija.
- Radna sredina: Definisane uticaja radne sredine na konstrukciju (temperatura, vlažnost, korozija itd.).
- Osobine materijala: Određivanje žilavosti loma i razvoja prsline u uslovima radne sredine i radnog opterećenja.
- Predviđanje radnog veka (procena preostalog veka) konstrukcije: Radni vek se može predvideti na osnovu analize napona i zakona razvoja prsline, a time se dobijaju podaci o veku pri uticaju zamora i intervalima inspekcije u preostalom veku konstrukcije.

Čvrstoća konstrukcije sa prslinom (preostala) zavisi od različitih faktora kao što su: metalurške osobine, pretpostavke pri analizi, uslovi opterećenja. Za tačno određivanje čvrstoće potrebno je pažljivo definisati značaj različitih faktora i njihov uticaj na preostalu čvrstoću. Jedan od najvažnijih faktora pri određivanju preostale čvrstoće je izbor pogodnog kriterijuma za pojavu i analizu loma. Razni autori (istraživači) su predložili više kriterijuma za pojavu loma [4.6]. Najčešće primenjivani kriterijumi za pojavu loma se zasnivaju na određivanju žilavosti loma pri ravnom stanju napona " K_{Ic} ", pomeranju otvora prsline " δ " ili CTOD, gustina energije deformacije W_c , analiza J-integrala [4.6] itd.



Slika 4.2. Predviđanje veka konstrukcije i preostale čvrstoće [4.5].

Dobijanje kvantitativnog odgovora na specifične probleme sigurnosti konstrukcija sa prslinama omogućuje nam mehanika loma. Prsline u konstrukcijama, bez obzira kako su se pojavile, mogu da rastu tokom eksploatacije, pri čemu brzina njihovog rasta zavisi od mnogih faktora kao što su veličina i tip opterećenja, kombinacija materijal - okruženje, veličina i oblik tela sa prslinom itd. Sa porastom prsline povećava se intenzitet napona na njenom vrhu što uzrokuje njen još brži rast.

Posle određenog vremena preostala čvrstoća postaje toliko mala da delovi konstrukcije u eksploataciji mogu da otkazu i pri normalnim radnim opterećenjima. Sve ovo navodi na zaključak da konstrukcija može imati samo ograničen vek eksploatacije, a da konstruktor, polazeći od te činjenice, treba da ponudi rešenja koja će verovatnoću pojave loma svesti na prihvatljivo nizak nivo tj. minimum.

Zbog toga, treba odgovoriti na sledeća pitanja:

- Kolika je preostala nosivost konstrukcije u funkciji dužine prsline?
- Koja se veličina prsline može tolerisati pri očekivanim radnim opterećenjima, tj. kolika je maksimalno dozvoljena dužina prsline a_d ?

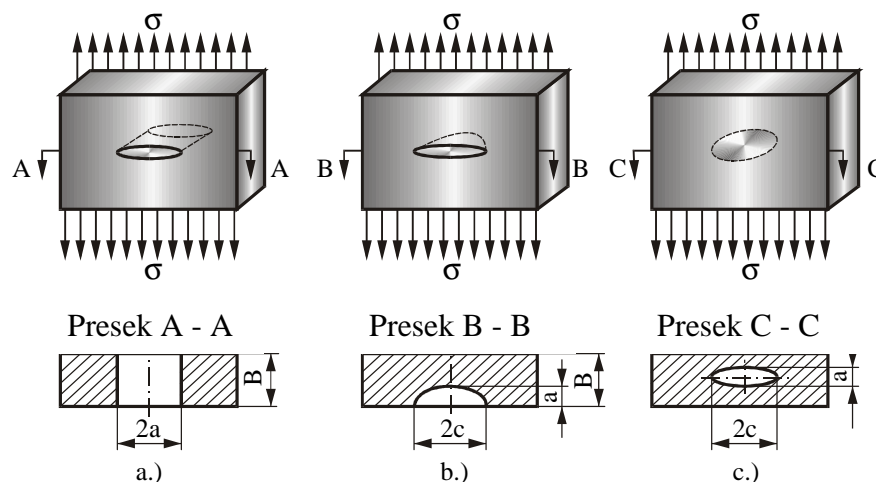
- Koliki je radni vek (preostali vek) konstrukcije kada se pretpostavi da u njoj već postoji prslina?
- Koliko će dugo trajati rast prsline od početne veličine, npr. od one najmanje koja se može otkriti, do najveće dozvoljene veličine prsline?
- Koliko često konstrukcija mora biti podvrgnuta inspekciji i utvrđivanju veličine prsline kako bi se mogla blagovremeno izvršiti zamena, popravka ili zaustavljanje dalje eksploatacije?

U današnjem vremenu koncepti mehanike loma poseduju metode koje mogu dati kvantitativne i dovoljno precizne odgovore na postavljena pitanja. Ovo praktično znači da je mehanika loma omogućila uvođenje novih koncepcija u projektovanju, kao i u proizvodnji, razvoju i primeni novih materijala konstrukcija. Pored navedenog, mogućnost procene opasnosti od greške tipa prsline određene veličine i položaja, koju je otvorila mehanika loma, dozvoljava da se i konstrukcije sa greškama, uz određena ograničenja, puste u rad.

4.3. Osnovne definicije mehanike loma

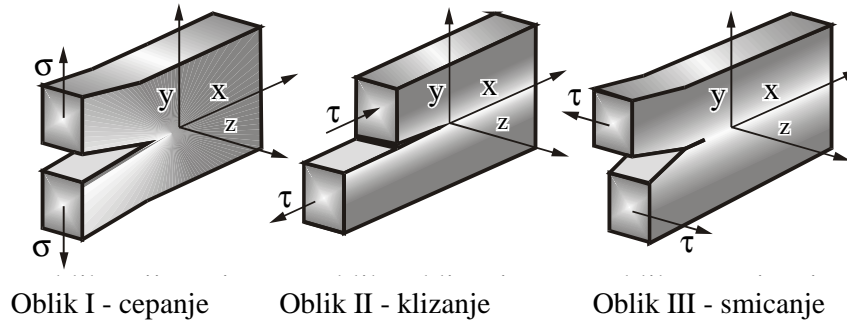
4.3.1. Osnovni oblici obrazovanja površine preloma

Šupljina u telu obrazovana bez uklanjanja materijala i ograničena sa dve naspramne površine (lica) čije je rastojanje neuporedivo manje od dimenzija njene površine [4.7] naziva se prslina. Zajednička konturna linija površine prsline naziva se čelo (front) prsline, sl. 4.3. Dakle, stvarne prsline najčešće su nepravilne po obliku. Na sl. 4.3. su dati najkarakterističniji oblici ravanske prsline idealizovanog čela koji se usvajaju pri teorijskim razmatranjima. Tako se npr. čelo središnje prolazne prsline (sl. 4.3 a) idealizuje kao prava linija, površinske prsline kao poluelipsa (sl. 4.3 b), a čelo skrivene (unutrašnje) prsline kao elipsa (sl. 4.3 c).



Slika 4.3. Osnovni pojavni oblici ravanske prsline
a) prolazna, b) polueliptična, c) eliptična [4.7].

Neopterećene granice napregnutog tela predstavljaju razdvojene površine prsline. 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 sl. 4.4. prikazani su osnovni oblici pomeranja koji obuhvata vrh prsline [4.7].



Slika 4.4. Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma [4.7].

Osnovni oblici pomeranja vrha prsline, koja leže u X-Z ravni, mogu se opisati na sledeći način:

- I oblik - razvoj prsline cepanjem u pravcu y-ose (sl. 4.4 a), određen je pomeranjem površina prsline tako da se one otvaraju simetrično u odnosu na prvobitnu ravan prsline.
- II oblik - razvoj prsline klizanjem u pravcu x-ose (sl. 4.4 b), se odnosi na lokalnu deformaciju pri kojoj jedna površina klizi po drugoj u istoj ravni, ali u suprotnim smerovima.
- III oblik - razvoj prsline smicanjem u pravcu z-ose (sl. 4.4 c), predstavlja slučaj lokalne deformacije, pri kojoj se površine smiču jedna po drugoj duž čela prsline tako da tačke materijala, koje su pre razvoja prsline bile u istoj vertikalnoj ravni, posle razvoja prsline se raspoređuju po različitim vertikalnim ravnima (tzv. neravni razvoj prsline).

Pri razvoju prsline cepanjem (oblik I) nastaju najopasniji lomovi konstrukcija. Zbog toga, ovaj tip lomova je i najviše proučavan, i za taj oblik razvoja loma definisano je i određivanje faktora intenziteta napona.

4.3.2. *Faktor intenziteta napona*

Veličinu komponenti napona pri nejednolikoj raspodeli napona određuje faktor intenziteta napona [4.8]. Treba napomenuti da se svi oblici razvoja prsline (I, II, III) mogu svrstati u ravan problem teorije elastičnosti, jer pripadaju bilo ravnoj deformaciji ili generalisanom ravnom stanju napona. Navedena stanja napona rešavaju se istim matematičkim postupkom. Komponente napona u blizini vrha prsline u prostornom sistemu pravougljih koordinata prikazane su na sl. 4.5. Pojedine zavisnosti komponenti napona σ_x , σ_y , σ_z kao i τ_{xy} mogu se izraziti u sledećem obliku:

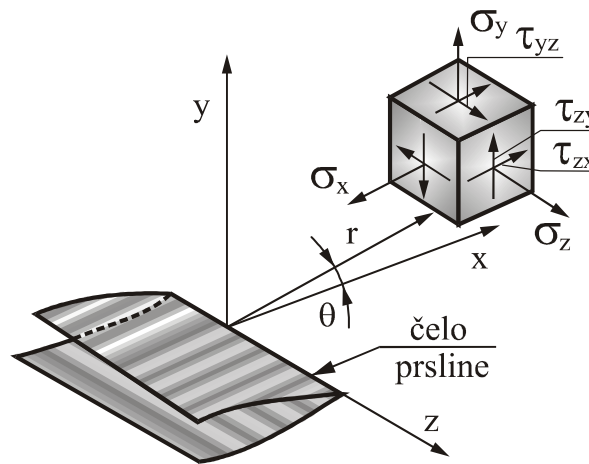
$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_y &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_z &= \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) - RSD \\ 0 - RSN \end{cases} \\ \tau_{xy} &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{2\theta}{2} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Dobijeni izrazi koji opisuju komponente polja napona ispred čela prsline za $r \ll a$, u izotropnom linearno - elastičnom materijalu, se mogu izraziti u tenzorskom obliku:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (4.2)$$

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

Ovo predstavlja poznati Vestegradov model (pristup) [4.9] koji omogućuje povezivanje polja napona lokalizovanog oko čela (vrha) prsline sa globalnim graničnim uslovima.



Slika 4.5. Komponente napona ispred čela prsline u prostornom sistemu pravouglanih koordinata [4.8].

Iz jednačine (4.2.) 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 $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$, koji je jednostavna funkcija udaljenog napona σ i dužine prsline a . Odatle faktor $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ određuje veličinu singulariteta elastičnih napona u polju oko čela (vrha)

prslina. Dobijeni faktor, nazvan faktor intenziteta napona za tip I tj. otvaranje prslina ima oblik:

$$K_I = C \cdot \sigma \sqrt{a} \quad (4.3)$$

i izražava se u MN m^{-3/2} ili MPa m^{1/2}. Konstanta C (geometrijski faktor) za dvoosni slučaj zatezanja iznosi $C = \pi^{1/2}$. Istorijski rezultat u obliku jednačine prvi je dobio Grifit [4.8]. Međutim, on ga je izveo na potpuno različit način, posmatrajući energiju elastične deformacije koju sadrži neograničena sredina, koja okružuje eliptičnu grešku sa zanemarujuće malom manjom osom.

Slično dobijamo i za oblike razvoja prslina II i III.

4.4. Primena parametara mehanike loma

Teorijskim i eksperimentalnim analizama ponašanja tela sa prslinom, mehanika loma je otvorila nove mogućnosti u obezbeđenju sigurnosti konstrukcija. Standard za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} omogućio je primenu linearno elastične mehanike loma na realne konstrukcije, izrađene od materijala visoke čvrstoće. Potreban uslov važenja tih ispitivanja je da je razvijena samo mala zona plastične deformacije oko vrha prslina, pre nego što dođe do razvoja prslina i loma.

Analizirajući energetski kriterijum Grifita, prslina u nekom telu raste nestabilno ukoliko je sila rasta prslina (brzina oslobađanja energije) veća od otpornosti materijala na rast prslina. U linearno elastičnoj mehanici loma, sila rasta prslina se identifikuje sa faktorom intenziteta napona:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.4)$$

gde je:

- Y faktor geometrije,
- σ udaljeni napon,
- a dužina prslina.

Žilavost loma je otpornost materijala na nestabilni rast prslina, u okviru linearno elastične mehanike loma ona predstavlja kritičnu vrednost faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacije, K_{Ic} . Procedura određivanja žilavosti loma kod homogenih materijala, u uslovima ravnog stanja deformacije je detaljno i precizno definisana u standardu ASTM E399 [4.10].

Ako je poznata vrednost žilavosti loma i faktora intenziteta napona, može da se definiše uslov za nestabilni rast prslina:

$$K \geq K_{Ic} \quad (4.5)$$

na osnovu koga se određuje kritična dužina prslina a_c , ako se znaju žilavost loma, udaljeni napon σ i faktor geometrije Y, ili se određuje potrebna žilavost loma (izbor

materijala) ako se znaju dužina prsline a , udaljeni napon σ i faktor geometrije Y . Potreban uslov nestabilnog rasta prsline, jednačina (4.5.), može da se koristi i kao kriterijum za određivanje dozvoljenog opterećenja (predstavljenog naponom σ), ako se znaju dužina prsline a , žilavost loma i faktor geometrije Y .

Određivanje žilavosti loma K_{Ic} direktnim putem i njegova primena su ograničeni samo na materijale visoke čvrstoće, jer je kod većine konstrukcijskih materijala oko vrha prsline je razvijena velika zona plastične deformacije. Zato su u analizi plastičnog ponašanja materijala sa prslinom, kojom se bavi elasto plastična mehanika loma, uvedena još sledeća dva parametra:

- otvaranje vrha prsline CTOD (δ), i
- konturni (J) integral, nezavisan od putanje integracije.

Kada su ispunjeni uslovi ravne deformacije, ova dva parametra predstavljaju kritične veličine (δ_{Ic} i J_{Ic}) u linearno elastičnoj oblasti i direktno su povezani sa veličinom K_{Ic} . Pogodnost primene parametara δ i J je u mogućnosti njihove analize i posle razvoja značajnih plastičnih deformacija, sa jedne strane, kao i u pogodnosti njihovog standardima propisanog eksperimentalnog određivanja, s druge strane.

Predloge standarda za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, prvo su objavili Američko društvo za ispitivanje i materijale (American Society for Testing and Materials - ASTM) - ASTM E399-70T, i Britanska institucija za standarde (British Standard Institution - BSI) - DD 3. Navedeni predlozi su prihvaćeni pod naslovom:

- ASTM E399 - Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials (ispitivanja žilavosti loma pri ravnoj deformaciji metalnih materijala) [4.10], i
- BS 5762 - Standard Test Method for Crack Opening Displacement Standardni postupak za određivanje otvaranja prsline [4.11].

Nakon usvajanja ovih standarda, predložen je veliki broj standarda za ispitivanje epruveta sa prslinama. Među njima su najviše korišćeni:

- ASTM E813 - Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja J_{Ic} , mjere žilavosti loma) [4.12],
- ASTM E1152 - Standard Test Method for Determining J-R Curve (Standardni postupak ispitivanja za određivanje J-R krive) [4.13],
- ASTM E1290 - Standard Test Method for Crack – Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement (Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma mjerenjem otvaranja vrha prsline - CTOD) [4.14],
- ASTM E1737 - Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za određivanje žilavosti loma pomoću J integrala) [4.15]. Ovaj standard je objedinio dva standarda (E 813 i E 1152), koji su u najvećem delu podudarni, a na osnovu iskustva iz njihove primene u prošireno područje primene J integrala u karakterizaciji materijala,
- ASTM E1820 - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za merenje žilavosti loma) [4.16]. Ovaj standard je objedinio standarde E399, E1290 i E1737.

U Britanskim standardima je usvojen slični pristup, pa je u BS 7448 - Fracture mechanics toughness tests [4.17] definisano ispitivanje žilavosti loma, odnosno u njegovom prvom delu Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials, objedinjeni su postupci za određivanje K_{Ic} , kritičnog CTOD i kritične J vrednosti metalnih materijala. U drugom delu BS 7448 - Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials [4.18], koji je objavljen 1997. godine, propisuje se postupak ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva. Težnja objedinjavanja standarda, zasnovana na istim oblicima epruvete i sličnom postupku ispitivanja, iskazana je i u pristupu koji je prihvaćen u Evropi.

Srpski standardi (SRPS), koji se odnose na mehaniku loma, predloženi su znatno kasnije, oko 1990. godine. To su standardi SRPS C.A4.083 - Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanici loma [4.19] i SRPS EN ISO 27737 - Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{Ic}) [4.20].

4.5. Analiza zamora sa stanovišta mehanike loma

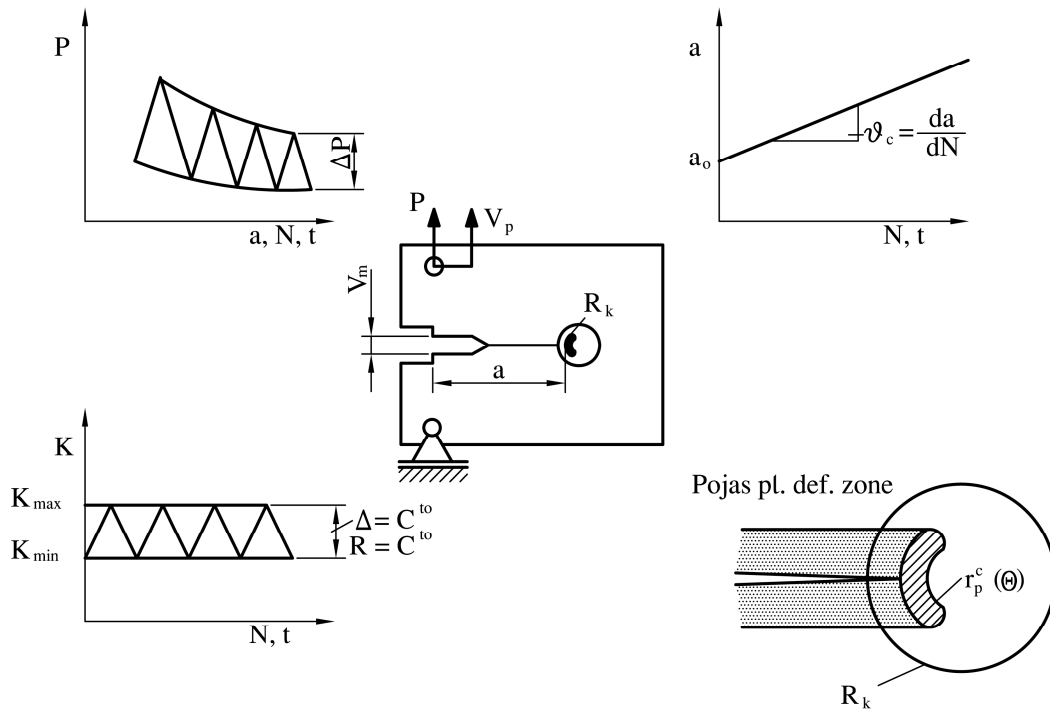
Širenje prsline pod uticajem promenljivih opterećenja koja su manja od opterećenja kvazistatičkog loma naziva se zamor materijala. Tokom eksploatacije, najveći broj oštećenja i ispada iz pogona delova i konstrukcija se događa kao posledica zamora. U nizu situacija oštećenja se mogu pripisati stanju materijala, ali su mnoga oštećenja posledica loših konstrukcijskih rešenja [4.21]. Ovo znači da sklonost ka zamoru dela mašine ili konstrukcije, ne zavisi samo od izdržljivosti na zamor materijala od kojeg je deo izrađen već i od njegove geometrije. Dakle, kada se kao zadatak postavlja povećanje izdržljivosti neke mašine ili konstrukcije na zamor treba imati u vidu da samo izbor izdržljivijeg materijala od kojih su delovi napravljeni nije dovoljan, a često je i neefikasan i da nova konstrukcijska rešenja predstavljaju bolju alternativu.

Greške u materijalima i razni oblici koncentratora naprezanja (zarezi, žlebovi, otvori, zavareni i mehanički spojevi) u elementima se ne mogu izbeći. Zato se period do iniciranja zamorne prsline N_f , sa stanovišta ukupnog veka zamora do pojave loma N_u , može zanemariti. S obzirom da se na brzinu rasta makroskopske prsline ne može uticati promenom strukture, to preostaje da se za dati materijal epruvete ili elementa odredi brzina rasta prsline u laboratorijskim uslovima i da se, nakon što se povremenim inspekcijama odredi veličina prsline, proceni preostali vek konstrukcije. Postavke linearno elastične mehanike loma (LEML) pružaju mogućnost procene preostalog veka konstrukcije.

4.5.1. Koncept Linearno elastične mehanike loma (LEML)

Osnovne ideje koncepta LEML se mogu primeniti i za određivanje rasta prsline pri zamoru [4.22]. Teoretska potvrda je bazirana na takozvanom konceptu sličnog ponašanja kada su uslovi na vrhu prsline jednoznačno definisani samo preko jednog parametra opterećenja kao što je faktor intenziteta napona K . U slučaju stacionarne prsline to znači da će do loma dve različite konfiguracije od istog materijala doći pri istoj, kritičnoj, vrednosti K - faktora, K_c .

Na sl. 4.6. je dat primer rasta prsline pri konstantnoj vrednosti opsega K - faktora, ΔK . Ovaj tip opterećenja je samo uopštenog značaja jer se u eksploatacionim uslovima ne pojavljuje. On je međutim interesantan pri eksperimentalnim ispitivanjima i moguće ga je ostvariti na kompjuterski upravljanim pulzatorima. Treba uočiti da nepromenljivost opsega ΔK 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.



Slika 4.6. Načelno linearni rast prsline $a - N,t$ pri konstantnom opsegu $\Delta K = \text{const}$ i uslovima ograničenog tečenja $r_p^c \ll R_k$ [4.22].

Pošto svaki ciklus zamora formira odgovarajuću plastičnu zonu ispred vrha prsline $r_p^c(\theta)$ to sa rastom prsline iza njenog vrha ostaje pojas plastično deformisanog materijala (sl. 4.6). Ako 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. Dakle, sledi da se brzina rasta prsline da/dN može izraziti u obliku

$$\frac{da}{dN} = f_I(\Delta K, R) \quad (4.6)$$

gde je:

- $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ opseg K -faktora i
- $R = K_{max}/K_{min}$ njegov odnos.

Pošto veličina plastične zone zavisi samo od K_{max} i K_{min} sledi da prethodni izraz implicitno uzima u obzir uticaj plastične zone i pratećeg plastičnog pojasa na brzinu

rasta prsline. Ako K_{\max} i K_{\min} variraju tokom ciklusa zamora brzina rasta za tekući ciklus može zavisiti i od nivoa opterećenja χ pa se prethodni izraz može uopštiti i prikazati u obliku

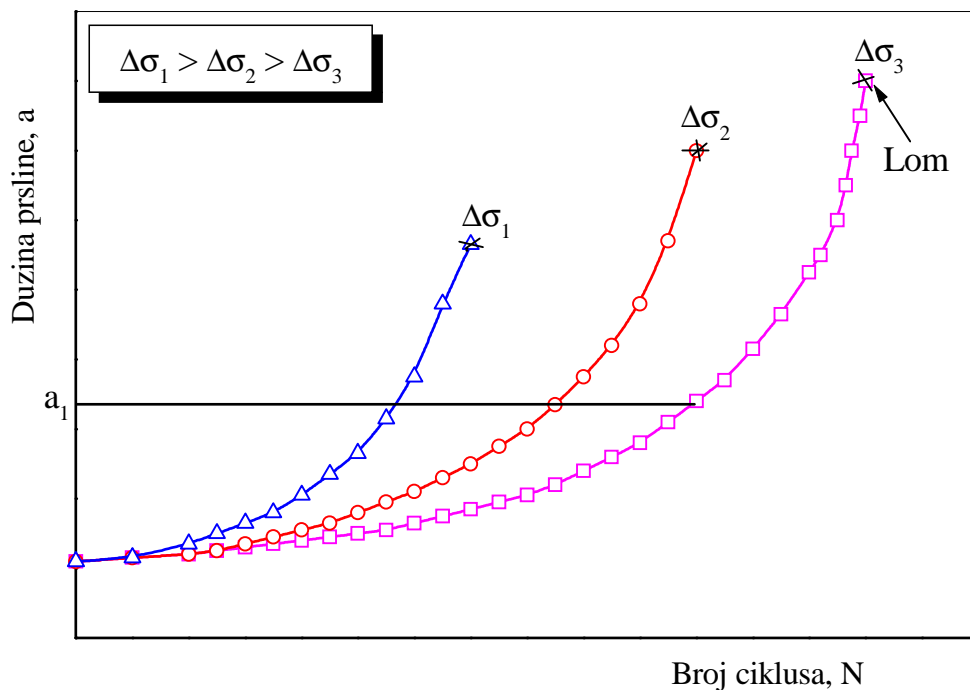
$$\frac{da}{dN} = f_2(\Delta K, R, \chi) \quad (4.7)$$

Potrebno je naglasiti da uticaj različitih opterećenja na rast prsline da/dN isključuje primenljivost koncepta sličnog ponašanja. Tako npr., dve konfiguracije od istog materijala izložene zamoru sa istim vrednostima ΔK i R će pokazati istu brzinu rasta prsline da/dN samo ukoliko su i nivoi prethodnih opterećenja identični.

Širenje (rast) prsline pri zamoru je veoma složen proces koji zavisi od niza promenljivih kao što su:

- Faktor intenziteta efektivnog polja napona na vrhu prsline definisan K-faktorom,
- Tip i oblik opterećenja,
- Radna sredina (agresivnost, temperatura, vlažnost),
- Mehaničke i metalurške karakteristike metala.

Zahtev da se mehanika loma uvede u proučavanje zamornog ponašanja proistekao je iz analize rasta prsline pri cikličnom opterećenju. Na sl. 4.7. je prikazana promena dužine prsline, a , sa brojem ciklusa, N , za tri nivoa gornjeg napona σ_g ($\Delta\sigma_1 > \Delta\sigma_2 > \Delta\sigma_3$) pri donjem naponu $\sigma_d=0$, pri čemu je svaka epruveta imala istu početnu dužinu prsline a_0 .



Slika 4.7. Zavisnost dužine zamorne prsline od broja ciklusa.

Primetno je da se sa povećanjem broja ciklusa N i dužine prsline a , brzina rasta prsline definisana nagibom tangente, stalno raste. Pored navednog sa povećanjem opsega napona $\Delta\sigma$ dolazi i do bržeg povećanja gradijenta brzine. Drugačije rečeno, prslina na

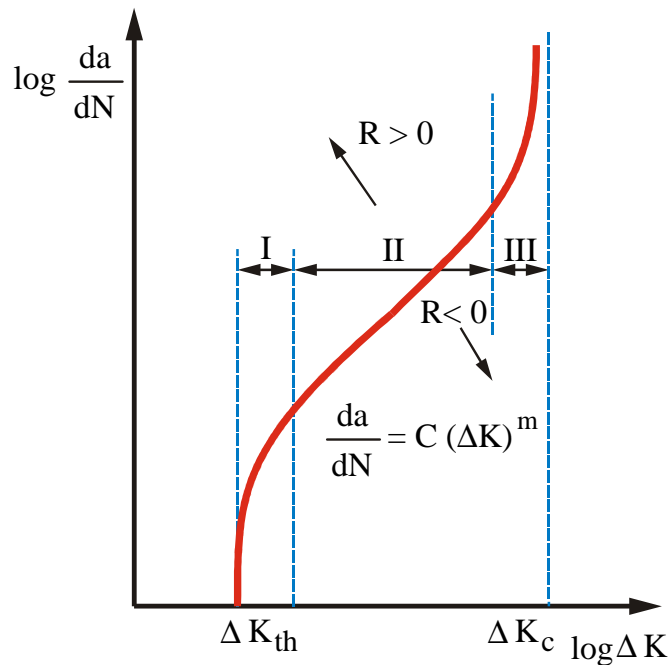
primer dužine a_1 na sl. 4.7. brže raste pri amplitudi napona $\Delta\sigma_3$ nego pri $\Delta\sigma_2$ odnosno $\Delta\sigma_3$.

U literaturi se mogu naći brojne teorijski i empirijski definisane zavisnosti u obliku $da/dN = f(F, a)$, kojima se naglašava važnost opterećenja i dužine prsline. Prvi koji su kao osnovni parametar koji kontroliše brzinu rasta zamorne prsline definisali opseg faktora intenziteta napona $\Delta K = f(\sigma, a)$ u obliku

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y (\sigma_{max} - \sigma_{min}) (\pi a)^{1/2} = Y \Delta \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (4.8)$$

bili su Paris i saradnici [4.22, 4.23].

Sa odgovarajuće krive $a - N$,t grafičkim ili numeričkim postupkom se određuje brzina rasta prsline da/dN u funkciji od ΔK . Eksperimentalni rezultati predstavljeni na dvostruko-logaritamskoj skali najčešće imaju karakterističan S-oblik, šematski prikazan na sl. 4.8 [4.22].



Slika 4.8. Načelni oblik promene brzine rasta $da/dN = f(\Delta K)$ za $R = 0$ i pravci pomeranja S-krive za odnose $R \neq 0$ [4.22].

Posmatranjem mehanizma rasta prsline i različitih intenziteta uticajnih faktora mogu se uočiti tri oblasti na ovoj krivoj. U oblasti I sa smanjenjem ΔK dolazi do naglog smanjenja brzine rasta prsline. Vrednost ΔK pri kojoj su te brzine reda 10^{-10} m/ciklusu ili manje definiše prag osetljivosti opsega faktora intenziteta napona - prag zamora, ΔK_{th} [4.24]. Zamorne prsline ispod ΔK_{th} se ponašaju kao prsline bez tendencije porasta.

U oblasti II zavisnost $\log(da/dN)$ od $\log \Delta K$ je u osnovi linearna i predstavljena pravom linijom koju su Paris i saradnici [4.24] (tačka 7.1.), opisali stepenom funkcijom oblika

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (4.9)$$

Do naglog rasta prsline pre konačnog loma dolazi u okviru oblasti III. Ta prividna nestabilnost je povezana sa približavanjem maksimalne vrednosti K - faktora, K_{max} , kritičnoj vrednosti žilavosti loma K_{Ic} , za dati materijal, što je povezano sa ranom fazom krtoq loma. Ova je izraženo kod materijala visoke čvrstoće, a male žilavosti loma, gde dimenzije epruveta za zatezanje omogućavaju linearno - elastično ponašanje i pri nivoima K - faktora bliskim žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} .

Analizom dosadašnjih uticajnih faktora na rast zamorne prsline vidi se da pored opsega ΔK , kao najuticajnijeg, na brzinu rasta prsline utiču I mnogi mehanički, geometrijski i metalurški faktori i osobine radne sredine. Zbog toga je nemoguće dati u jednostavnom analitičkom obliku sve ove uticaje na rast prsline pri zamoru. Do sada je, međutim, izveden niz empirijskih, poluempirijskih ili čisto teoretskih modela za predviđanje brzine rasta prsline [4.25 - 4.27], ali je karakteristično da svaki od njih zadovoljava u određenoj oblasti ΔK i za određene materijale i uslove ispitivanja.

Mogućnost primene LEML se zasniva na faktoru intenziteta napona, K_I , koji s jedne strane predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući oblik i veličinu prsline, a s druge strane, njegova kritična vrednost, nazvana žilavost loma, K_{Ic} , predstavlja svojstvo materijala. Tumačenjem parametara LEML i energetskog kriterijuma Grifita, dobijaju se jednostavne zavisnosti kojima se procenjuje vek konstrukcije:

- $K_I \leq K_{Ic}$ - vek konstrukcije nije ugrožen,
- $K_I > K_{Ic}$ - vek konstrukcije jeste ugrožen jer je moguć krti lom.

Karakteristike otpornosti materijala na prsline se određuju eksperimentalno, prema standardu ASTM E1737 [4.15]. U okviru linearno elastične mehanike loma (LEML), sila rasta prsline se identifikuje sa faktorom intenziteta napona: $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, gde je Y bezdimenzioni faktor geometrije, σ udaljeni napon, a dužina prsline. U okviru linearno elastične mehanike loma, otpornost materijala na nestabilni rast prsline se predstavlja kritičnom vrednošću faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacije, K_{Ic} , odnosno žilavošću loma. Neophodan uslov za nestabilni rast prsline glasi: $K_I \geq K_{Ic}$, odakle se određuje kritična dužina prsline a_c , ako se znaju žilavost loma, udaljeni napon σ i faktor geometrije Y, ili se određuje potrebna žilavost loma (izbor materijala) ako se znaju dužina prsline a , udaljeni napon σ i faktor geometrije Y. Neophodan uslov nestabilnog rasta prsline može da se koristi i kao kriterijum za određivanje dozvoljenog opterećenja, ako se znaju dužina prsline a , žilavost loma i faktor geometrije Y.

Mogućnost primena LEML je po pravilu ograničena na dokaz sigurnog rada konstrukcije sa prslinom, kod koje se pri tom zanemaruje sposobnost materijala da se plastičnim deformacijama suprotstavi rastu prsline. Pošto je uticaj plastične deformacije oko vrha prsline vrlo bitan za većinu konstruktivnih materijala, to je za kompletnu analizu rasta prsline neophodno primeniti parametre elasto plastične mehanike loma, kao što su CTOD i J integral.

4.5.2. Koncept elasto plastične mehanike loma (EPML)

Uzmanje u obzir plastičnosti materijala pri proceni veka konstrukcija, svodi se na primenu otvaranja vrha prsline ili J integrala, kao merodavnih parametara elasto plastične mehanike loma. Otvaranje vrha prsline - CTOD, iako nema "čvrstu" teorijsku osnovu, ima veliku praktičnu primenu, pre svega zbog jednostavnosti određivanja. S druge strane, J integral, po pravilu zahteva komplikovaniji postupak određivanja, ali kao energetski parametar, teorijski utemeljen u osnovnim zakonima mehanike kontinuuuma, ima i podjednako važnu praktičnu primenu.

Posebnu mogućnost analize kompletnog rasta prsline (stabilnog i nestabilnog), tj. elasto plastičnog ponašanja materijala sa prslinom, pruža J integral [4.28]. To je konturni integral nezavisan od putanje integracije. Ovaj parametar je pogodan za analizu ponašanja dvodimenzionog ravnog tela kod nelinearno elastičnog materijala, opterećenog kvazistatički bez rasterećenja. Kritična vrednost J integrala, J_{Ic} , pri kojoj počinje stabilni rast prsline, (sl. 5.11 u poglavlju 5), može da se odrediti i ako nisu zadovoljeni uslovi ravnog stanja deformacije, što je bitno ograničenje pri određivanju K_{Ic} .

U našem slučaju faktor intenziteta napona (žilavost materijala) K_{Ic} , je određen preko J integrala, J_{Ic} , (tačke: 5.5. i 6.4.)

4.6. Pogodnost za upotrebu

Primena mehanike loma je velika. Praktično, ona se primenjuje kod projektovanja novih (određivanje veka) i kod konstrukcija koje su u radu (produženje veka). Ona se koristi kod raznih konstrukcija, kao što su: rešetkaste konstrukcije (tornjevi, mostovi, stubovi građevinskih dizalica itd.), turbine u termo elektranama, željeznička vozila, avionska industrija, posude pod pritiskom, cevovodi itd.

Korišćenje mehanike loma je donelo značajne promene u inženjerskoj praksi. Dakle, osnovna promena koju je mehanika loma uvela u inženjersku praksu prihvatanje neminovnosti postojanja prsline i sličnih grešaka i neophodnosti analize njihovog uticaja na integritet konstrukcije. Glavna uloga mehanike loma je da matematički poveže tri promenljive veličine (napon, veličina greške i žilavost loma), čime je omogućeno da se na osnovu dve poznate veličine izračuna treća (poglavlje 1). Na primer, ako je na osnovu opterećenja i geometrije konstrukcije poznat napon, a na osnovu ispitivanja žilavost loma materijala konstrukcije, onda može da se odredi kritična veličina greške. U praksi je takođe čest slučaj da se metodama ispitivanja bez razaranja (IBR) otkrije prsline ili slična greška u konstrukciji za koju se onda određuje kritični napon na osnovu poznate žilavosti loma materijala, ili se određuje minimalna žilavost loma materijala na osnovu naponskog stanja konstrukcije. Na kraju, ovaj koncept može da se primeni još u fazi projektovanja, ako se pretpostavi postojanje prsline čije su dimenzije jednake osetljivosti opreme za IBR, pa se odredi dozvoljeni napon na osnovu žilavosti loma, ili obrnuto.

Procedura primene mehanike loma zavisi od raspoloživih podataka, ponašanja materijala, uticaja okolne sredine i opterećenja konstrukcije. Kada imamo statičko opterećenje, treba razlikovati ponašanje materijala, koje se opisuje kao linearno elastično (srazmerno malo

tečenje), od ponašanja materijala kod koga ne može da se zanemari njegovu plastičnost. U prvom slučaju se primenjuje linearno elastična mehanika loma (LEML), dok se u drugom slučaju, u zavisnosti od oblika plastičnog tečenja primenjuju različite varijante elasto plastične mehanike loma (EPML). Kada imamo dinamičko opterećenje, takođe treba razlikovati, linearno elastično od elasto plastičnog ponašanja materijala, a poseban značaj ima zamor, kao tipični mehanizam rasta prsline pod dejstvom cikličnog opterećenja.

5. PROGRAM I PLAN ISPITIVANJA

Da bi se ispunio cilj eksperimentalnih istraživanja u ovom radu je izvršeno ispitivanje novog i eksploatisanog osnovnog materijala, od koga je napravljena konstrukcija tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, a koje sadrži sledeće:

- određivanje hemijskog sastava materijala,
- određivanje zateznih osobina na sobnoj temperaturi,
- određivanje udarnih osobina na instrumentiranom Šarpijevom klatnu, i određivanje prelazne temperature (temperature nulte plastičnosti),
- određivanje parametara visokocikličnog zamora na sobnoj temperaturi (Velerove krive),
- određivanje parametara mehanike loma na sobnoj temperaturi,
- određivanje parametara rasta zamorne prsline na sobnoj temperaturi,
- ispitivanje na malociklični zamor,
- makro i mikrostrukturna ispitivanja.

Podaci o epruvetama za ispitivanje dati su u tabeli 5.1.

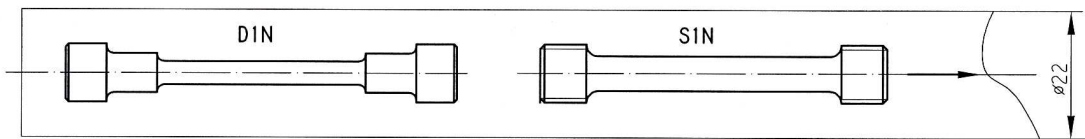
Tabela 5.1. Epruvete za ispitivanja od eksploatisanog (E - obrađenih površina), (EK - neobrađenih površina) i novog (N) materijala.

Redni broj	Oznaka	Naziv	Broj komada
1.	S1 N	Epruveta za zatezanje 1	12 N
2.	D1 N	Epruveta za dinamička ispitivanja 1	24 N
3.	S2 E	Epruveta za zatezanje 2	12 N
4.	D2 E	Epruveta za dinamička ispitivanja 2	12 E
5.	D3 N, D3 E	Epruveta za dinamička ispitivanja 3	12 N + 24 E
6.	O1 N, O1 E O1 EK	Epruveta sa otvorom	12 N + 12E +12 EK
7.	Ž1 N, Ž1 E	Epruveta za ispitivanje energije udara	32 N + 32 E

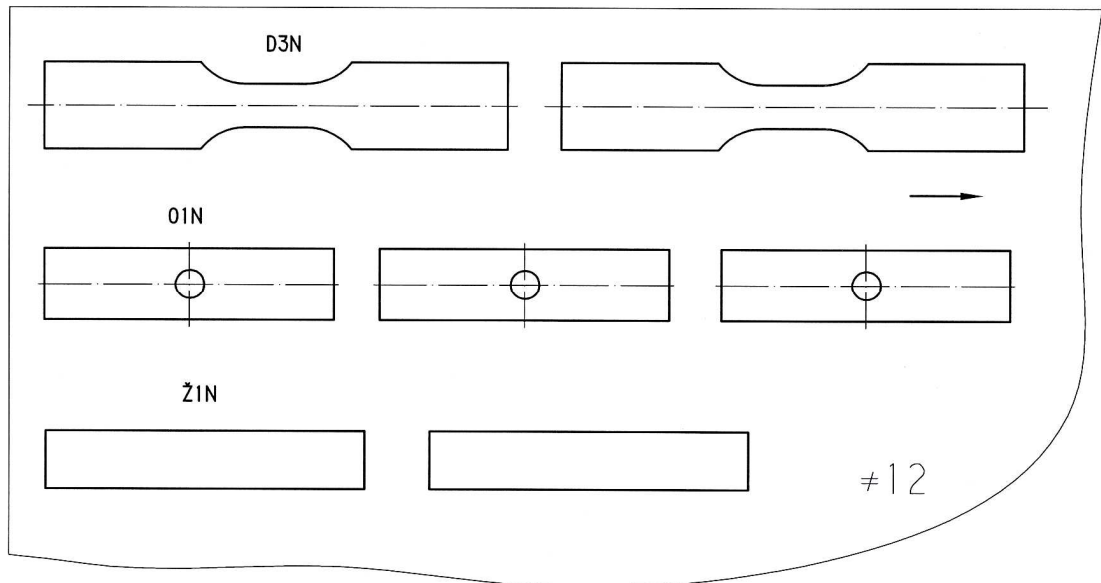
Eksperimentalno dobijeni rezultati mehaničko eksploatacijskih ispitivanja predstavljaju neophodne polazne podatke za proračun i definisanje kritičnih mesta na samoj konstrukciji tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa.

5.1. Materijal

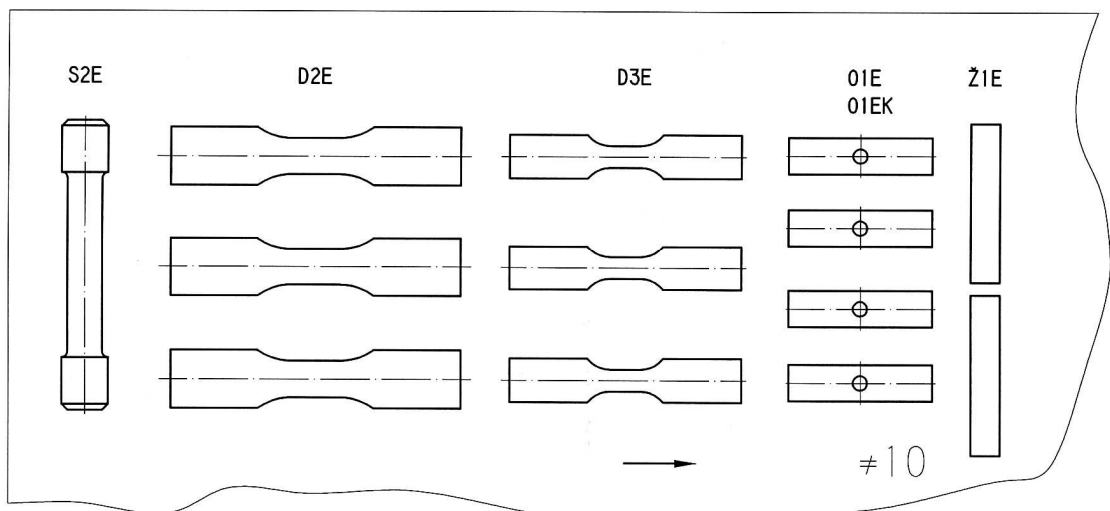
a)



b)



c)



Slika 5.1. Šematski prikaz uzorkovanja epruveta
 a) iz novog materijala, šipka prečnika, $\text{Ø} 22 \text{ mm}$
 b) iz novog materijala, lim debljine 12 mm
 c) iz eksploataisanog materijala, L profil debljine 10 mm.

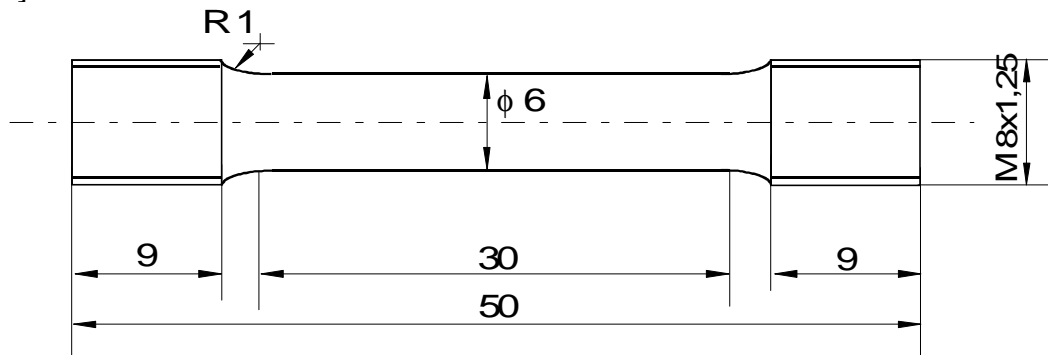
Utjecaj vremena eksploatacije na mehanička, strukturna i eksploatacijska svojstva čelika od koga je napravljena konstrukcija tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, je analiziran ispitivanjem eksploatisanog materijala uzorkovanog sa konstrukcije tornja koji je bio u eksploataciji 30 godina i uzorka novog materijala nabavljenog radi sanacije konstrukcije tornja.

5.2. Uzorkovanje

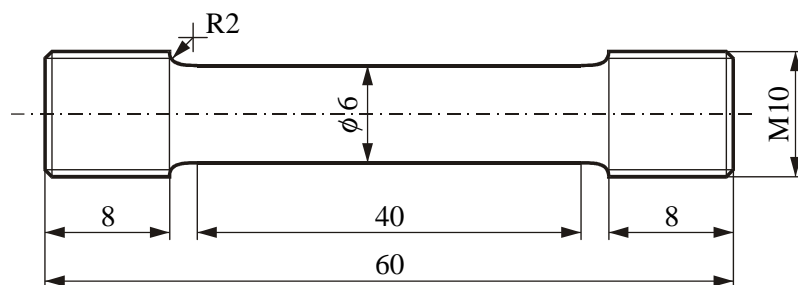
Na osnovu programa eksperimentalnih ispitivanja definisana je šema uzorkovanja epruveta iz dostavljenih uzoraka eksploatisanog materijala (epruvete su uzete sa uzdužnog L profila dimenzija 150 x 150 x 10) sa rashodovane konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, sl. 5.1 c. Epruvete za novi materijal su uzete iz lima debljine 12 mm, sl. 5.1 b i šipke prečnika, $\varnothing 22$ mm, sl. 5.1 a.

5.3. Određivanje zateznih osobina

Osnovne karakteristike čvrstoće materijala eksploatisanog i novog materijala, kao i krive napon - izduženje neophodne za naponsku analizu konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, dobijaju se zateznim ispitivanjima. Detaljan postupak ispitivanja kao i geometrija epruvete, sl. 5.2 i 5.3, je definisan standardom EN 10002-1 [5.1].



Slika 5.2. Epruveta za određivanje zateznih svojstava eksploatisanog materijala [5.1].



Slika 5.3. Epruveta za određivanje zateznih svojstava novog materijala [5.1].

Ispitivanje je urađeno na savremenoj elekto mehaničkoj kidalici SCHENCK TREBELL RM100 u kontroli opterećenja opsega od 0–20 kN, sl. 5.4. Izduženje je registrovano pomoću ekstenzometra čija je tačnost bila $\pm 0,001$ mm.

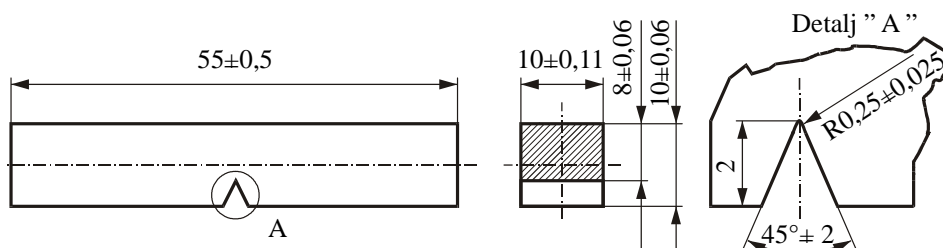


Slika 5.4. Elektromehanička kidalica SCHENCK TREBELL RM 100.

5.4. Udarne ispitivanja

Objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju, tj. pri prostornom naponskom stanju, dobija se ispitivanjem savojnim udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom. Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala, kao i njegove obrade. Sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije (starenje) može se utvrditi ovim postupkom ispitivanja [5.2].

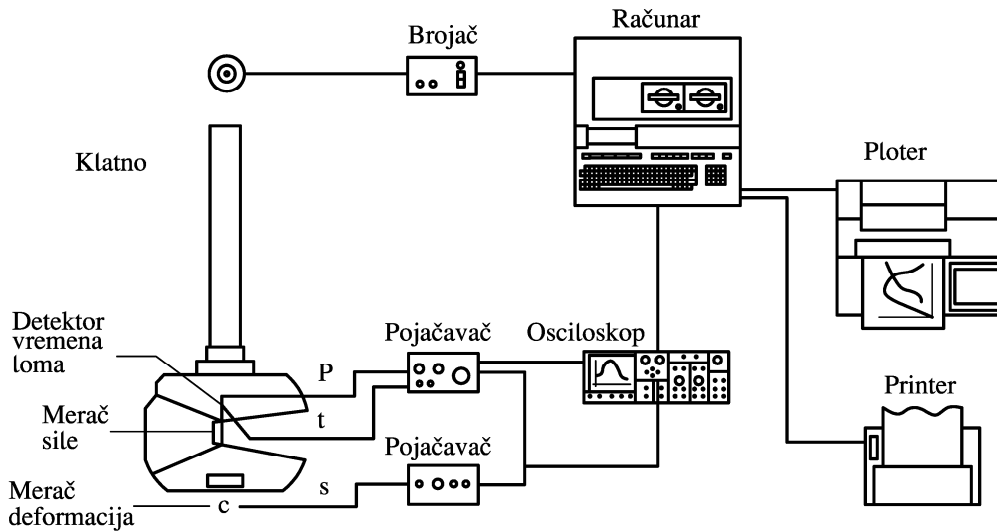
Udarne ispitivanja epruveta sa zarezom u novom i eksploatisanom materijalu, su rađena u cilju određivanja ukupne energije udara, kao i komponenti, energije stvaranja prsline i energije širenja prsline. Postupak ispitivanja, kao i oblik i dimenzije epruveta, sl. 5.5, je definisan standardom SRPS EN 10045-1 [5.3]. Zarez se po pravilu izrađuje glodanjem tako da pri obradi ne dođe do promene stanja materijala. U podnožju zareza ne sme da bude vidljivih tragova mašinske obrade.



Slika 5.5. Oblik i dimenzije standardne epruvete za ispitivanje metodom po Šarpiju sa V- zarezom [5.3].

Energija loma određuje se kao integralna veličina pri ispitivanju savojnim udarnim opterećenjem. Ovako određena energija loma ne daje mogućnost razdvajanja na energiju stvaranja i energiju širenja prsline. Kako bi se to postiglo udarna sila i vreme treba da budu kontinualno registrovani tokom ispitivanja, što je moguće izvesti instrumentiranjem klatna. Na sl. 5.6 je dat šematski prikaz savremenog instrumentiranog

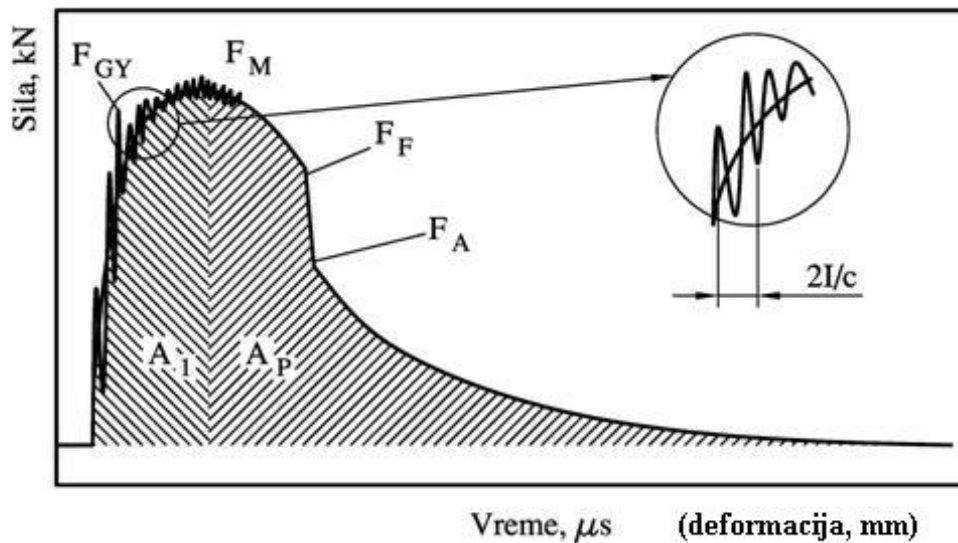
klatna [5.4].



Slika 5.6. Šematski prikaz savremenog instrumentiranog klatna [5.4].

Instrumentiranje klatna obuhvata povezivanje merača sile, koji je instaliran u čekić klatna, detektora vremena loma i merača deformacije preko pojačavača sa osciloskopom (sl.5.6.). Pošto je lom epruvete izazvan udarom kratkotrajna pojava (0,5 - 12 ms), to je uloga osciloskopa da registrovane signale učini vidljivim. Radi obrade dobijenih signala pri merenju vrši se povezivanje osciloskopa sa računarem.

Posmatranjem promene sile sa vremenom omogućava da se sazna više o tome da li je utrošeni rad za lom uzorka posledica delovanja niske vrednosti sile na duže vreme, ili kratkotrajnog delovanja visoke vrednosti sile, što je bitno za ocenu ponašanja materijala. Praćenje promene sile sa vremenom, odnosno dobijanje dijagrama sila - vreme, omogućeno je ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu, sl. 5.7. [5.4].



Slika 5.7. Tipičan dijagram sila - vreme za izraženo plastično ponašanje materijala, dobijen na instrumentiranom klatnu [5.4].

Ovako dobijen dijagram sila - vreme, sl. 5.7, omogućava određivanje sledećih podataka:

- F_{GY} - dinamička sila napona tečenja; određuje se na mestu zakrivljenja dijagrama, tj. na prelaznoj tački od linearne ka nelinearnoj zavisnosti sila - vreme. Ona služi u prvoj aproksimaciji kao mera plastičnog popuštanja ligamenta uzorka.
- F_M - maksimalna sila na krivoj sila - vreme.
- F_F - sila početka nestabilnog rasta prsline; određuje se kao sila na preseku glatke krive i strmo padajućeg dela krive sila-vreme.
- F_A - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline.

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

Deformacije koje odgovaraju definisanim silama na sl. 5.7, nose iste indekse kao i ove sile. Posebno se definiše deformacija s_T na kraju krive sila - deformacija.

- s_{GY} - deformacija na početku plastičnog loma ligamenta,
- s_M - deformacija pri maksimalnoj sili,
- s_F - deformacija pri inicijaciji nestabilnog rasta prskotine,
- s_A - deformacija na kraju nestabilnog rasta prskotine,
- s_T - deformacija na kraju krive sila - deformacija, pri čemu je kraj ove sile definisan kao $0,02 F_M$.

Na osnovu dijagrama sila - vreme, sl. 5.7, moguće je izračunati energiju A_{uk} , potrebnu za lom uzorka:

$$A_{uk} = \int_0^{t_l} F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

- gde je: $F(t)$ - sila, koja se menja sa vremenom,
 $v(t)$ - promena brzine klatna za vreme loma,
 t - vreme trajanja loma.

Kako bi se povećala sposobnost prikaza energije udara, ona se mora rastaviti na sastavne komponente, silu i deformaciju (ugib epruvete). Ugib se određuje iz zavisnosti sila - vreme. Veza između sile i vremena je proporcionalna karakteristikama ubrzanja. Koristi se kruti teg mase m , početne brzine udara v_0 , a deformacije počinju u trenutku vremena t_0 . Dvostrukom integracijom se proračunava ugib:

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (5.2)$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad (5.3)$$

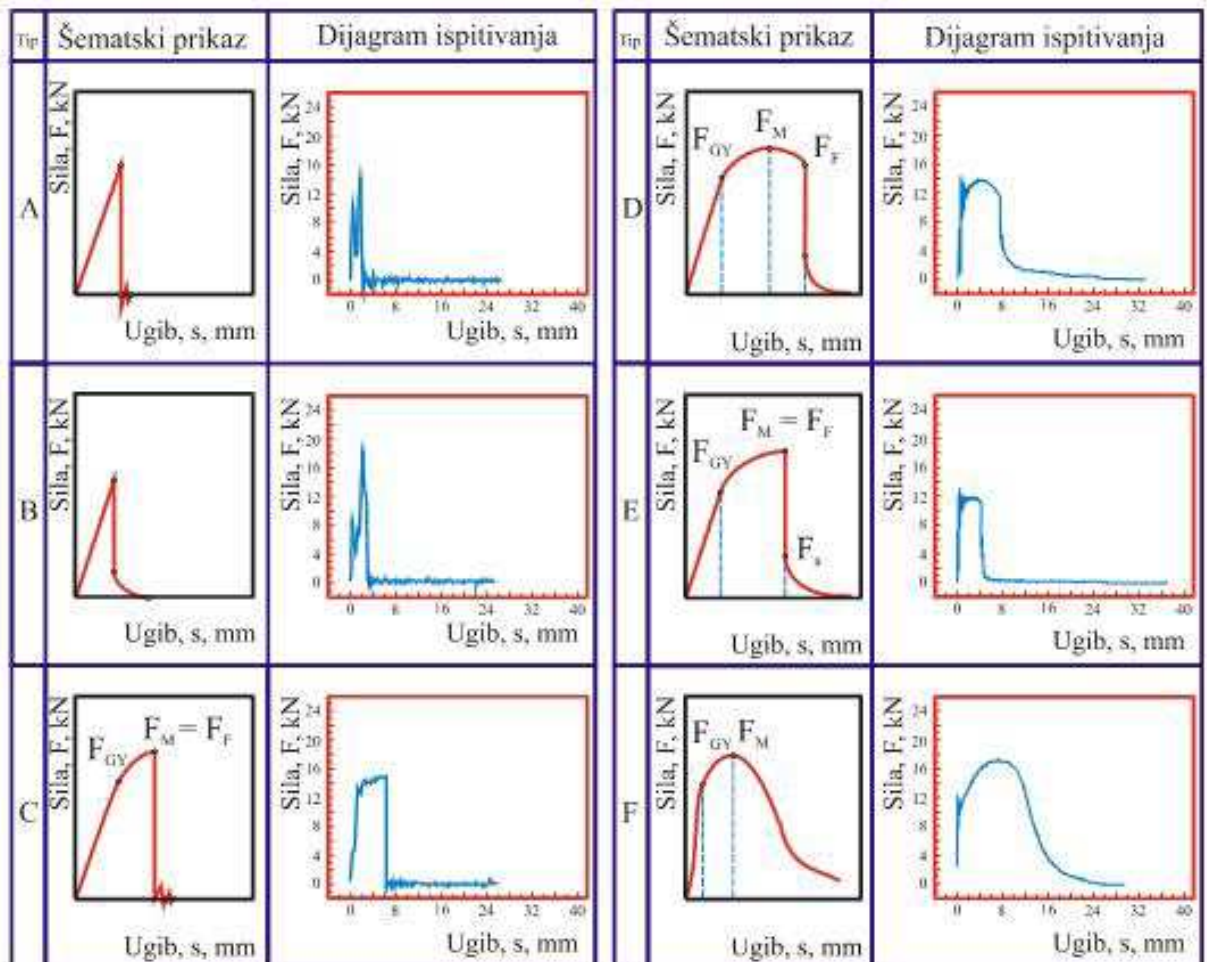
Za kompletnu ocenu ponašanja materijala pri udarnom opterećenju potrebno je znati koji se deo energije troši za stvaranje prsline, a koji deo za širenje prsline. Postoji više metoda kojima se može razdvojiti ukupna energija udara, A_{uk} , na energiju za stvaranje prsline, A_I , i energiju za širenje prsline, A_P . Većina njih se zasniva na tome da energija za stvaranje prsline ne zavisi od radijusa zareza, već da radijus utiče na energiju za širenje prsline.

Određivanje energije širenja prsline preko "zamorne prsline" je najprihvatljivija metoda. Suština ove metode je u tome da se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prslina, pa se takva epruveta lomi na Šarpi klatnu i energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline, A_P . Ako je poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda može da se izračuna deo energije potrebne za stvaranje prsline, A_I :

$$A_I = A_{uk} - A_P \quad (5.4)$$

Po ovoj metodi određivanje energije stvaranja i energije širenja prsline obavlja se na jednom uzorku (za razliku od drugih postupaka), što daje veću tačnost. Na dijagramu sila - vreme, sl. 5.7, obeležene su površine A_I i A_P koje su proporcionalne energijama stvaranja i širenja prsline.

Moguće je poređenje dva materijala koja imaju jednake vrednosti ukupne energije loma, a imaju različite energije stvaranja i širenja prsline. Za sigurnost konstrukcije bolji je onaj materijal koji ima malu energiju stvaranja prsline, a veliku energiju širenja prsline. Ispitivanjem na instrumentiranom klatnu mogu da se dobiju različiti tipovi zavisnosti sila - vreme, odnosno sila - ugib, u zavisnosti od vrste ispitivanog materijala, temperature ispitivanja, režima termičke obrade. Na osnovu dijagrama sa sl. 5.8, možemo odrediti kom tipu ponašanja pri lomu pripadaju ispitani uzorci (A do F) [5.5].



Slika 5.8. Tipovi dijagrama dobijeni ispitivanjem instrumentiranim klatnom [5.5].

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

$$\% DL = \left(1 - \frac{F_F - F_a}{F_M} \right) \cdot 100 \quad (5.5)$$

Kada na dijagramu nema jako strmog pada (tip F), može da se kaže da je udeo duktilnog loma u prelomnoj površini 100%.

Tipovi dijagrama dobijeni ispitivanjem instrumentiranim klatnom dati su u standardu [5.6].

Udarne ispitivanja epruveta novog i eksploatisanog, rađena su na sobnoj temperaturi od 20°C, kao i na 0°C, -20°C, -40°C i -50°C. Ispitivanje je izvedeno na instrumentiranom Šarpi klatnu SCHENCK TREBELL 150/300 J, sl. 5.9.



Slika 5.9. Instrumentirano Šarpi klatno SCHENCK TREBELL 150/300 J.

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

Lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline, pokazuje nam ispitivanje epruveta sa prsline. Ono polazi od pretpostavke da je materijal oko prsline dovoljno homogen, što znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno preneti na odgovarajuću konstrukciju. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , [4.20], je rađeno u cilju određivanja kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odnosno ocene ponašanja eksploatisanog i novog materijala u prisustvu greške tipa prsline, kao najopasnije od svih grešaka u konstrukcijskim materijalima. Samo ispitivanje je rađeno na sobnoj temperaturi od 20°C.

Za određivanje K_{Ic} na sobnoj temperaturi korišćene su standardne Šarpi epruvete, odnosno epruvete za savijanje u tri tačke (SEB) čija geometrija je definisana standardom ASTM E 399 [4.10] i BS 7448 Part I [4.17] i data je na sl. 5.5.

Na osnovu standarda BS 7448 Part I [4.17], prvo se pristupilo pripremanju epruvete, odnosno stvaranju zamorne prsline. Da bi se stvorili uslovi ravnog stanja deformacije potrebna je zamorna prsline. Određivanje maksimalne sile početka zamaranja za SEB epruvetu, odnosno nazivne granične sile, F_L , je definisano izrazom:

$$F_L = \frac{B \cdot b^2 \cdot R_T}{2 \cdot L} \quad (5.6)$$

gde je: B - širina SEB epruvete, mm
 b - dužina ligamenta, mm
 L - raspon između oslonaca, mm, i
 R_T - efektivni napon tečenja, MPa, koji se određuje po formuli

$$R_T = \frac{R_{p0,2} + R_m}{2} \quad (5.7)$$

gde je: $R_{p0,2}$ - granica tečenja, MPa, i
 R_m - zatezna čvrstoća, MPa.

Oko 50% završne dužine zamorne prsline je izvedeno pri maksimalnoj sili zamaranja $F_{max} = 0,4 \cdot F_L$. U oba slučaja je minimalna sila bila $F_{min} = 0,1 \cdot F_{max}$. Na visokofrekventnom pulzatoru "AMSLER", sl. 5.10, vršeno je stvaranje zamorne prsline kod SEB epruveta.



Slika 5.10. Stvaranje zamorne prsline na visokofrekventnom pulzatoru kod SEB epruvete.

Karakteristike ovog uređaja su:

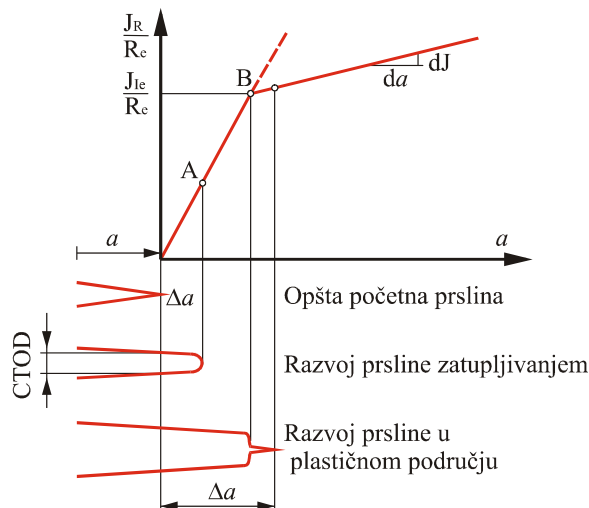
- može da ostvari sinusoidalno jednosmerno promenljivo opterećenje u opsegu od -100 do 100 kN.

- srednje opterećenje i amplituda opterećenja je registrovana sa tačnošću ± 50 N.
- ostvarena učestanost se kretala od 110 do 130 Hz što je u direktnoj zavisnosti od tipa epruvete, nivoa srednjeg opterećenja i veličine amplitude opterećenja.

Pošto zahtev za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (5.8)$$

nije zadovoljen, umesto primene linearno elastične mehanike loma (LEML) definisane standardom ASTM E399 [4.10], pristupilo se korišćenju elasto plastične mehanike loma (EPML) definisane standardima ASTM E813 [4.12], ASTM E1820 [4.16] i BS 7448 Part I [4.17]. Osnovni cilj korišćenja elasto plastične mehanike loma je da se vrednost kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odredi posredno preko kritičnog J integrala, J_{Ic} , odnosno da se prati razvoj prsline u uslovima izražene plastičnosti. Promena ponašanja elasto plastičnog materijala u koji spadaju i opšti konstrukcioni čelici (eksploatisani materijal i novi materijal), pri stabilnom rastu prsline može da se opiše dijagramom J- Δa , gde je Δa priraštaj prsline, sl. 5.11.



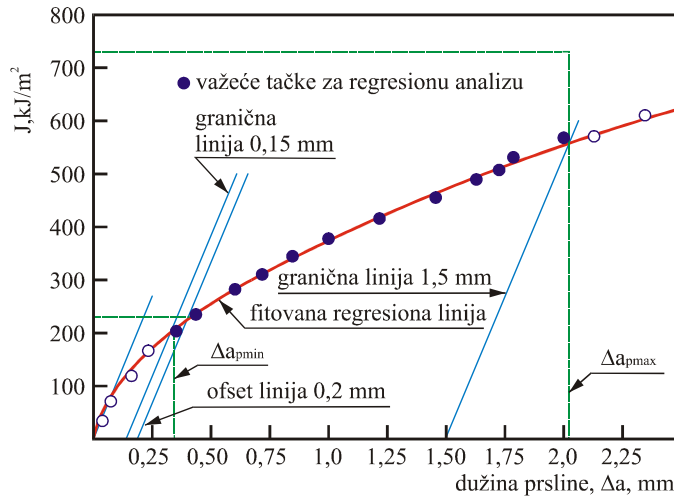
Slika 5.11. Šematski prikaz zavisnosti J- Δa pri stabilnom razvoju prsline [4.12].

Kada se materijal ponaša plastično, u početnoj fazi porasta sile i utroška energije, deformacija se iskazuje samo povećanjem otvora postojeće prsline, a ne i napredovanjem prsline. Ovo odgovara vrlo strmoj liniji zavisnosti J- Δa , i predstavlja fazu zatupljivanja vrha prsline. U kritičnoj tački dolazi do promene nagiba krive zavisnosti, što znači da je dalje otvaranje prsline povezano sa napredovanjem prsline i porastom njene dužine. Tačka pregiba u početnoj fazi se uzima kao J_{Ic} , pa se na osnovu te vrednosti može odrediti kritični faktor intenziteta napona K_{Ic} .

Standardni postupak dobijanja krivih otpornosti metalnih materijala prema razvoju prsline ustanovilo je Američko društvo za ispitivanje materijala (ASTM). U okviru evropskog društva za integritet i vek konstrukcije ESIS [5.7] rađeno je na unapređenju ovoga standarda. Pojedina rešenja ovog standarda su prihvaćena i u ovom radu, a odnose se na određivanje fitovane regresione linije. Potreban uslov za debljinu epruvete je:

$$B > 25 \frac{J_{Ic}}{R_T} \quad (5.9)$$

gde je: J_{Ic} - kritična vrednost J integrala, sl. 5.12.



Slika 5.12. Prikaz postupka za izbor merodavnih tačaka za određivanje J_{Ic} prema preporukama ESIS. [5.7]

Debljina epruvete može se proveriti tek posle ispitivanja. Takođe važi i ograničenje za dužinu početnog ligamenta, b , odnosno:

$$b = W - a_0, \quad b > \frac{25J_{Ic}}{R_{p0,2}} \quad (5.10)$$

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

Naredno ograničenje se odnosi na stvarnu dužinu prsline pri ovom ispitivanju. Prvo se određuje linija zatupljivanja, koja predstavlja zakonitost promene J integrala kada se pri deformaciji ne povećava dužina prsline, već se njen vrh zatupljuje kao posledica otvaranja vrha prsline (CTOD - crack tip opening displacement). Prividno povećanje dužine prsline za taj slučaj je jednako polovini CTOD. To prividno povećanje dužine prsline Δa definiše liniju zatupljivanja:

$$\Delta d_B = \frac{J}{R_e} \quad (5.11)$$

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

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

$$\frac{dJ}{da} < R_{p0,2} \quad (5.12)$$

Nova linija na preseku sa 0,2 mm ofset linijom definiše J_{Ic} , sl. 5.12. Prema tome, cilj ovoga eksperimenta je određivanje kritične vrednosti J integrala, J_{Ic} , a postupak ispitivanja se ogleda u dobijanju R-krive, odnosno $J - \Delta a$ krive, koja se sastoji od vrednosti J integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa . Dobijeni rezultati su dati u tački 6.4.

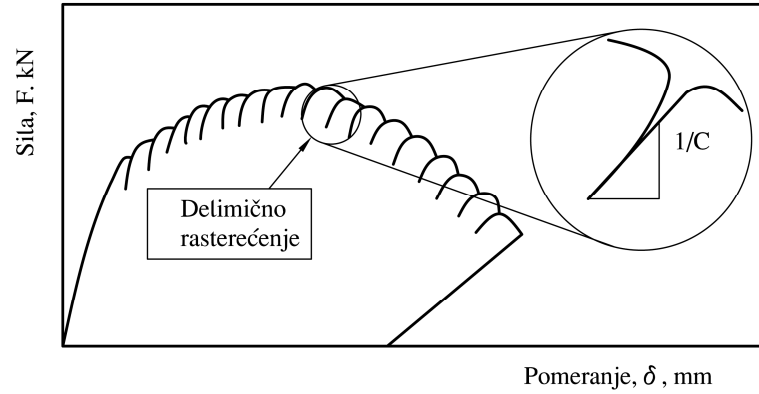
Eksperimenti su izvođeni metodom ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti jedne epruvete, kako je to definisano standardom ASTM E813 [4.12]. Osnovni cilj metode popustljivosti sa rasterećenjem je, da se registruje veličina razvoja prsline, Δa , koja nastaje tokom ispitivanja. Ispitivanje epruveta sa vrhom zamorne prsline u eksploatisanom i novom materijalu, vršeno je na sobnoj temperaturi od 20°C, na elektromehaničkoj kidalici, sl. 5.13.



Slika 5.13. Izgled postupka ispitivanja SEB epruvete.

Pri ispitivanju na sobnoj temperaturi epruveta je bila opremljena COD ekstenzometrom radi registrovanja otvaranja vrha prsline. Opterećenje se uvodilo sa povremenim rasterećivanjima do trenutka velikih plastičnih deformacija ili loma epruvete, odnosno izlaska iz opsega merenja ekstenzometra. A/D konvertorom su se prikupljali podaci o opterećenju i otvaranju vrha prsline, za sve vreme ispitivanja.

Na krivoj sila F - otvaranje vrha prsline δ , sl. 5.14, uočljiva rasterećenja služe za određivanje popustljivosti ispitivane epruvete pri trenutnoj dužini prsline a ($a = a_0 + a_z$).

Slika 5.14. Kriva sila F - otvaranje vrha prsline δ .

Na osnovu popustljivosti, koja je predstavljena odnosom priraštaja sile F i priraštaja otvaranja vrha prsline δ na liniji rasterećenja, moguće je odrediti dužinu prsline preko izraza:

$$\Delta a_i = \Delta a_{i-1} + \left(\frac{b_{i-1}}{\eta_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{C_{i-1}} \right) \quad (5.13)$$

gde je: a_{i-1} - prethodna dužina prsline,
 $C_i = \text{tg}\alpha_i$ - nagib posmatrane linije rasterećenja,
 $C_{i-1} = \text{tg}\alpha_{i-1}$ - nagib prethodne linije rasterećenja,
 $\eta_{i-1} = 2$ - koeficijent za SEB epruvete.

Površina ispod krive sila - otvaranje vrha prsline predstavlja energiju odnosno J integral. J - Integral se izražava u kJ/m^2 i jednak je zbiru elastične komponente J_{el} integrala i plastične komponente J_{pl} integrala [1.5]:

$$J_{(i)} = J_{el} + J_{pl} \quad (5.14)$$

Za SEB epruvete elastična komponenta J_{el} integrala, odnosno energije se računa na osnovu izraza [5.30]:

$$J_{el(i)} = \frac{K_i^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \quad (5.15)$$

gde je: K_i - faktor intenziteta napona, definisan standardom BS 7448 Part I [4.17];;
 ν - Poasonov koeficijent; $\nu = 0,3$
 E - modul elastičnosti $E=210 \text{ GPa}$

Faktor intenziteta napona K_i za SEB epruvete se izračunava na osnovu izraza:

$$K_i = \frac{F_i \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \cdot f(a_0/W) \quad (5.16)$$

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

$$f(a_0/W) = \frac{3(a_0/W)^{1/2} \left[1.99 - (a_0/W)(1 - a_0/W) \cdot \left(2.15 - 3.93(a_0/W) + 2.7(a_0/W)^2 \right) \right]}{2(1 + 2a_0/W)(1 - a_0/W)^{3/2}} \quad (5.17)$$

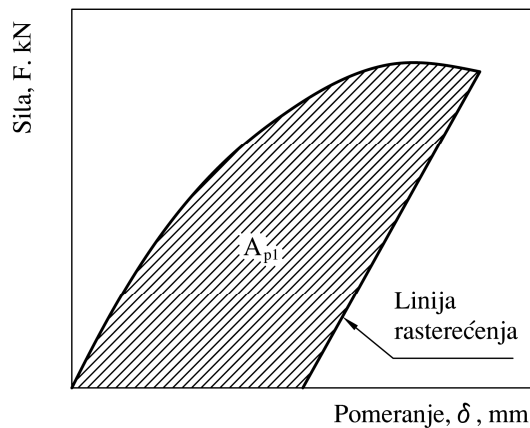
Plastična komponenta J_{pl} , odnosno energije se računa na osnovu izraza [1.7]:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_i}{b_i} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \times \left[1 - \gamma_i \frac{(a_i - a_{i-1})}{b_i} \right] \quad (5.18)$$

gde je: A_{pl} - plastična komponenta energije, sl. 5.15,
 B_N - neto širina epruvete,
 $\eta_i = 2$ - koeficijent za SEB epruvete,
 $\gamma_i = 1$ - za SEB epruvete.

Plastična komponenta energije $A_{pl(i)}$ izračunava se na osnovu podataka dobijenih sa dijagrama F- δ

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[F_i + F_{i-1}] \cdot [\delta_{pl(i)} - \delta_{pl(i-1)}]}{2} \quad (5.19)$$



Slika 5.15. Plastična komponenta energije.

Iz dobijenih regresionih linija za eksploatisani i novi materijal dobija se kritični J integral, J_{Ic} (tačka 6.4.), na osnovu koga se izračunava vrednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću izraza:

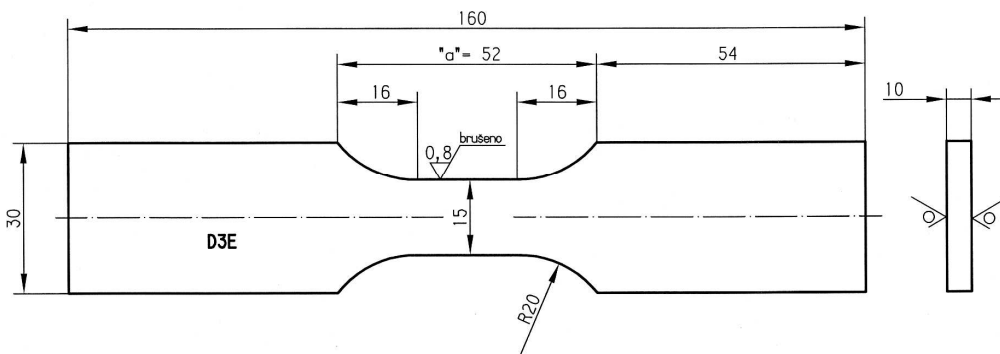
$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (5.20)$$

Izračunate vrednosti su date u tački 6.4.

5.6. Ispitivanja promenljivim opterećenjem

Ispitivanje eksploatisanog i novog materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja, rađeno je u cilju dobijanja konstruisanja Velerove krive i određivanja trajne dinamičke čvrstoće S_f . Epruvete su izrađene prema standardu ASTM E466 [5.6], i date su na sl. 5.16. Ispitivanje je urađeno na sobnoj temperaturi, a na visokofrekventnom pulzatoru "AMSLER" koji ima opseg jednosmernog, sinusoidalno promenljivog opterećenja od -100 kN do +100 kN, slika 5.17.

Srednje opterećenje i amplituda opterećenja registrovana su sa tačnošću $\pm 50\text{N}$. Ostvarena učestanost se kretala od 160-190 Hz, u zavisnosti od veličine opterećenja i odnosa minimalnog i maksimalnog opterećenja (odnos R). Pri nivou opterećenja nižim od napona tečenja, karakterističnom za visokociklični zamor, najčešće se ispitivanje izvodi u krutom režimu, odnosno pri zadatoj amplitudi napona S_a , MPa. Najbolje je da ciklus opterećenja simulira uslove rada konstrukcije, ali se praktično koriste uprošteni oblici ciklusa opterećenja. U cilju potpunije ocene ponašanja materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja, a imajući u vidu debljinu epruvete, najčešće se koristi najkritičniji slučaj, slučaj naizmjenično promenljivog opterećenja, čija šema je prikazana na sl. 5.18.

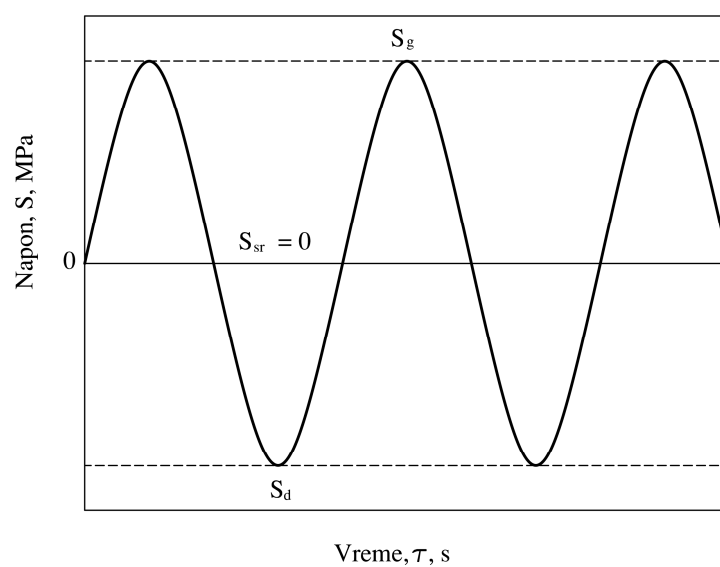


Slika 5.16. Epruveta za dinamička ispitivanja [5.6].

Uticaj vremena eksploatacije na vrednosti trajne dinamičke čvrstoće S_f , je prikazan grafički u obliku Velerovih krivih (S-N dijagrami) u tački 6.5. za epruvete izrađene iz eksploatisanog i novog materijala.



Slika 5.17. Visokofrekventni pulzator AMSLER.

Slika 5.18. Šema naizmenično promenljivog opterećenja. $R = -1$.

5.7. Određivanje parametara rasta zamorne prsline

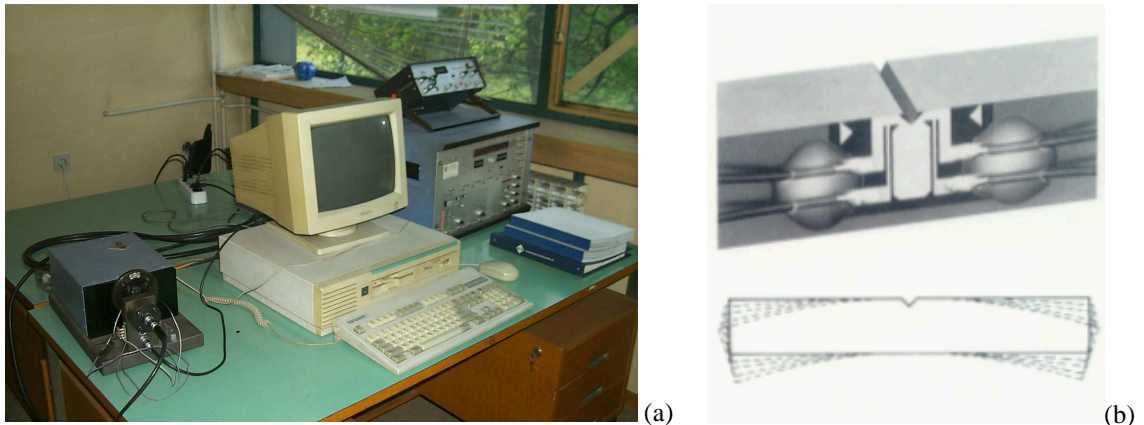
Ukupni vek korišćenja neke konstrukcije izražava se u godinama njenog rada. U praksi on se često izražava u broju ciklusa N_u . Glavna prednost, koju je mehanika loma uvela u oblasti zamora materijala je u računskom rasčlanjivanju fenomena loma usled zamora na period stvaranja (inicijacija), u kome zamorna prslina nastaje, i na period rasta ili širenja (propagacija), koji mu sledi i u kome se nastala prslina povećava do kritične veličine pri kojoj dolazi do naglog loma. Na taj način se ukupan broj ciklusa, N_u , posle koga dolazi do loma, deli na broj ciklusa potrebnih da zamorna prslina nastane, N_f , (inicijacija), i broj ciklusa da ona poraste do kritične veličine za lom, N_p , (propagacija), odnosno $N_u = N_f + N_p$.

Razvoj u proučavanju ponašanja materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja je omogućen paralelnim uvođenjem eksperimentalnog i teorijskog pristupa, jer samo teorijski pristup ne može da potpuno objasni nastanak i rast zamorne prsline. Analiza stanja napona i deformacija na vrhu rastuće zamorne prsline postupcima linearno elastične mehanike loma (LEML) je dovela do formulisanja Parisove jednačine za sve metale i legure, koja dovodi u vezu brzinu rasta zamorne prsline sa opsegom faktora intenziteta napona na vrhu prsline.

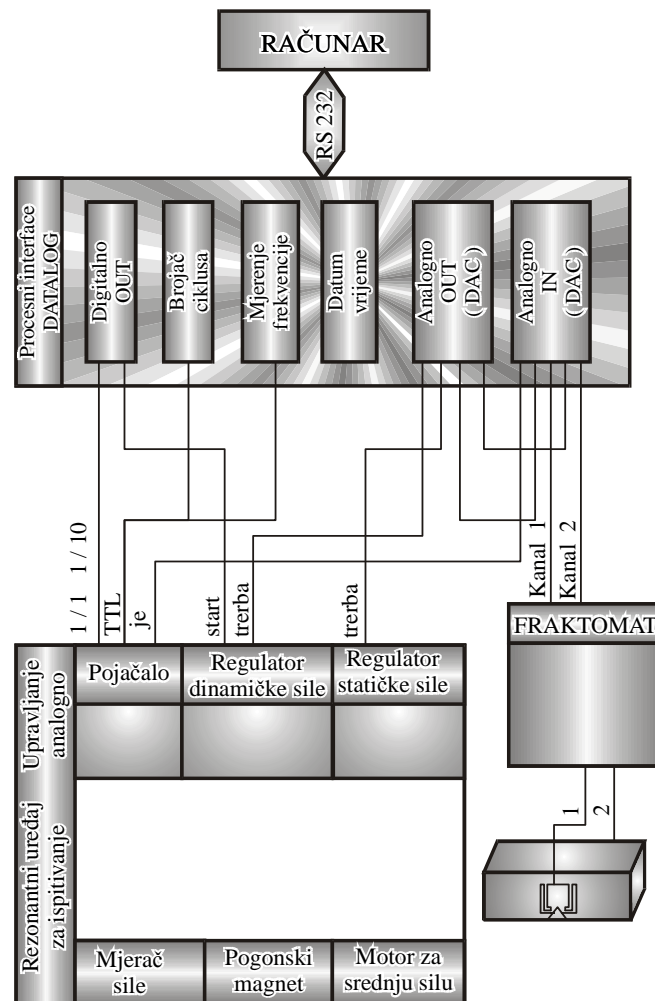
Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora, i visokih brzina (K_{Ic}) veliki linearni srednji deo krive (sl. 4.8.) pokriven Parisovom relacijom, se sa praktične tačke gledanja pokazao daleko najvažnijim, jer istovremeno dopušta da se napravi razlika između inicijacije i rasta zamorne prsline. Primena Parisove jednačine se pokazala naročito plodonosnom u području zamora konstrukcija izrađenih od materijala povišene i visoke čvrstoće.

Iz oštih koncentratora napona će u uslovima promenljivog opterećenja posle određenog broja ciklusa doći do inicijacije prsline i do njenog rasta ako je prekoračen prag zamora ΔK_{th} . Kako konstrukcija pod određenim uslovima neće biti ugrožena dok prslina ne dostigne kritičnu veličinu, može se, uz prethodne analize, dopustiti eksploatacija konstrukcije sa prslinom i u periodu rasta prsline. Bitan podatak za odluku o daljoj eksploataciji je poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od delujućeg opterećenja. Standard ASTM E647 [5.9] propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline da/dN , koja se razvija iz postojeće prsline i proračun opsega faktora intenziteta napona, ΔK . To znači da epruveta treba da ima zamornu prslinu. Dva su bitna ograničenja u standardu ASTM E647: brzina rasta mora da je veća od 10^{-8} m/ciklus da bi se izbeglo područje praga zamora, ΔK_{th} , a opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

Ispitivanje na sobnoj temperaturi u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na standardnim Šarpi epruvetama metodom savijanja epruvete u tri tačke na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru, sl. 5.19. Samo ispitivanje je rađeno u kontroli sile. Ovaj pulzator ostvaruje sinusoidalno jednosmerno promenljivo momentno opterećenje u opsegu od -70 do 70 Nm. Uređaj je povezan sa računarom, štampačem i pisačem, čime se omogućava automatizacija merenja i direktno prikupljanje i obrada dobijenih podataka. Principijelna šema ovakve veze je prikazana na sl. 5.20, [5.10].



Slika 5.19. Savremeni sistem za dinamička ispitivanja.

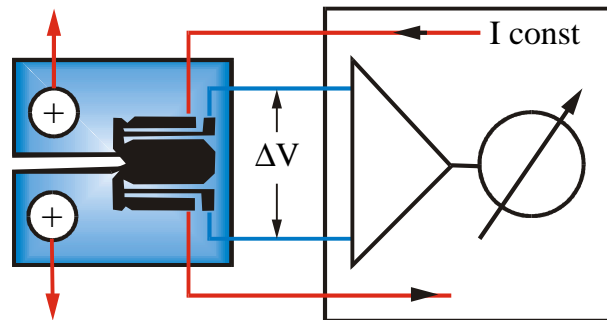


Slika 5.20. Šematski prikaz savremenog sistema za dinamička ispitivanja [5.10].

Karakteristike obavljenog ispitivanja su:

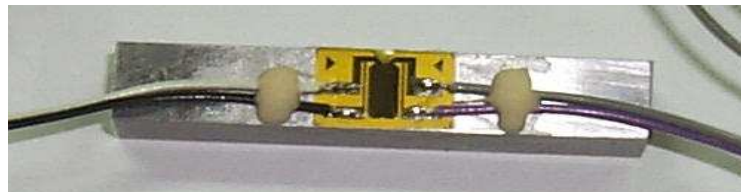
- odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja $R = -1$,
- opseg ostvarene učestalosti se kretao od 163 do 185 Hz u zavisnosti veličine opterećenja,
- srednje opterećenje i njegova amplituda je registrovana sa tačnošću ± 3 Ncm.

Na mehanički pripremljene epruvete su zalepljene merne trake - folije pomoću kojih je praćen priraštaj prsline. Za ispitivanje su korištene merne folije RMF A-5 merne dužine 5 mm. Za praćenje rasta prsline pomoću merne folije, korišćen je uređaj za registrovanje priraštaja prsline FRACTOMAT [5.11]. Sistem za merenje priraštaja prsline, FRACTOMAT i merna folija su bazirani da registruju promenu električnog otpora merne folije. Pošto zamorna prslina raste ispod merne folije, merna folija puca prateći vrh zamorne prsline i obezbeđuje promenu otpora folije, koji varira linearno sa promenom dužine prsline. Na sl. 5.21, je prikazana šema rada sistema za merenje priraštaja prsline FRACTOMAT-merna folija.



Slika 5.21. Šema merne folije i načina registrovanja rasta prsline [5.11].

Izgled pripremljene epruvete za određivanje parametara rasta zamorne prsline je dat na sl. 5.22.



Slika 5.22. Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline.

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

Opseg faktora intenziteta napona ΔK , se određuje po formuli,

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad (5.21)$$

gde je: L - raspon oslonaca, mm,
 B - debljina epruvete, mm,
 W - širina (visina) epruvete, mm,
 a - dužina prsline, mm.

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

$$f(a/W) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \quad (5.22)$$

Izračunate vrednosti date su u tački 6.6.

5.8. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor (MCZ)

Zamor je pojava postepenog razaranja materijala mašinskog dela izloženog delovanju promenljivog opterećenja. Akumulacija oštećenja u vidu obrazovanja i rasta mikropora predstavlja prvu fazu razaranja, koja se završava kada se spajanjem mikropora obrazuju prsline. Širenje prsline, koje se završava lomom, predstavlja drugu fazu razaranja [5.12]. Prsline obrazovane pri broju ciklusa $N < 10^4$ (10^5) rezultat su malocikličnog zamora [5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18].

Malociklični zamor (MCZ) [5.13] je relativno nov problem, uzrokovan cikličnim plastičnim deformacijama. Razaranje nastaje za manje od (10^5) ciklusa. Kod gasnih turbina je MCZ uzrokovan termičkim naponima indukovanim temperaturnim gradijentima. Tipičan primer je temperaturni gradijent turbinskih diskova. Obod diska je topliji od glavčine. Rast i pad temperature izaziva naizmenično zatezanje i pritisak i razaranje usled MCZ.

Kada se radi o problemima mehanike loma [5.14] i same procene preostalog veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prsline dati su detalji za analitičko određivanje faktora intenziteta napona (FIN). Pored analitičkih izraza za analitičko određivanje FIN data su i teorijska razmatranja, sa različitim zakonima širenja prsline, kao i metode njihovog rešavanja. Numeričke metode za analize širenja prsline su uključile probleme sa cikličnim opterećenjima konstantne amplitude i spektrom opterećenja.

Prikaz oštećenja materijala u konstrukcijama [5.15] opterećenih promenljivim opterećenjem, daje detaljnu analizu prognoze njihovog rada i šta treba činiti da bi se sprečile eventualne havarije konstrukcija. Sve ovo je ilustrovano sa brojnim praktičnim primerima.

Metode ispitivanja na zamor konstrukcija [5.16], pokazuju efekte projektovanja i uticaja tehnoloških i operativnih faktora na izdržljivost raznih mašinskih delova i konstrukcija. Metode za izračunavanje izdržljivosti i pouzdanosti na zamor ilustruju primeri iz inženjerske prakse Osnove proračuna na malociklični zamor su nadalje iskorišćene i prikazane u ovom radu.

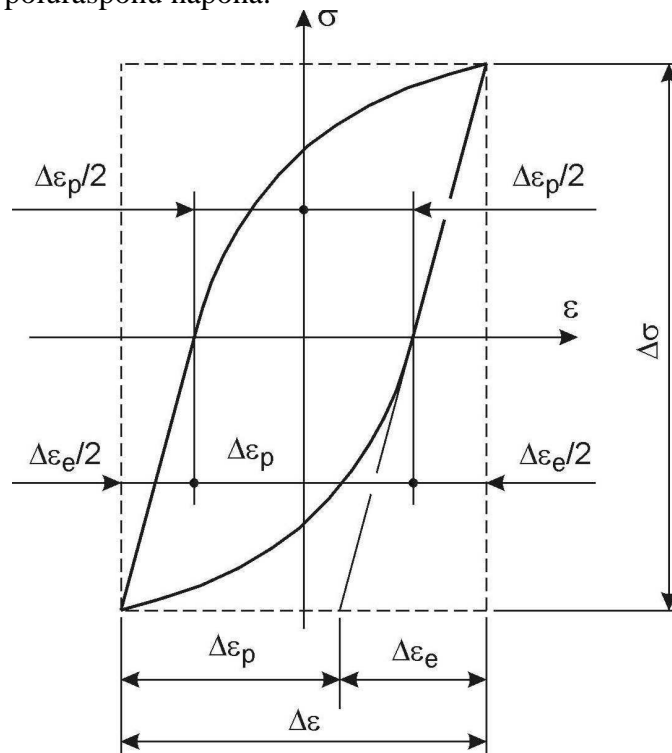
Teorija malocikličnog zamora [5.17], prikazuje istoriju razvoja ove naučne discipline. Sprovedena su ispitivanja na zamor gde su sa standardnim epruvetama određene malociklične zamorne karakteristike materijala. Za tu svrhu su detaljno prikazani kako standardi tako metode ispitivanja i obrade eksperimentalnih rezultata.

Fundamentalni principi teorije malocikličnog zamora [5.18], gde su detaljno obrazložene razlike između teorije malocikličnog i višecikličnog zamora. Ovde je takođe prikazana i teorija višecikličnog zamora. Posebno je analiziran uticaj pojedinih nivoa stepenastog spektra opterećenja na ukupno oštećenje koje se javlja u kritičnim elementima konstrukcija.

5.8.1. Osvrt na ponašanje materijala pri malocikličnom zamaranju

Ponašanje materijala pri malocikličnom zamaranju ispituje se eksperimentalno. U tu svrhu koriste se glatke epruvete, koje se na više nivoa regulisanih deformacija, sa faktorom asimetrije $R\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max} = -1$, na sobnim, povišenim ili sniženim temperaturama, izlažu malocikličnom zamaranju [5.19].

Naponsko deformacioni odziv pri malocikličnom zamaranju oblika je idealizovane histerezisne petlje [5.19, 5.14] prikazane na sl. 5.23. Raspon deformacija $\Delta\varepsilon$ odgovara ukupnoj širini petlje, a raspon napona $\Delta\sigma$ odgovara njenoj ukupnoj visini. Amplituda napona jednaka je polurasponu napona.



Slika 5.23. Idealizovana histerezisna petlja [5.19].

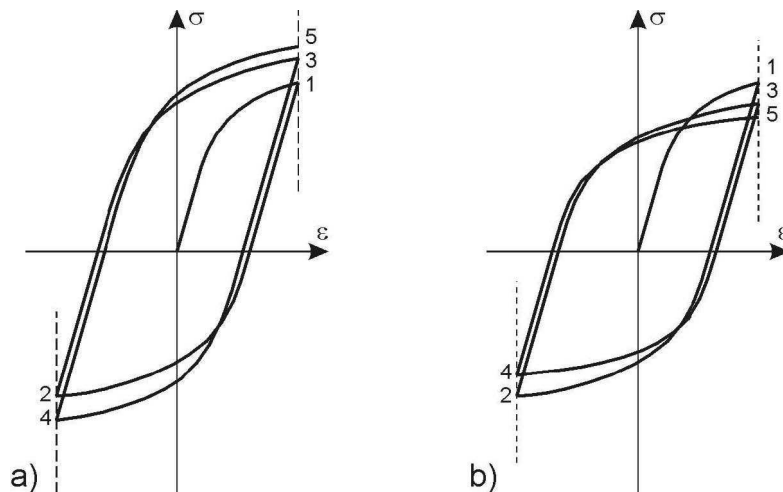
Raspon deformacija ili ukupna deformacija $\Delta\varepsilon$ jednaka je zbiru ukupne elastične, $\Delta\varepsilon_e$ i ukupne plastične deformacije, $\Delta\varepsilon_p$. Uvođenjem amplituda deformacija izraženih preko odgovarajućih poluraspona dolazi se do jednačine

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (5.23)$$

Materijali u uslovima malocikličnog zamaranja mogu da:

- ciklično ojačavaju,
- ciklično slabe i
- ciklično ojačavaju i ciklično slabe u navedenom ili obrnutom redosledu.

Šematski prikaz cikličnog ojačavanja i cikličnog slabljenja [5.14, 5.15, 5.20] dat je na sl.5.24.



Slika 5.24. Šematski prikaz cikličnog ojačavanja (a) i cikličnog slabljenja materijala (b) [5.20].

Teorijska analiza raznolikog ponašanja materijala izloženih malocikličnom zamaranju zasnovana je na sledećim pretpostavkama [5.19]:

- otvorenost petlje histereze je mala i zanemaruje se,
- plastične deformacije ne menjaju elastične konstante materijala,
- deo ciklusa $N = 0,25$ do tačke 1 na sl. 5.24. zanemaruje se,
- promene srednjih vrednosti napona i deformacija su takođe male i zanemaruju se.

Većina materijala pri malocikličnom zamaranju na određenom nivou regulisane deformacije, postiže uslovno nazvano stabilizovano stanje. Visina histerezisne petlje izražena preko raspona napona neznatno se menja. Histerezu za ciklus N_s , u oblasti stabilizacije, koji je blizak ili jednak polovini broja ciklusa do iniciranja prsline N_r , zovemo stabilizovanim histerezom [5.14, 5.15, 5.17, 5.18]. Ona je predstavnik svih histereza i služi za opisivanje kompletnog procesa malocikličnog zamaranja.

5.8.2. Ciklična naponsko deformaciona kriva i kriva stabilizovanih histereza

Ciklična naponsko deformaciona kriva predstavlja zavisnost amplitude napona $\Delta\sigma/2$ od amplitude ukupne deformacije $\Delta\varepsilon/2$. Za definisanje ove krive koriste se eksperimentalno određene stabilizovane histereze.

Amplituda ukupne deformacije $\Delta\varepsilon/2$, prema (5.23), jednaka je zbiru elastične $\Delta\varepsilon_e/2$ i plastične komponente $\Delta\varepsilon_p/2$. Elastična komponenta se primenom Hookeovog zakona može izraziti u obliku

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} \quad (5.24)$$

gde je E modul elastičnosti.

Veza između amplitude napona $\Delta\sigma/2$ i amplitude plastične deformacije $\Delta\varepsilon_p/2$ definisana je stepenom funkcijom [5.14, 5.15, 5.20]

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (5.25)$$

iz koje se inverzijom dobija izraz

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5.26)$$

gde su:

K' - koeficijent ciklične čvrstoće i

n' - eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja.

Sabiranjem izraza (5.24.) i (5.26.) na osnovu (5.23), dobija se jednačina ciklične naponsko deformacione krive [5.19, 5.14, 5.15, 5.20, 5.21]

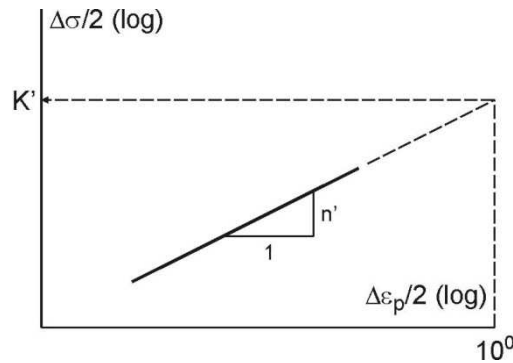
$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5.27)$$

Stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije (5.25), u log - log koordinatnom sistemu se linearizuje, odnosno transformiše u jednačinu prave

$$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \log K' \quad (5.28)$$

u čijem se eksperimentalno određenom obliku uočava vrednost eksponenta cikličnog deformacionog ojačavanja n' , dok se do koeficijenta ciklične čvrstoće K' dolazi inverzijom.

Linearizovana stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije sa ilustrovanim značenjem eksponenta n' i koeficijenta K' , prikazana je na sl. 5.25.



Slika 5.25. Linearizovana stepena funkcije amplituda napona - amplituda plastične deformacije.

Prema približno tačnoj hipotezi Masinga [5.14, 5.22], množenjem sa 2 obeju strana ciklične naponsko deformacione krive (5.27.) dobija se jednačina krive stabilizovanih histereza (Masing - ove krive) u $\Delta\varepsilon - \Delta\sigma$ sistemu.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5.29)$$

Sa ovom krivom moguće je modelirati grane stabilizovanih histereza, kojima se definiše naposko deformacioni odziv u kritičnoj tački konkretnog mašinskog dela izloženog malocikličnom zamaranju. Ovo ima opravdanja iz tog razloga, što će se po ovom približnom postupku obrađivati histereze i radnih i kritičnih stanja, što neće bitno uticati na ocenu radne sposobnosti.

5.8.3. Osnovna kriva i modifikovane krive malocikličnog zamora

Osnovna kriva malocikličnog zamora predstavlja zavisnost amplitude ukupne deformacije $\Delta\varepsilon/2$ od broja ciklusa do iniciranja prsline N_f i kao u [5.19] može se napisati da je

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varphi(N_f) \quad (5.30)$$

Podlogu za definisanje osnovne krive malocikličnog zamora, kao i u slučaju ciklične naponsko deformacione krive, čine eksperimentalno određene stabilizovane histereze.

Elastična i plastična komponenta ukupne amplitudne deformacije (5.23) takođe zavise od broja ciklusa do iniciranja prsline.

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \varphi_1(N_f) \qquad \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varphi_2(N_f) \qquad (5.31)$$

Basquin je još 1910. godine [5.14] uočio da se u oblasti vremenski ograničene izdržljivosti klasična Wöhlerova kriva u log - log koordinatnom sistemu, može linearizovati pomoću izraza (Basquinove jednačine)

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = \sigma_f' \cdot N_f^b \qquad (5.32)$$

gde su:

$\Delta \sigma / 2$ - Amplituda napona pri čistom naizmenično promenljivo opterećenju,

σ_f' - koeficijent zamorne čvrstoće,

N_f - broj ciklusa do iniciranja prsline,

b - eksponent zamorne čvrstoće (Basquinov eksponent).

Ako se (5.32.) unese u (5.24), dobiće se da je

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N_f^b \qquad (5.33)$$

što predstavlja konačan oblik zavisnosti $\Delta \varepsilon_e / 2 = \varphi_1(N_f)$ u (5.31).

Manson i Coffin su radeći nezavisno, predložili empirijsku funkciju u stepenom obliku [5.28, 5.29].

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' \cdot N_f^c \qquad (5.34)$$

Ova funkcija, poznata kao Manson - Coffinova jednačina, predstavlja konačan oblik zavisnosti $\Delta \varepsilon_p / 2 = \varphi_2(N_f)$ u (5.31.). U njoj se pored već poznatog, razlikuju:

ε_f' - koeficijent zamorne duktilnosti

c - eksponent zamorne duktilnosti.

Ako se na osnovu (5.23) izvrši sabiranje (5.33) i (5.34) dobiće se jednačina osnovne krive malociklusnog zamora [5.14, 5.15, 5.20, 5.21]

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c \quad (5.35)$$

kojom je predstavljen konačan oblik zavisnosti $\Delta \varepsilon / 2 = \varphi(N_f)$.

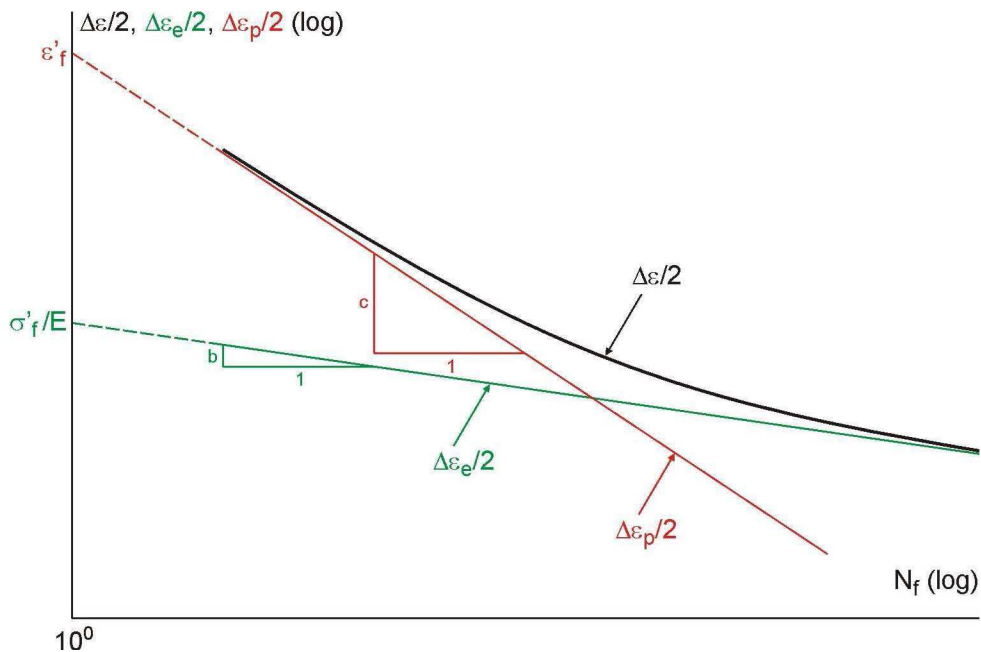
Elastična (5.33) i plastična komponenta (5.34) ukupne amplitudne deformacije, u log - log koordinatnim sistemima se linearizuju - transformišu u jednačine pravih

$$\log \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma_f'}{E} \quad (5.36)$$

$$\log \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \varepsilon_f' \quad (5.37)$$

iz čijih se eksperimentalno određenih oblika određuju nepoznati koeficijenti i eksponenti potrebni za definisanje jednačine osnovne krive malocikličnog zamora (tačka 6.7).

Na sl. 5.26. predstavljena je osnovna kriva malocikličnog zamora, sa delovima koji se odnose na elastičnu $\Delta \varepsilon_e / 2$ i plastičnu $\Delta \varepsilon_p / 2$ komponentu. Na toj slici su ilustrovana značenja eksponenta i koeficijenta potrebnih za definisanje osnovne krive malocikličnog zamora (5.35).

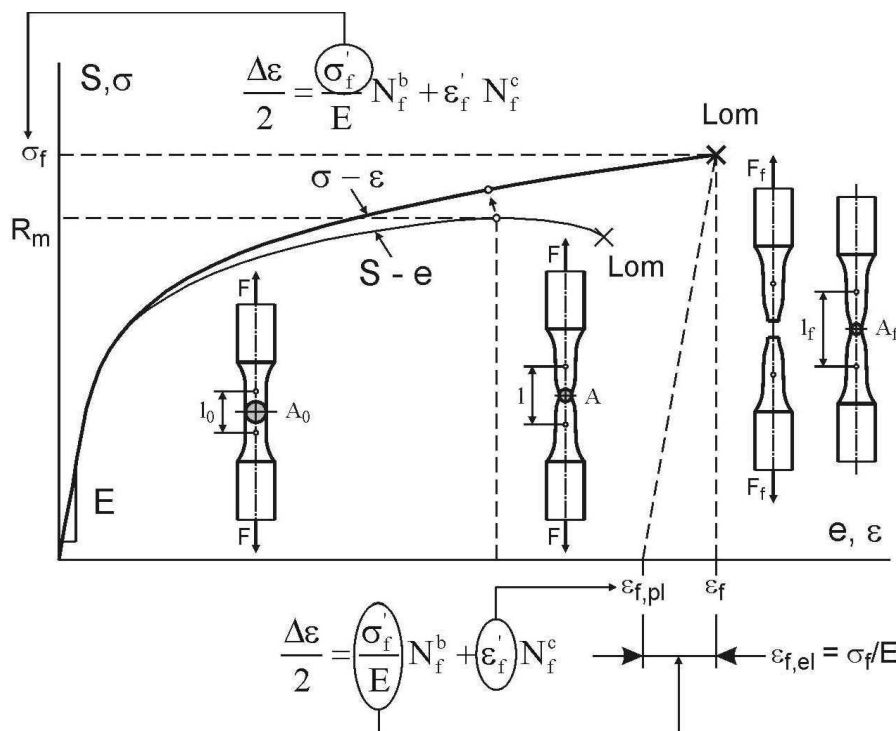


Slika 5.26. Osnovna kriva malocikličnog zamora prikazana zajedno sa elastičnom i plastičnom komponentom.

Koeficijenti zamorne čvrstoće i zamorne duktilnosti $\sigma_f', \varepsilon_f'$ u (5.35) koji se mogu odrediti pomoću eksperimentalno dobijenih jednačina (5.36) i (5.37) za $N = 1$

(doslednije za $N = 1/4$), približno su prema [5.19, 5.20] jednaki naponu loma σ_f i plastičnoj deformaciji loma $\varepsilon_{f,pl}$.

Prema [5.14] se koeficijent zamorne duktilnosti ε_f' približno izjednačava sa deformacijom loma ε_f što se može opravdati činjenicom da je elastična deformacija loma $\varepsilon_{f,el} = \frac{\sigma_f}{E}$ kod duktilnih materijala zanemarivo mala u odnosu na deformaciju loma $\varepsilon_f = \ln(A_0/A_f)$. Naponi i deformacije opisuju pravu monotonu naponsko deformacionu krivu $\sigma - \varepsilon$ koja je na sl. 5.27. šematski upoređena sa inženjerskom monotonom naponsko deformacionom krivom $S - \varepsilon$ ($S = F/A_0$).



Slika 5.27. Prava monotona naponsko deformaciona kriva ($\sigma - \varepsilon$) i inženjerska monotona naponsko deformaciona kriva ($S - \varepsilon$) [5.14].

U praktičnim proračunima radnog veka delova izloženih malocikličnom zamaranju koriste se modifikovane krive malocikličnog zamora, kojima se uzima u obzir uticaj srednjih napona. U literaturi se kao poznate ističu:

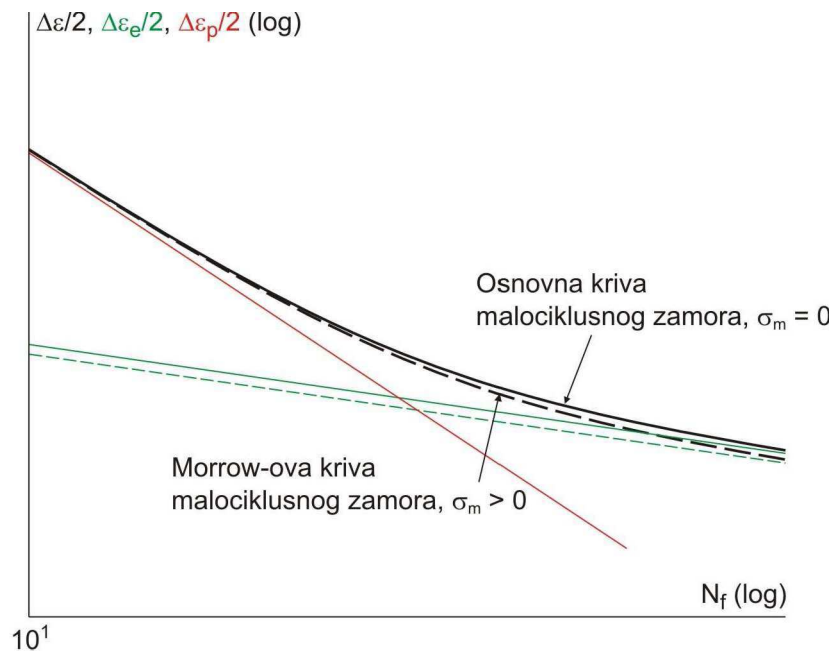
- Morrowova,
- Manson - Hallfordova i
- Smith – Watson - Topperova kriva malocikličnog zamora.

Morrow - ova kriva

Jednačina Morrow - ove krive malocikličnog zamora je oblika [5.14, 5.23, 5.24, 5.25]

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c \quad (5.38)$$

Razlika ove krive i osnovne krive je u tome, što se uzimajući u obzir srednji napon σ_m , modifikuje samo elastična komponenta ukupne amplitudne deformacije. Morrow - ova kriva malocikličnog zamora za slučaj pozitivnog srednjeg napona, upoređena sa osnovnom krivom, prikazana je na sl. 5.28.



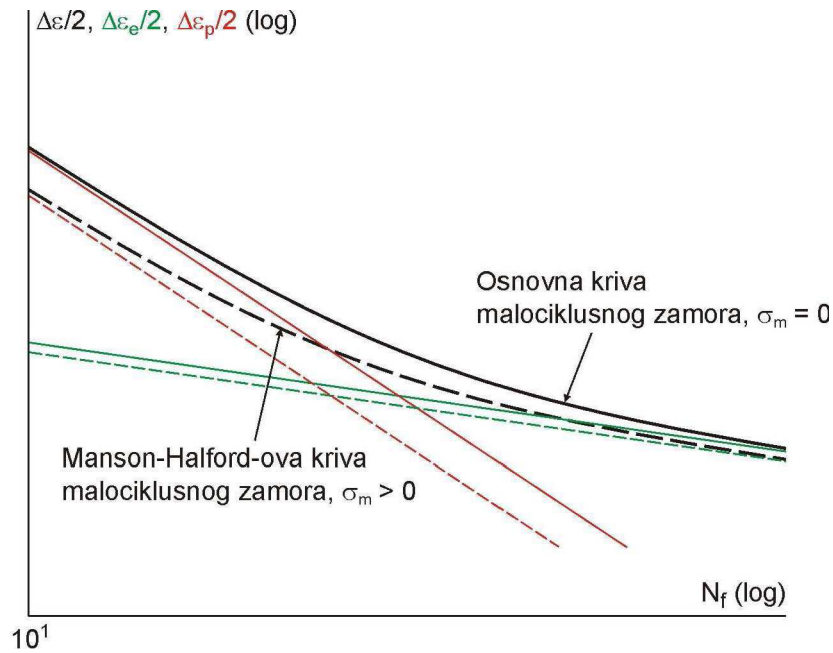
Slika 5.28. Morrow - ova kriva malocikličnog zamora za $\sigma_m > 0$ upoređena sa osnovnom krivom.

Manson - Halfordova kriva

U jednačini Manson - Halford-ove krive malocikličnog zamora [5.14, 5.24, 5.25, 5.26]

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} N_f^b + \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_f'} \right)^{\frac{c}{b}} \varepsilon_f' N_f^c \quad (5.39)$$

modifikovane su obe komponente ukupne amplitudne deformacije (sl. 5.29).



Slika 5.29. Manson - Halfordova kriva malocikličnog zamora za $\sigma_m > 0$ upoređena sa osnovnom krivom.

Smith - Watson - Topper - ova kriva

U jednačini Smith - Watson - Topperove krive malocikličnog zamora [5.14, 5.18, 5.21, 5.24, 5.27]

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_{\max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} E} = \sqrt{(\sigma_f')^2 (N_f)^{2b} + E \sigma_f' \varepsilon_f' (N_f)^{b+c}} \quad (5.40)$$

uticaj srednjih napna uzima se u obzir preko

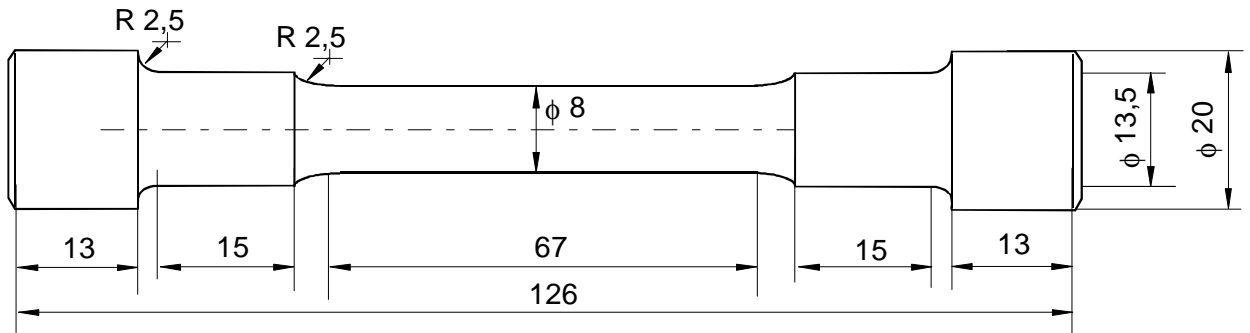
$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \frac{\Delta \sigma}{2} \quad (5.41)$$

Oznaka P_{SWT} u (5.40) odnosi se na Smith - Watson - Topperov parametar predstavljen kao geometrijska sredina maksimalnog σ_{\max} i stvarnog idealno elastičnog napona ($\Delta \varepsilon / 2E$).

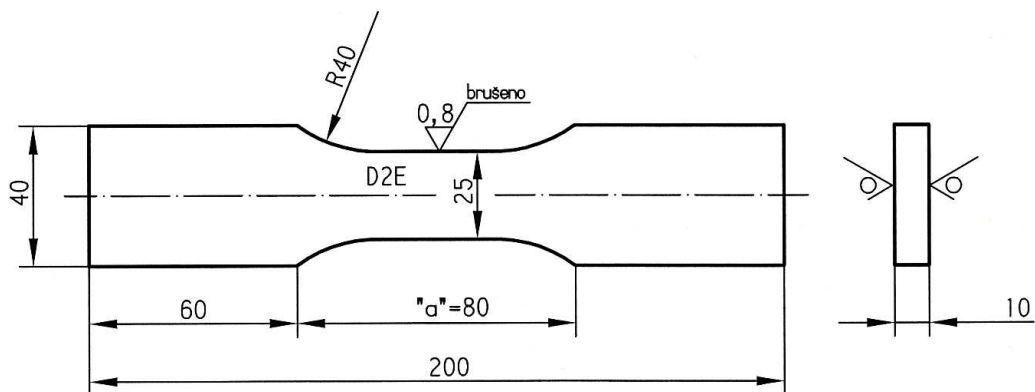
5.8.4. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor

Iz potrebe da se izvrši procena malocikličnog zamornog veka (MCZ) konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa, sprovedeno je ispitivanje otpornosti na malociklični zamor eksploatisanog i novog materijala.

Postupak određivanja karakteristika malocikličnog zamora, kao i geometrija cilindrične glatke epruvete, sl. 5.30, definisani su standardom [5.30]. U nemogućnosti izrade epruveta od eksploatisanog materijala, zbog nedovoljne debljine, vrši se njihova izrada od kraka L profila debljine 10 mm (tabela 5.1.epruveta D2E) i sl. 5.31.



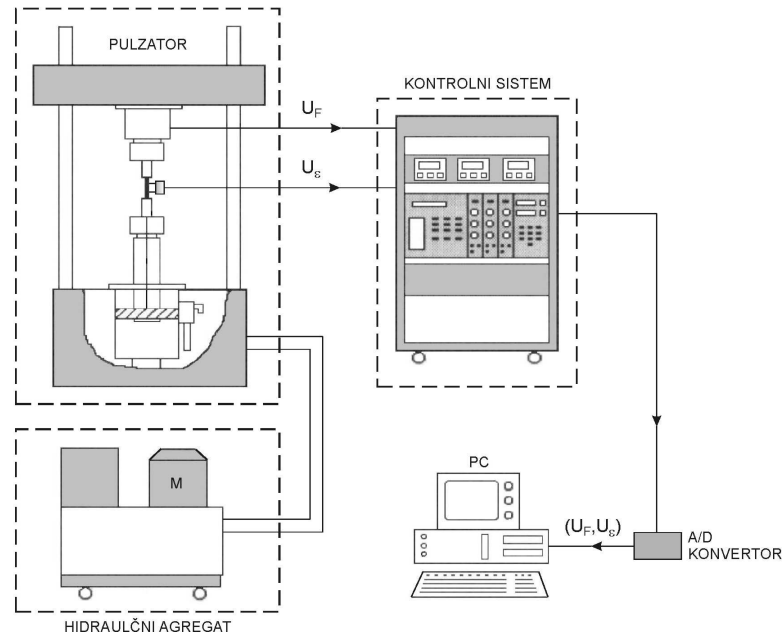
Slika 5.30. Skica cilindrične glatke epruvete za MCZ od novog materijala [5.30].



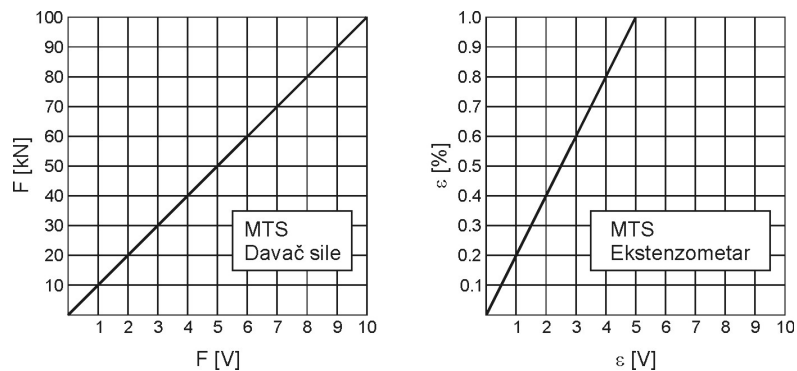
Slika 5.31. Skice epruveta za MCZ od eksploatisanog materijala.

Ispitivanje zamaranjem izvedeno je na univerzalnom MTS sistemu za ispitivanje materijala, šematski prikazanom na sl. 5.32.

Linearne karakteristike korišćenog MTS davača sile i MTS ekstenzometra merne dužine $L_0 = 25$ mm, grafički su predstavljene na sl. 5.33.



Slika 5.32. Blok šema MTS univerzalnog sistema za ispitivanje materijala.



Slika 5.33. Linearne karakteristike MTS davača sile i MTS ekstenzometra.

5.9. Makro i mikrostrukturalna ispitivanja

Mikroispitivanja ispitivanih uzoraka eksploataisanog i novog materijala su izvršena na svetlosnom mikroskopu „Leitz” „ORTHOPLAN” sa mogućnošću uvećanja 1000 x. Za određivanje morfologije prelomljene površine korišćen je Skening elektronski mikroskop (SEM) tipa JEOL JSM-6460LV sa radnim naponom 25kV, Centar za elektronsku mikroskopiju, Univerzitet u Novom Sadu.

Izvršeno je ispitivanje površine preloma uzoraka eksploataisanog i novog materijala i to:

- makrostruktura,
- zatezanje,
- žilavost - Šarpi,
- SN - Velerova kriva,
- malociklični zamor (MCZ) i
- širenje prsline - kompleksna epruveta sa otvorom.

Rezultati mikrostrukturnih ispitivanja dati su u poglavlju 6.8.

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1. Materijal

Hemijski sastav ispitanih epruveta eksploatisanog i novog materijala je dat u tab. 6.1.

Tabela 6.1. Hemijski sastav uzoraka eksploatisanog i novog materijala.

Oznaka uzorka	% mas.										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ti	Mo	Nb	V
EM	0.16	0.19	1.42	0.013	0.007	0,02	0,027	0.015	0.002	0.04	0.006
NM	0.09	0.21	1.50	0.019	0.006	0,06	0,16	0.021	0.005	0.03	0.003

Na osnovu tab. 6.1, 6.3 i standarda SRPS EN 10025-2 [6.1], novi materijal tornja (u daljem tekstu oznaka NM) odgovara čeliku kvaliteta S355JR, a eksploatisani materijal (u daljem tekstu oznaka EM), prema tab. 6.1, 6.2 Američkom čeliku ASTM A572 Grade 50.

6.2. Određivanje zateznih osobina

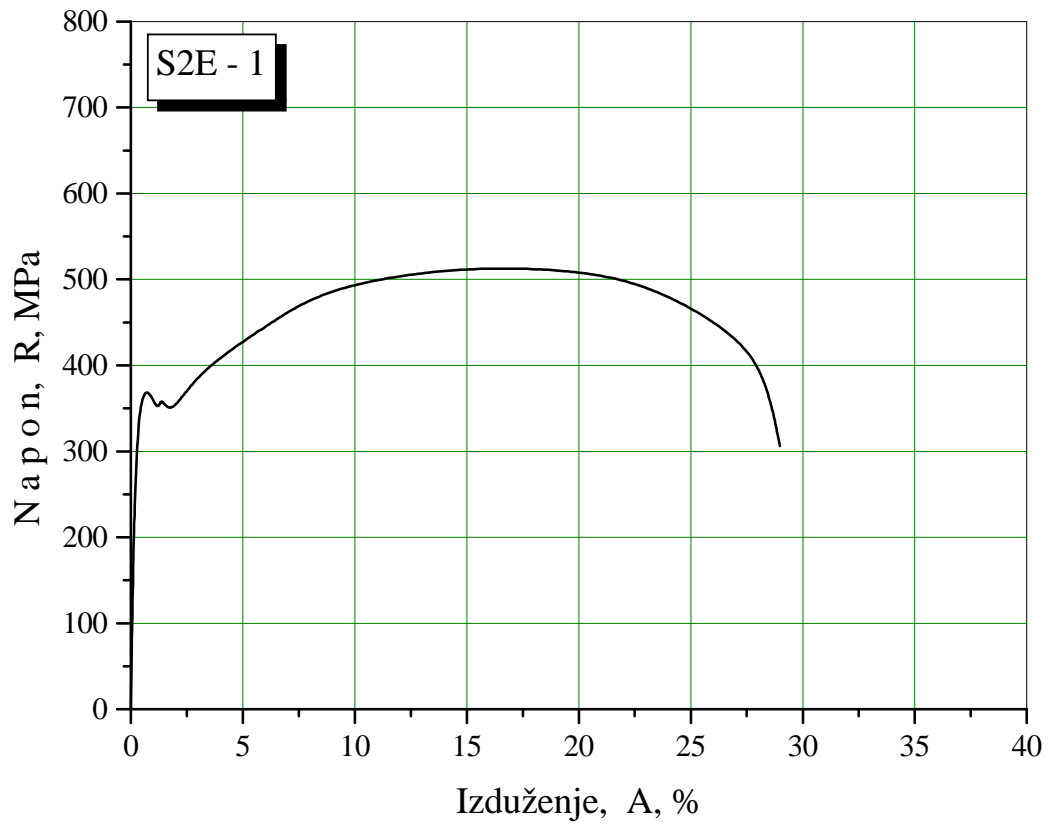
Dobijeni rezultati određivanja zateznih osobina su dati u tab. 6.2 i 6.3. Izgled dijagrama napon - izduženje dobijen ispitivanjem epruvete oznake E - 1 dat je na sl. 6.1, a epruvete oznake N - 1 na sl. 6.2. Dijagrami ispitivanja ostalih epruveta nisu prikazani, jer pokazuju sličan karakter ponašanja materijala, a i rezultati ispitivanja su približno jednaki.

Tabela 6.2. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta eksploatisanog materijala.

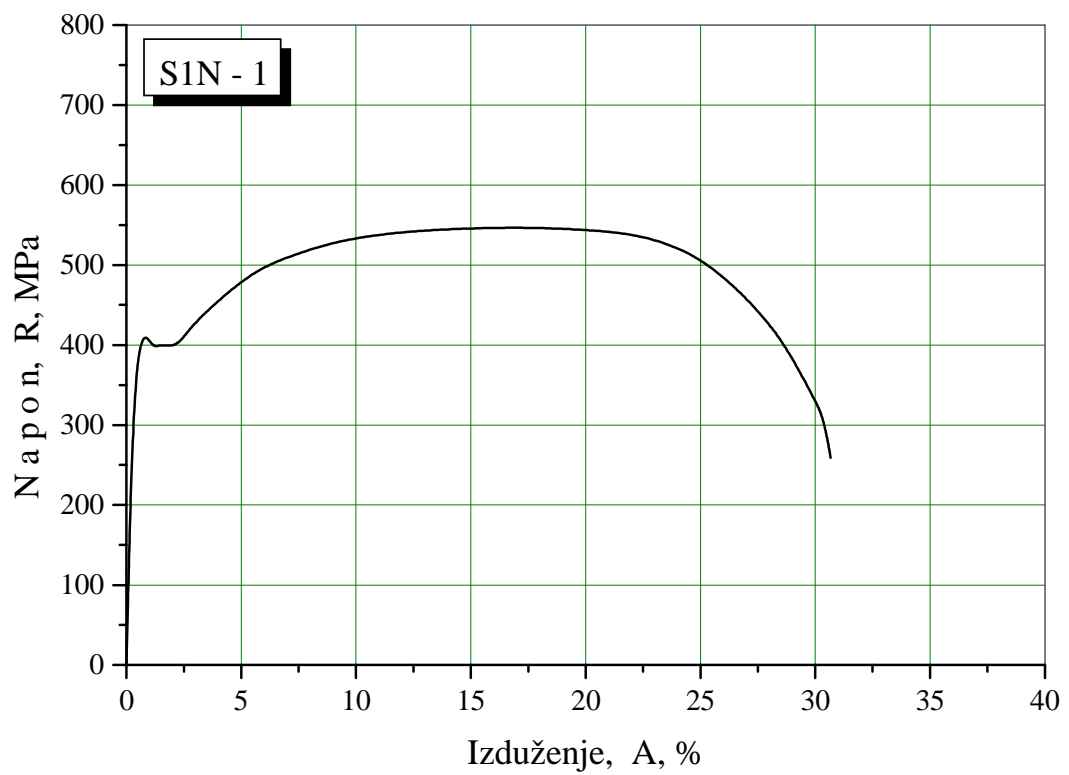
Oznaka uzorka	Temperatura ispitivanja, °C	Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje A, %
Eksploatisani material - EM				
S2E - 1	20	368	514	28.7
S2E - 2		371	515	27.8
S2E - 3		365	507	26.9

Tabela 6.3. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta novog materijala.

Oznaka uzorka	Temperatura ispitivanja, °C	Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje A, %
Novi materijal - NM				
S1N - 1	20	401	548	30.6
S1N - 2		407	553	29.8
S1N - 3		404	550	31.6



Slika 6.1. Dijagram napon - izduženje epruvete E - 1.



Slika 6.2. Dijagram napon - izduženje epruvete N - 1.

Vrednosti granice tečenja eksploatisanog materijala se kreću oko 368 MPa na 20°C, dok je kod novog materijala vrednost napona tečenja oko 405 MPa (tab. 6.3.). Ova razlika je zbog kvaliteta novog materijala u odnosu na eksploatisani materijala.

Zatezna čvrstoća ima isto ponašanje promene kao i napon tečenja. Dobijena vrednost zatezne čvrstoće kod eksploatisanog materijala je oko 512 MPa na 20°C, dok je kod novog materijala oko 550 MPa (tab. 6.3.). Vrednosti izduženja opadaju sa vremenom eksploatacije i kreću se kod novog materijala od 30,0 % na 20°C do 27,8% kod eksploatisanog materijala.

6.3. Udarne ispitivanja

Udarnim ispitivanjem na instrumentiranom klatnu sa osciloskopom, su dobijeni dijagrami sila - vreme i energija - vreme, koji su omogućili analizu uticaja radnih parametara (temperature i vremena eksploatacije) na ukupnu energiju udara A_{uk} , i njene komponente, energiju stvaranja prsline A_I i energiju širenja prsline A_P . Rezultati ispitivanja eksploatisanog i novog materijala su dati u tab. 6.4 i 6.5.

Tabela 6.4. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploatisanom materijalu.

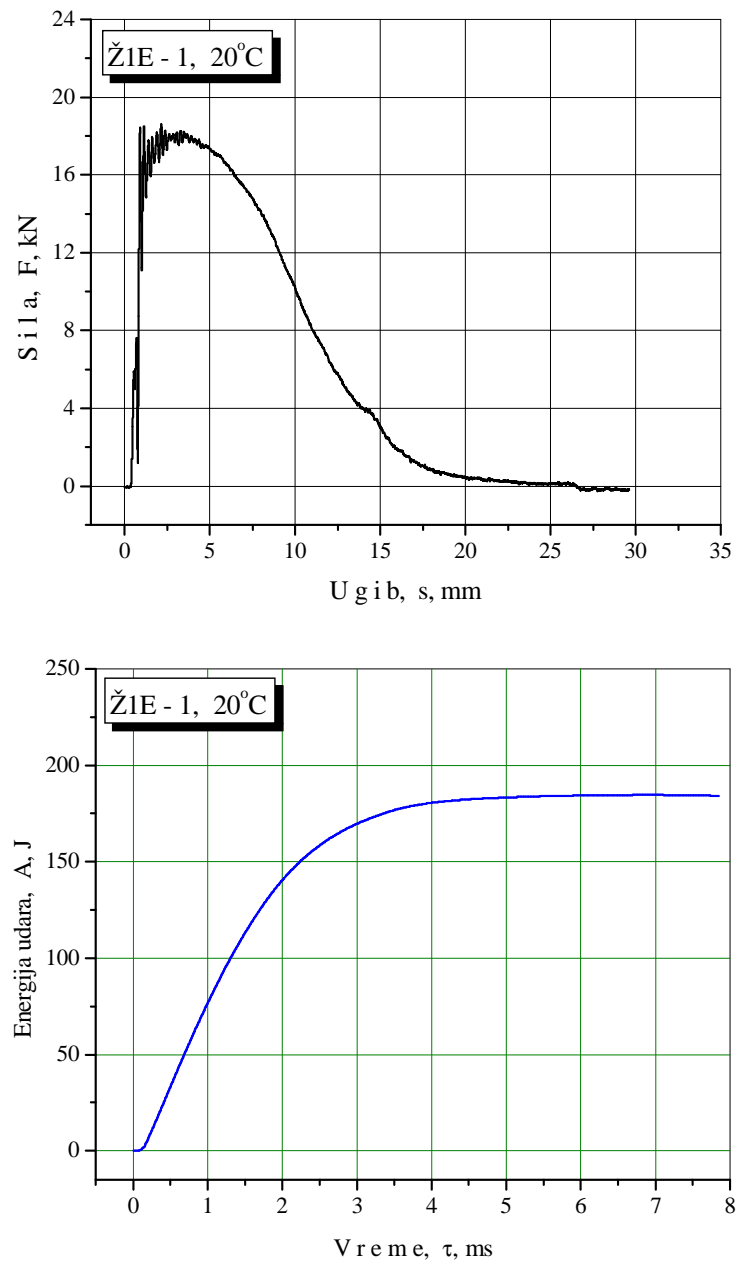
Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J	Ugib s, mm
Ž1E - 1	20	185	47	138	23.5
Ž1E - 2		181	46	135	25.2
Ž1E - 3		177	45	132	24.1
Ž1E - 1	0	144	43	101	21.5
Ž1E - 2		150	45	105	20.6
Ž1E - 3		137	42	95	21.1
Ž1E - 1	-20	77	31	46	17.5
Ž1E - 2		74	31	43	16.6
Ž1E - 3		69	30	39	17.0
Ž1E - 1	-40	31	20	11	8.1
Ž1E - 2		34	20	14	8.0
Ž1E - 3		25	18	7	8.0
Ž1E - 1	-50	14	9	5	4.2
Ž1E - 2		11	8	3	4.1
Ž1E - 3		11	8	3	4.1

Tabela 6.5. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u novom materijalu.

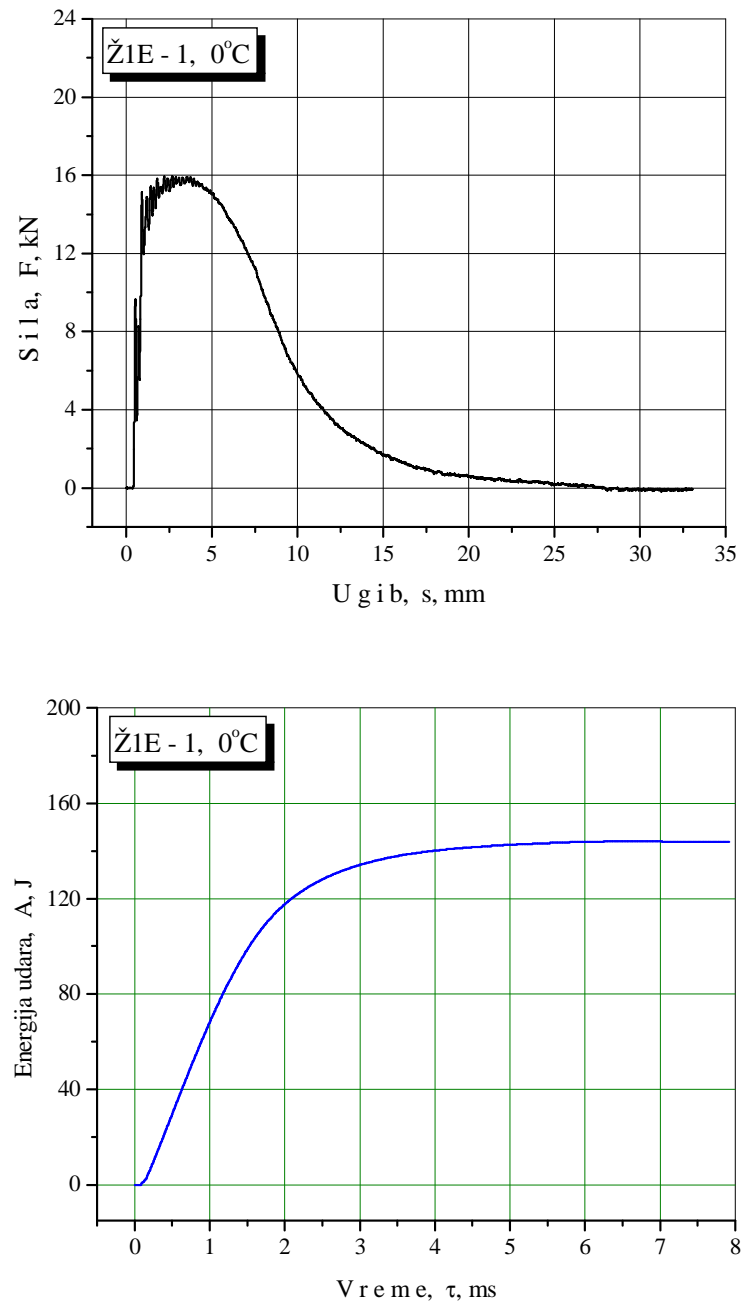
Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J	Ugib s, mm
Ž1N - 1	20	201	56	145	28.1
Ž1N - 2		210	57	153	28.7
Ž1N - 3		205	57	148	28.3
Ž1N - 1	0	178	53	125	27.3
Ž1N - 2		173	52	121	27.1
Ž1N - 3		181	53	128	27.4
Ž1N - 1	-20	99	46	53	20.8
Ž1N - 2		104	48	56	21.1
Ž1N - 3		100	46	54	20.6
Ž1N - 1	-40	46	28	18	13.7
Ž1N - 2		44	27	17	13.9
Ž1N - 3		49	28	21	14.1
Ž1N - 1	-50	24	7	17	8.1
Ž1N - 2		25	7	18	8.0
Ž1N - 3		24	6	18	8.0

Karakteristični dijagrami sila - ugib i energija - vreme, dobijeni udarnim ispitivanjem na sobnoj temperaturi epruvete oznake Ž1E - 1 sa zarezom u eksploatisanom materijalu su dati na sl. 6.3. Respektivno, isti dijagrami dobijeni ispitivanjem na 0°C, -20°C, -40°C, i na -50°C su dati na sl. 6.4. do 6.7.

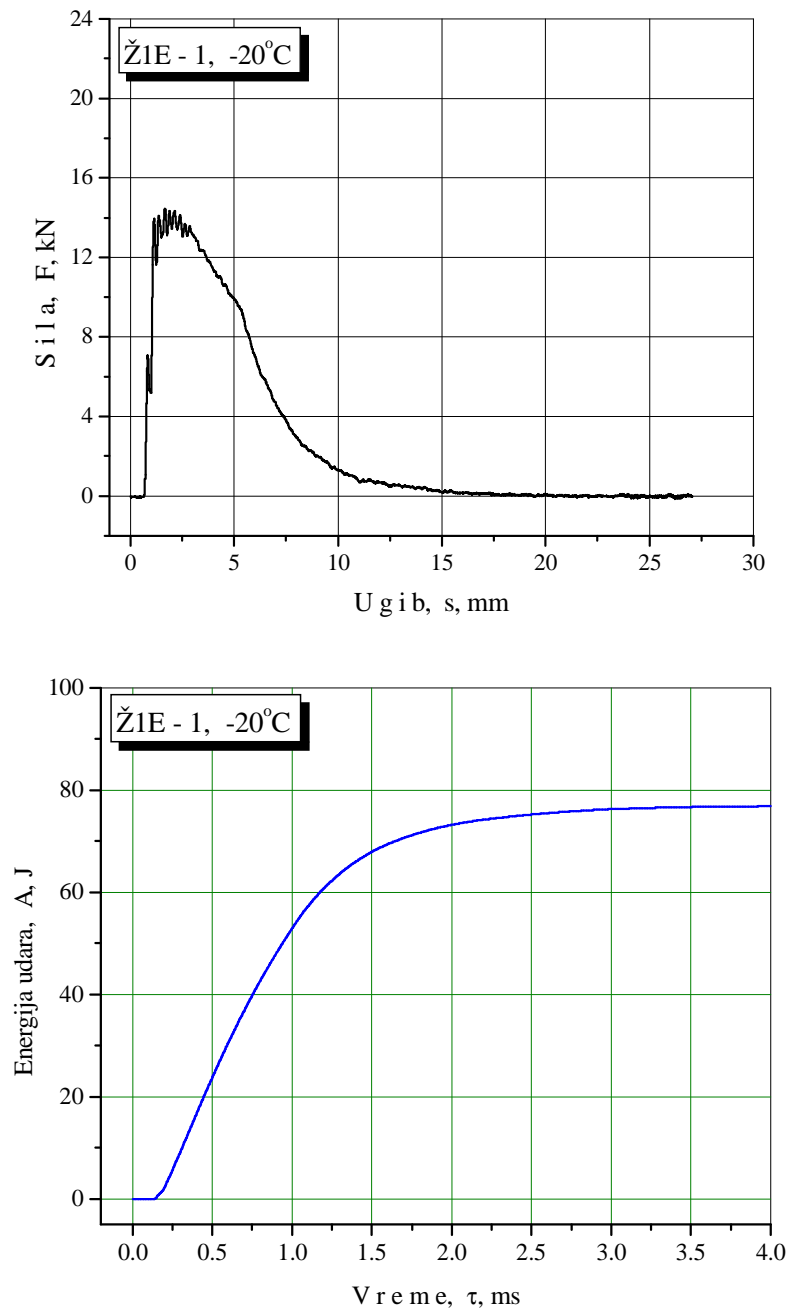
Karakteristični dijagrami sila - ugib i energija - vreme, dobijeni udarnim ispitivanjem na sobnoj temperaturi epruvete oznake Ž1N - 1 sa zarezom u novom materijalu su dati na sl. 6.8. Respektivno, isti dijagrami dobijeni ispitivanjem na 0°C, -20°C, -40°C, i na -50°C su dati na sl.6.9. do 6.12.



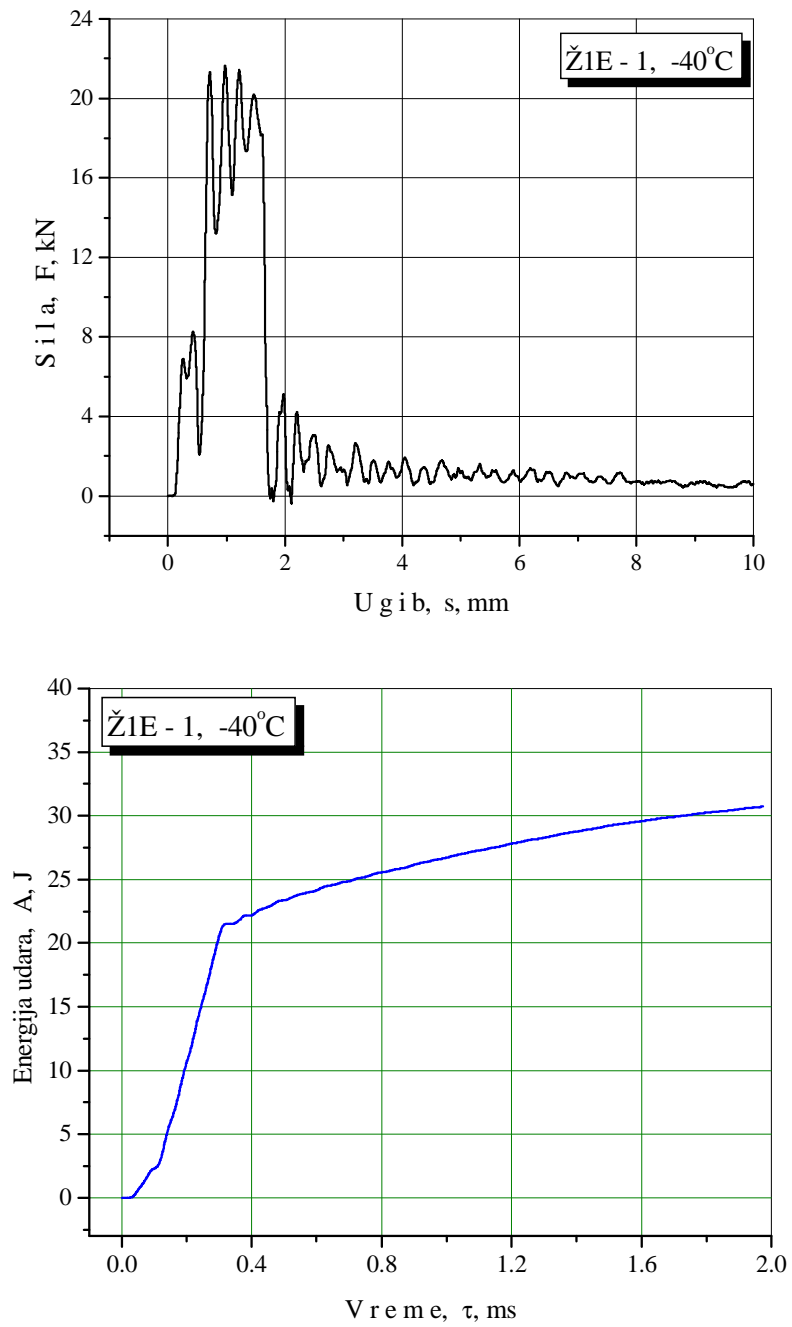
Slika 6.3. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ispitane na sobnoj temperaturi.



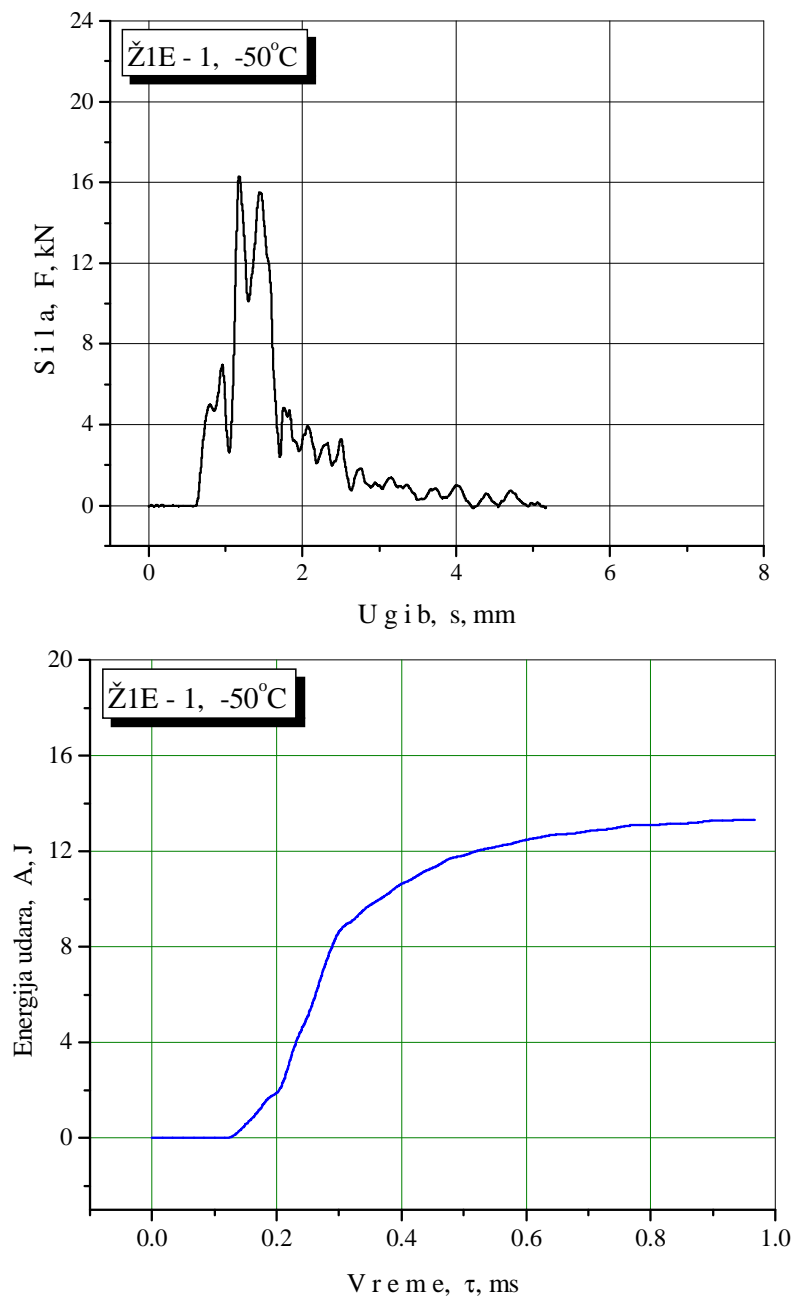
Slika 6.4. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na 0°C.



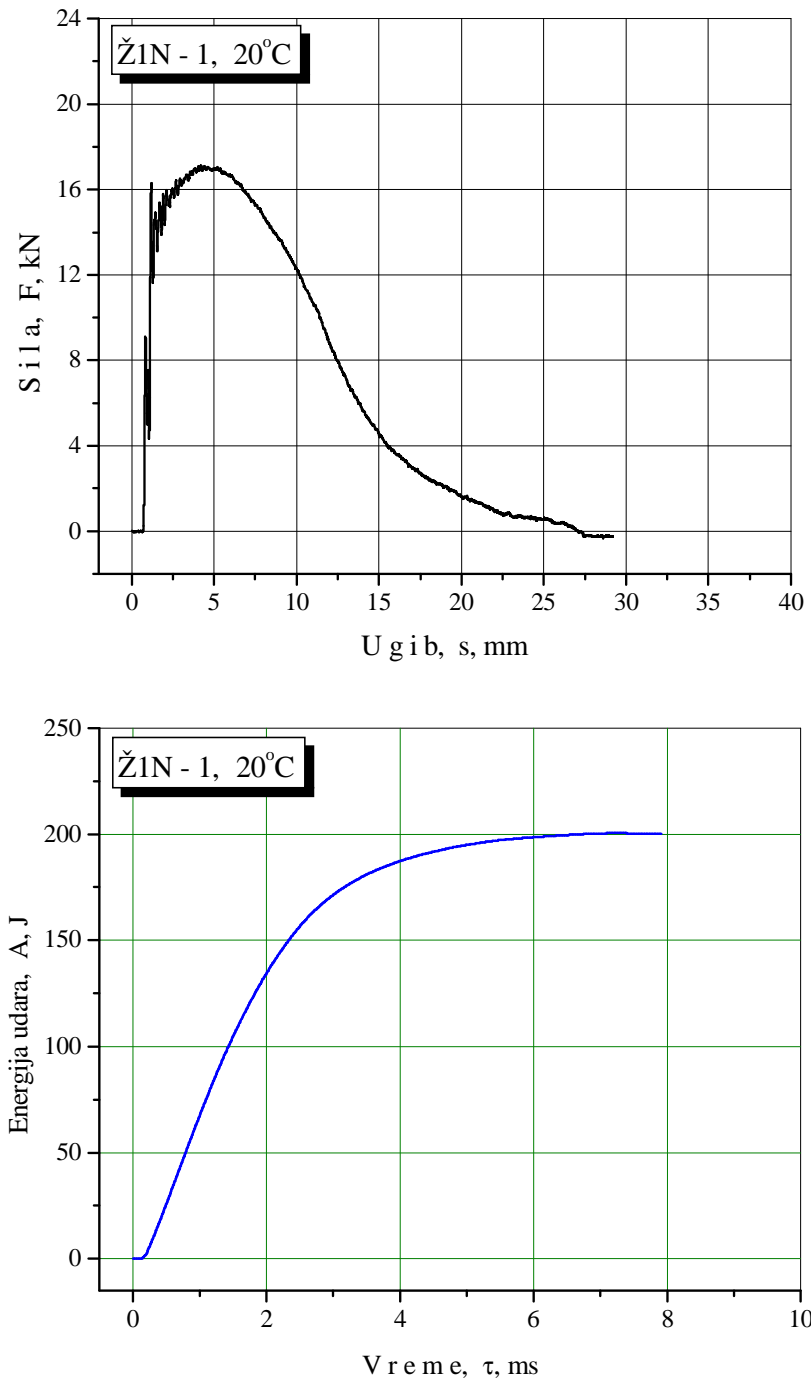
Slika 6.5. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na -20°C .



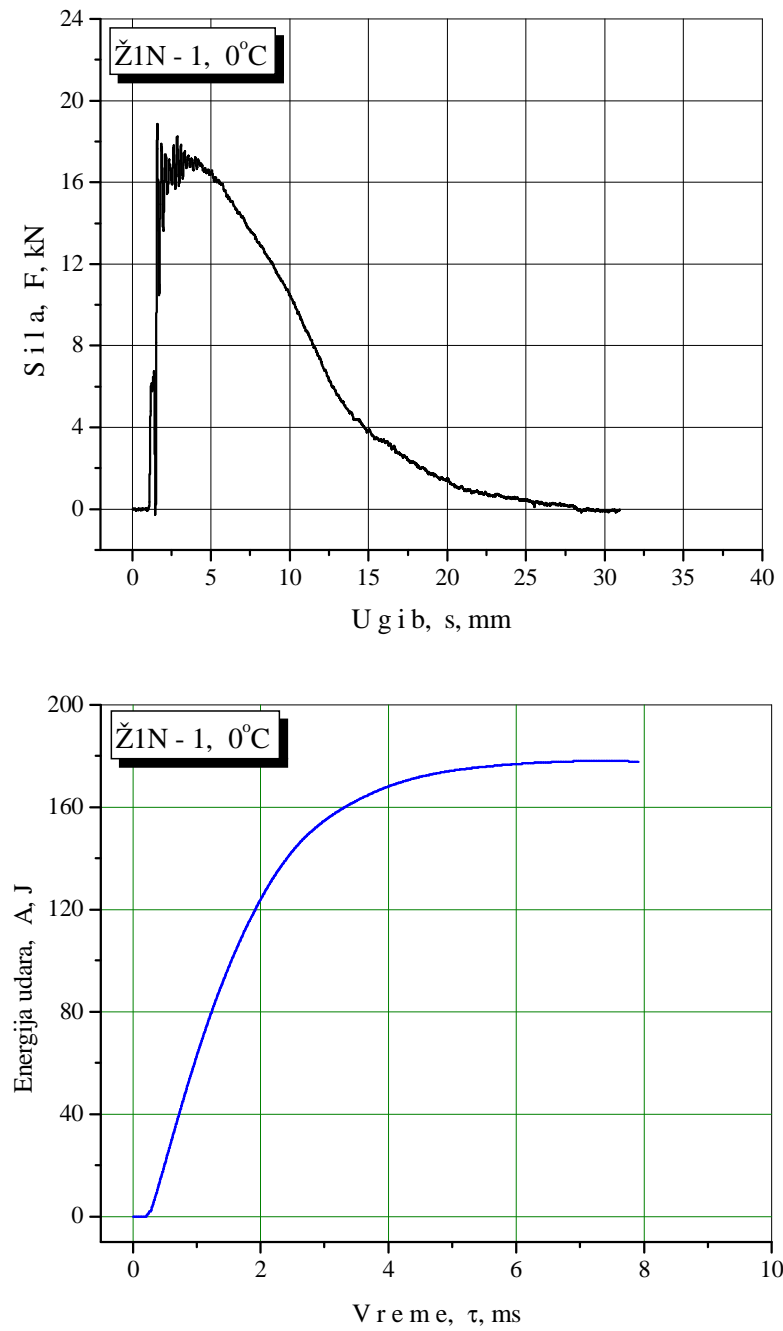
Slika 6.6. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na -40°C.



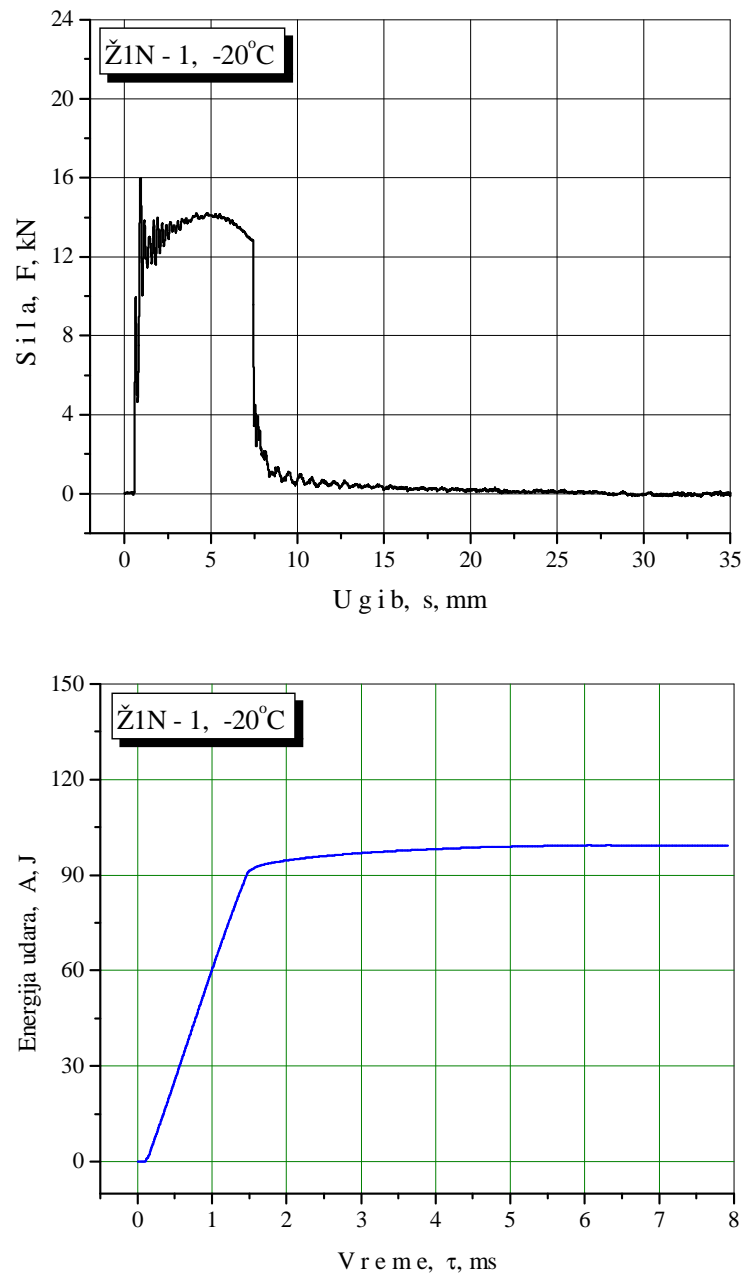
Slika 6.7. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na - 50°C.



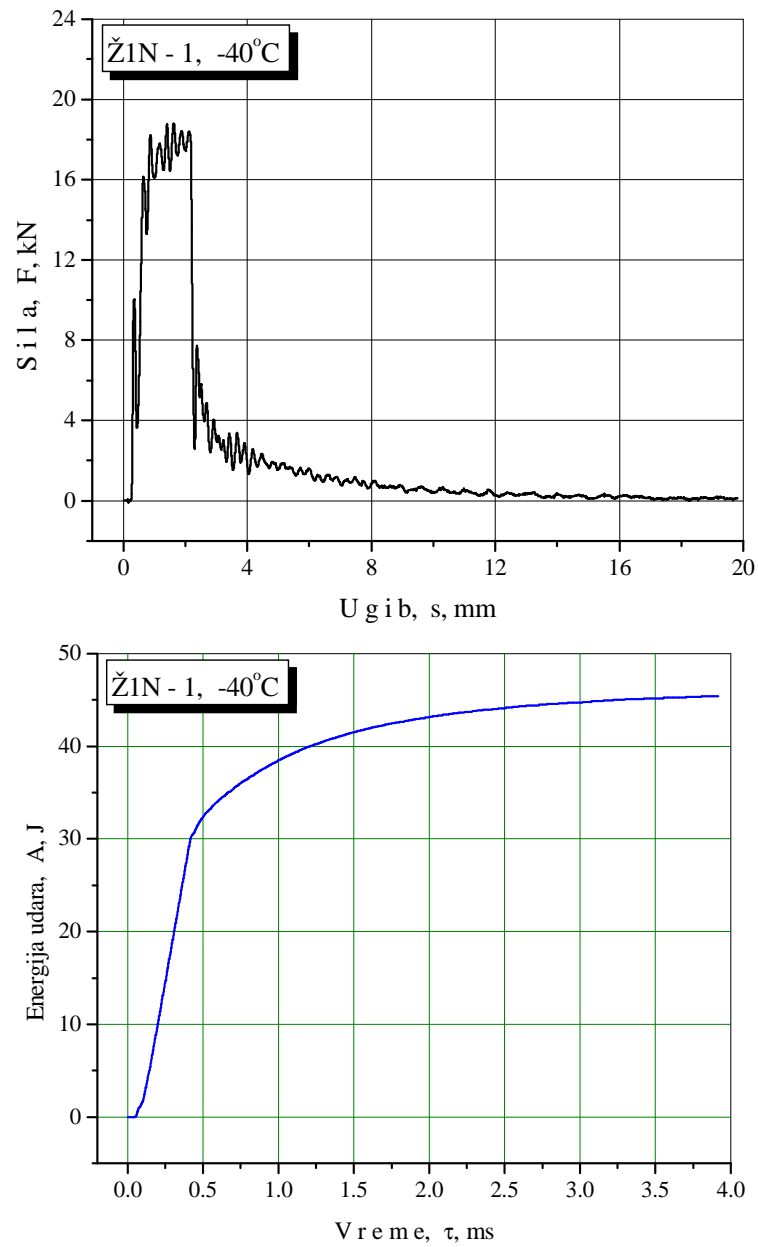
Slika 6.8. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na sobnoj temperaturi.



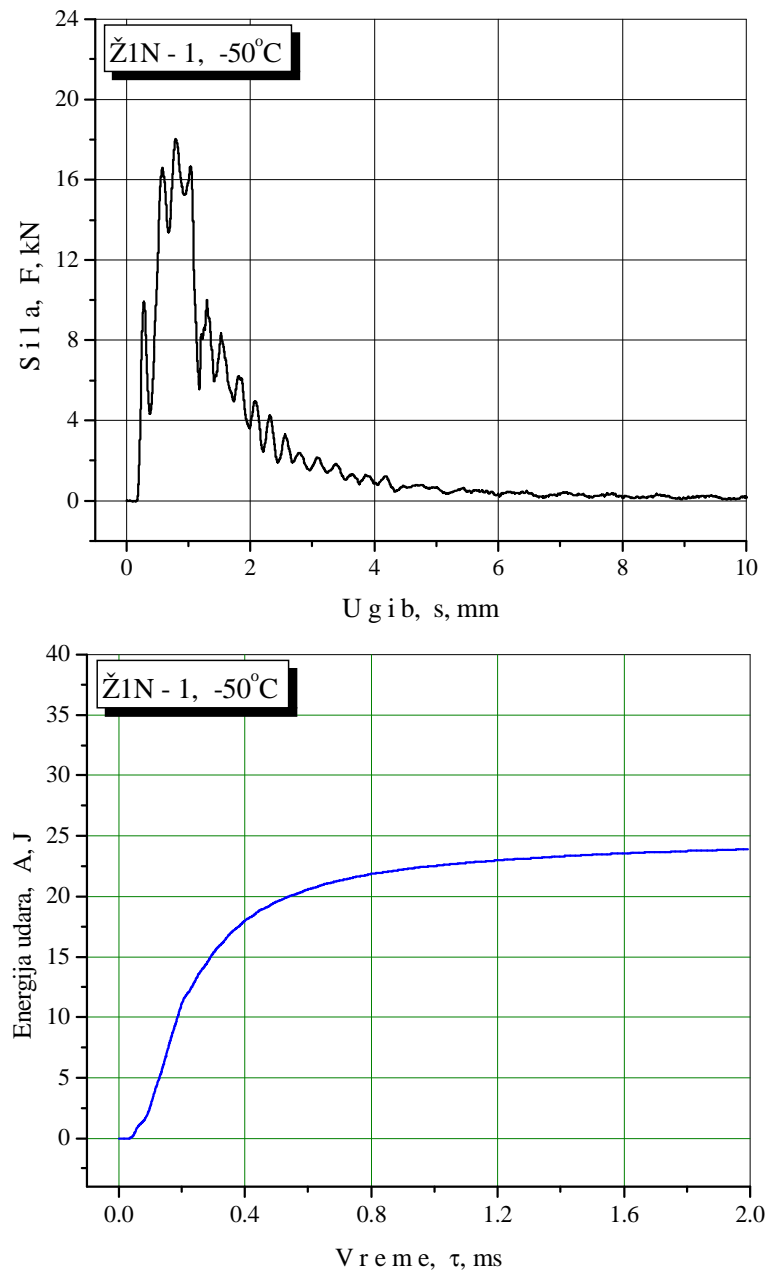
Slika 6.9. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na 0°C.



Slika 6.10. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na - 20°C.



Slika 6.11. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na -40°C .

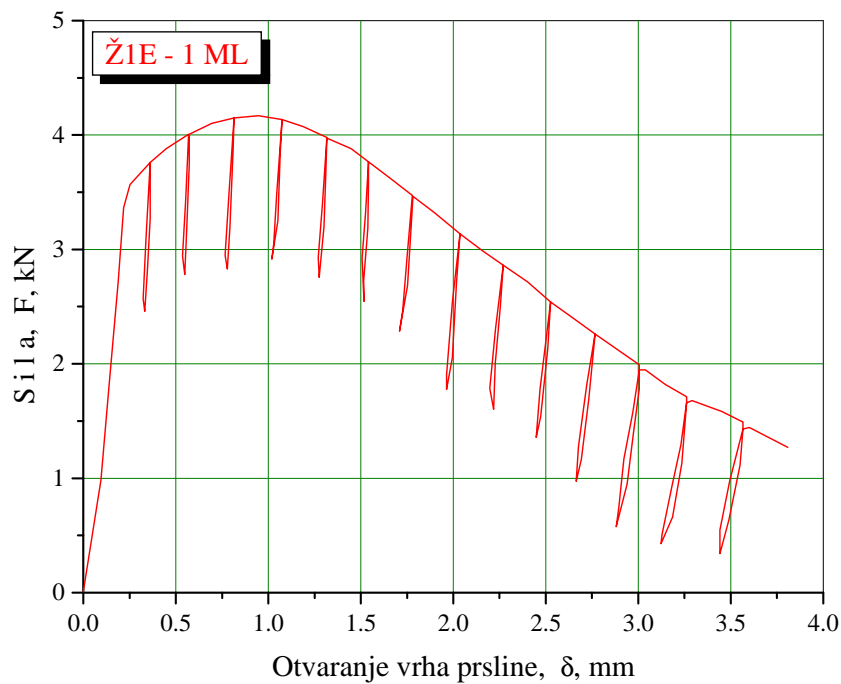


Slika 6.12. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete na -50°C .

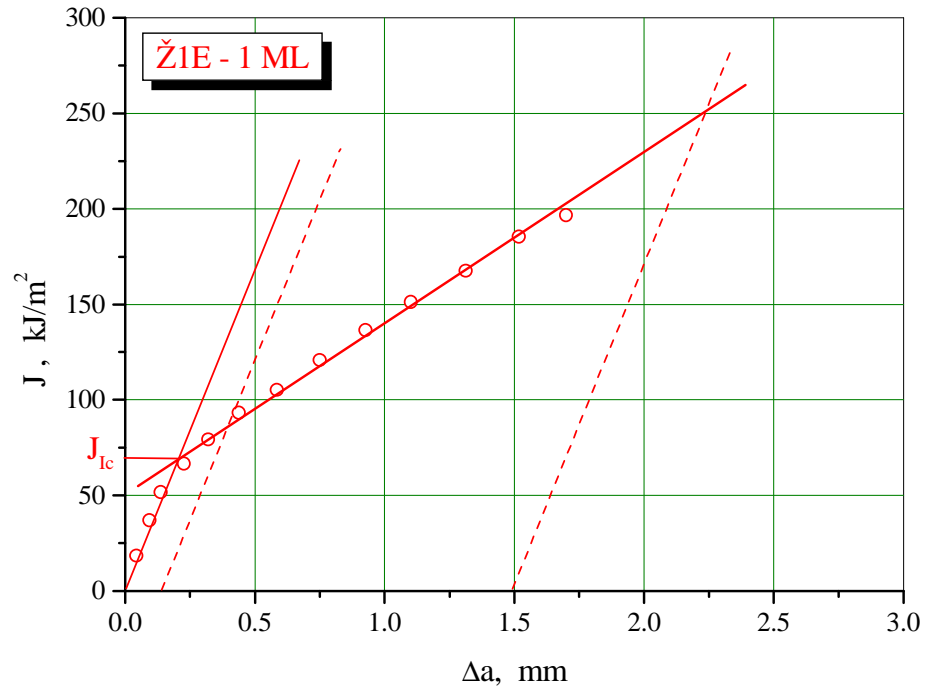
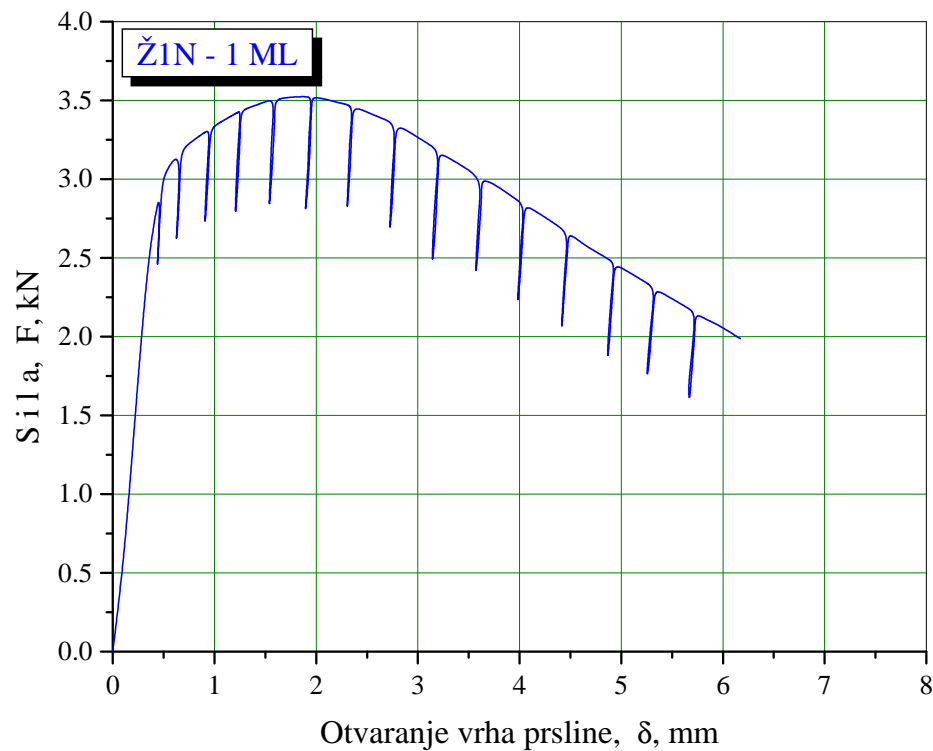
6.4. Određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic}

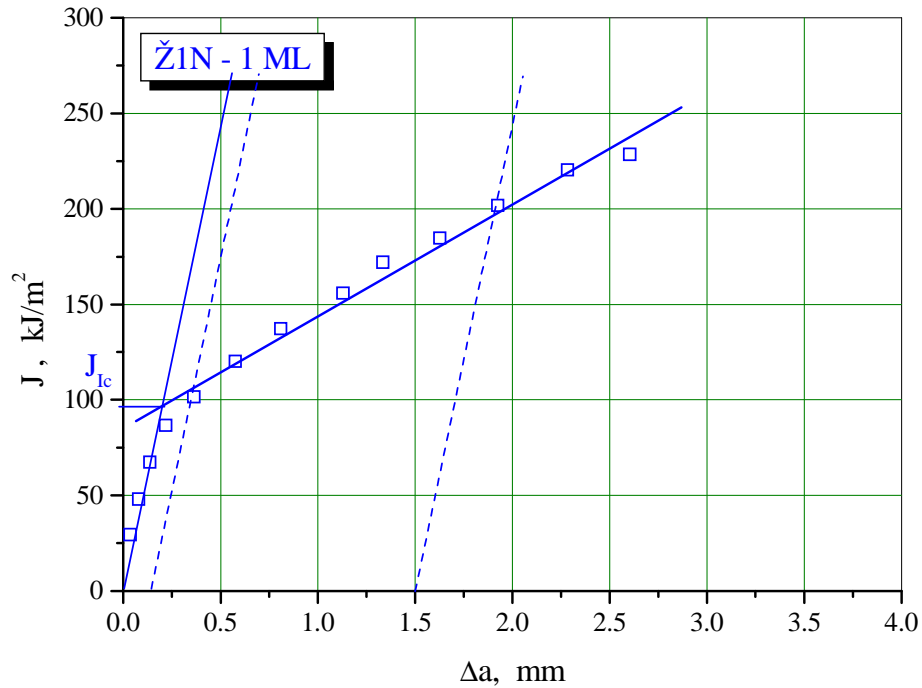
Pomoću podataka iz tačke 5.5 i podataka prikupljenih sa kidalice, (davača sile i COD davača), konstruisani su dijagrami sila F - otvaranje vrha prsline δ (CMOD). Oznaka CMOD je skraćenica od Crack Mouth Opening Displacement koja se prevodi kao otvaranje vrha prsline. Ovako dobijeni dijagrami su podloga za određivanje kritične vrednosti J-integrala, J_{Ic} , a sam postupak se ogleda u dobijanju R-krive (regresiona kriva prema ASTM E813), odnosno $J - \Delta a$ krive, koja se sastoji od vrednosti J integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa .

Tipični dijagrami $F - \delta$, i $J - \Delta a$ za epruvetu oznake E-1 urađenu iz uzorka eksploatisanog materijala dati su na sl. 6.13 i 6.14, a za epruvetu oznake N-1 urađenu iz uzorka novog materijala dati su na sl. 6.15 i 5.16.



Slika 6.13. Dijagram $F - \delta$ epruvete Ž1E – 1.

Slika 6.14. Dijagram J - Δa epruvete Ž1E - 1.Slika 6.15. Dijagram F - δ epruvete Ž1N - 1.

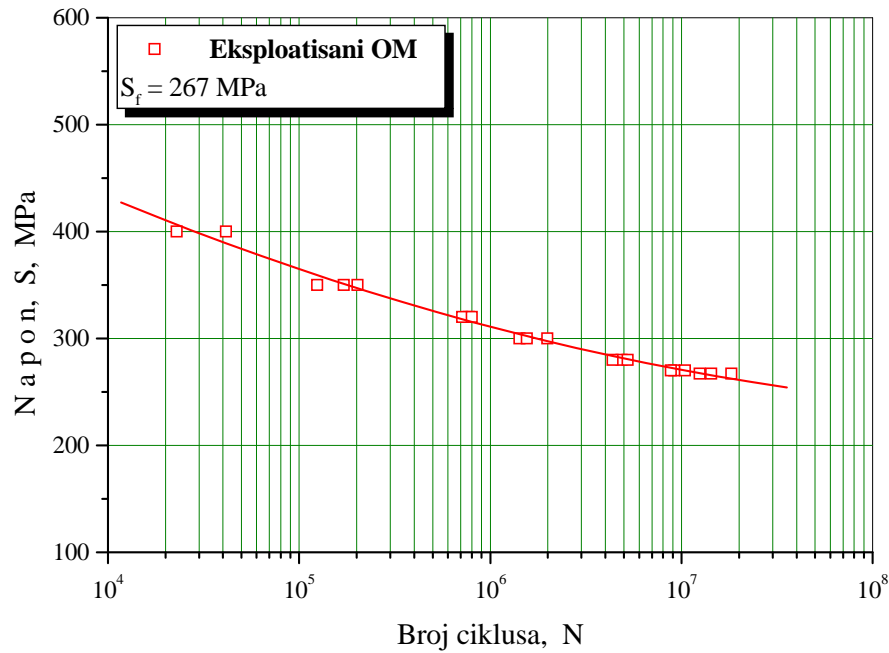
Slika 6.16. Dijagram J - Δa epruvete Ž1N - 1.

Pomoću jednačine (5.20) izračunavaju se vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} . U tab. 6.6 date su izračunate vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , za epruvete sa zarezom u eksploitanom i novom materijalu ispitanih na sobnoj temperaturi od 20°C.

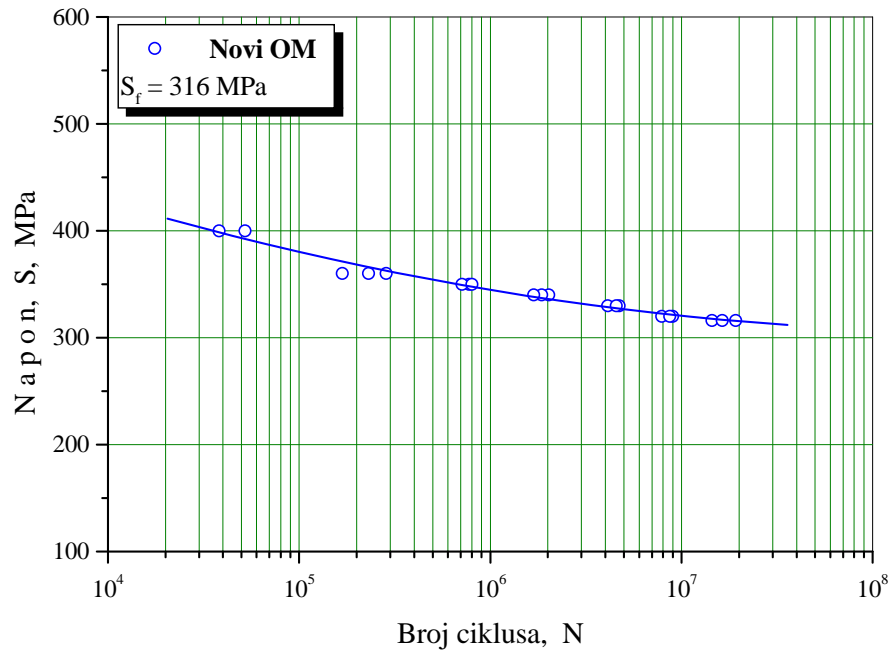
Tabela 6.6. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u materijalu.

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}
Eksploitan OM			
Ž1E - 1 ML	20	69.5	126.6
Ž1E - 2 ML		64.3	121.8
Ž1E - 3 ML		67.8	125.1
Novi OM			
Ž1N - 1 ML	20	95.3	148.3
Ž1N - 2 ML		90.7	144.7
Ž1N - 3 ML		84.5	139.6

6.5. Ispitivanja promenljivim opterećenjem



Slika 6.17. S-N dijagram eksploatisanog materijala.



Slika 6.18. S-N dijagram novog materijala.

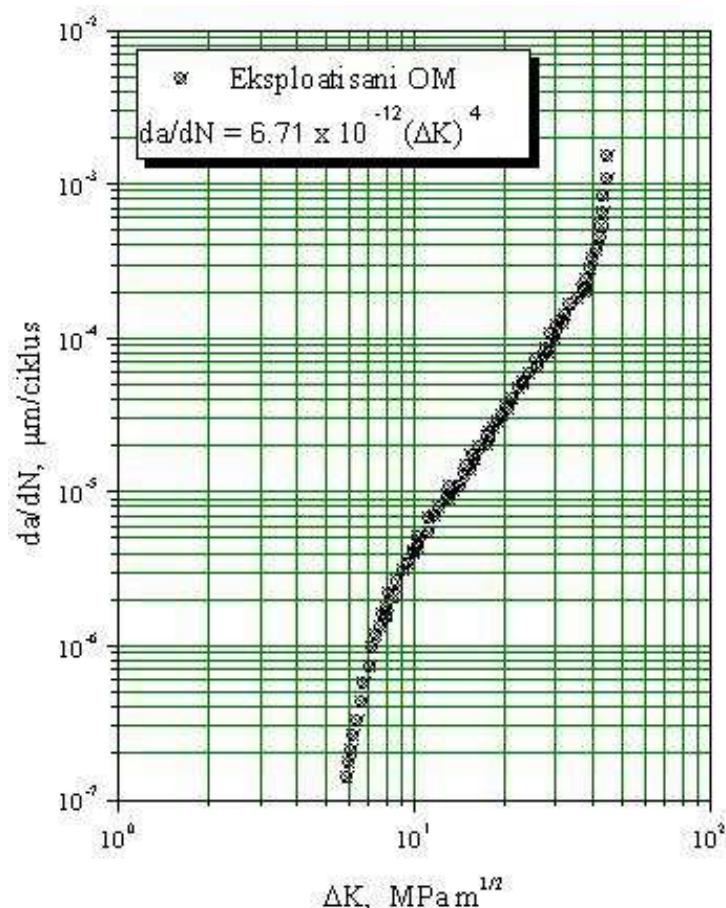
Ovim ispitivanjem se po pravilu samo utvrđuje broj promena opterećenja do loma pri dejstvu opterećenja konstantnog raspona, i standardom se zahteva samo podatak o veličini napona pri kojoj ne dolazi do loma posle određenog broja ciklusa (obično između 10^6 i 10^8 ciklusa). Za čelične materijale standard ASTM E468 definiše trajnu dinamičku čvrstoću, S_f , posle 10^7 ciklusa.

Konstruisanje jedne Velerove krive i određivanje trajne dinamičke čvrstoće zahteva ispitivanje epruveta na 6 do 7 različitih nivoa opterećenje. Za svaki nivo opterećenja potrebno je ispitati po tri epruvete, što je ukupno 21 epruveta (prema standardu ASTM E 466). Zato je ovo ispitivanje izuzetno skupo i opravdano kada su potrebni podaci za projektovanje, prvenstveno sa aspekta zamora i mehanike loma; znači kada se projektuju delovi izloženi dugotrajnom promenljivom opterećenju u ukupnom projektom veku konstrukcije.

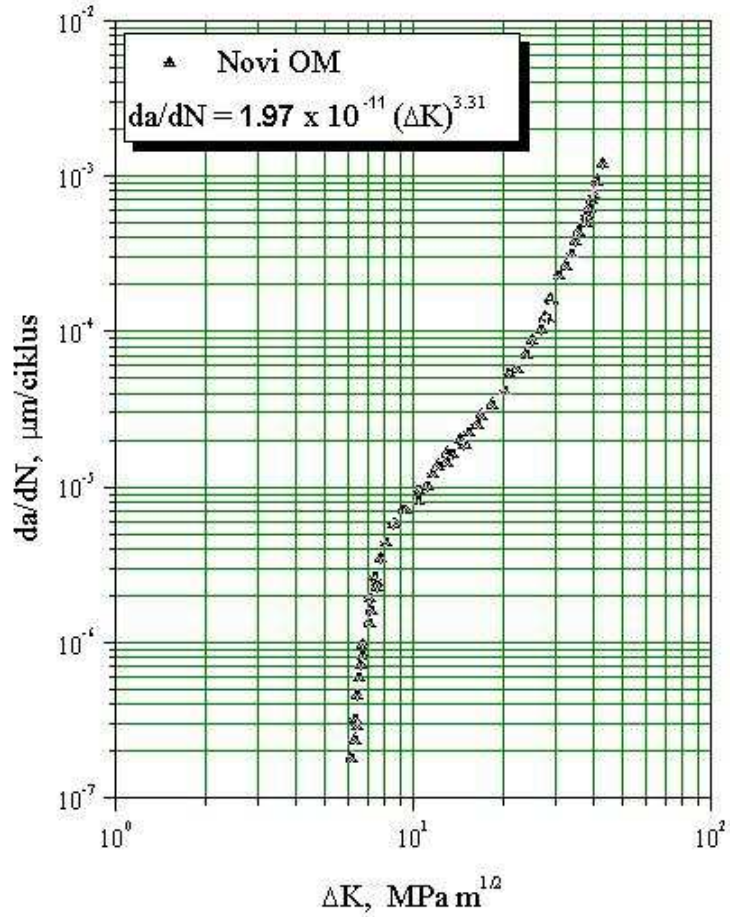
Dobijene vrednosti trajne dinamičke čvrstoće za eksploatisani i novi materijal date su na sl. 6.17 i sl. 6.18.

6.6. Određivanje parametara rasta zamorne prsline

Potrebni podaci u oceni ponašanja materijala sa greškom tipa prsline u uslovima delovanja promenljivog opterećenja se dobijaju određivanjem parametara rasta zamorne prsline. Uticaj vremena eksploatacije na parametre rasta zamorne prsline je analiziran ispitivanjem eksploatisanog i novog materijala. Na osnovu toka ispitivanja i dobijenih zavisnosti dužina prsline a - broj ciklusa N , izračunava se brzina rasta zamorne prsline da/dN . U zavisnosti od primenjenog promenljivog opterećenja iskazanog kroz promenu opsega faktora intenziteta napona, ΔK , crtaju se krive $\log da/dN - \log(\Delta K)$.



Slika 6.19. Dijagram zavisnosti $da/dN - \Delta K$ za eprvetu sa vrhom zamorne prsline u eksploatisanom materijalu.



Slika 6.20. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK za epruvete sa vrhom zamorne prsline u novom materijalu.

Dobijeni dijagrami brzina rasta zamorne prsline, da/dN - promena opsega faktora intenziteta napona, ΔK , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u eksploatisanom i novom materijala prikazani su na sl. 6.19 i 6.20.

Vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta C i eksponenta m , praga zamora ΔK_{th} , i brzine rasta zamorne prsline, da/dN , pri vrednosti $\Delta K=15\text{MPa m}^{1/2}$, date su u tab. 6.7. za epruvete sa zarezom u eksploatisanom i novom materijalu. Njih ćemo dalje koristiti u poglavlju 7 za procenu preostalog veka tornja.

Tabela 6.7. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u materijalu tornja.

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora ΔK_{th} , $\text{MPa m}^{1/2}$	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN , m/cikl, pri $\Delta K=15\text{MPa m}^{1/2}$
Eksploatisani materijal					
E - 1	20	5.8	$6.71 \cdot 10^{-12}$	4	$3.40 \cdot 10^{-7}$
Novi materijal					
E - 2	20	6.1	$1.97 \cdot 10^{-11}$	3.31	$1.54 \cdot 10^{-7}$

6.7. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor

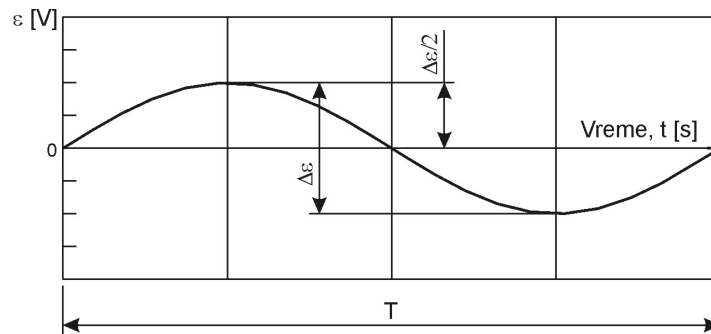
Malocikličnom zamaranju na sobnoj temperaturi, izlagano je deset epruveta eksploatisanog materijala označenih sa A1 do A10, i deset epruveta novog materijala označenih sa B1 do B10. Primenjen je režim kontrolisanih deformacija sa faktorom asimetrije ciklusa $R_\varepsilon = -1$.

Zakon kontrolisanih deformacija definisan je sinusnom trigonometrijskom funkcijom

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (6.1)$$

u kojoj razlikujemo: amplitudu $\Delta\varepsilon/2$, vreme t izraženo u sekundama i period T takođe izražen u sekundama.

Grafička ilustracija zakona kontrolisanih deformacija, analitički definisanog funkcijom (6.1), data je na sl. 6.21.



Slila 6.21. Grafička ilustracija zakona kontrolisanih deformacija.

Osnovni podaci o režimima kontrolisanih deformacija za epruvete eksploatisanog i novog materijala dati su u tab. 6.8. Među njima su i podaci o apsolutnom izduženju/suženju Δl merne dužine $L_0 = 25$ mm.

Tablca 6.8. Osnovni podaci o režimima kontrolisanih deformacija.

Epruveta	$\Delta\varepsilon/2$ [%]	$\Delta\varepsilon/2$ [V]	$\Delta\varepsilon/2$ [mm/mm]	Δl [mm]	$\Delta\varepsilon$ [%]	T [s]	f [Hz]
A1, A2, B1, B2	0.5	2.5	0.005	0.125	1.0	5	0.200
A3, A4, B3, B4	0.6	3.0	0.006	0.150	1.2	6	0.166
A5, A6, B5, B6	0.7	3.5	0.007	0.175	1.4	7	0.143
A7, A8, B7, B8	0.8	4.0	0.008	0.200	1.6	8	0.125
A9, A10, B9, B10	0.9	4.5	0.009	0.225	1.8	9	0.111

Iz prethodne tablice se vidi da je ispitivanje otpornosti na malociklični zamor epruveta izvađenih iz eksploatisanog i novog materijala izvršeno na amplitudnim nivoima deformacija $\Delta\varepsilon/2 = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ i 0.9 %. Vrednosti frekvencija f pridruženih tim nivoima, jednake su recipročnim vrednostima odgovarajućih perioda T .

U toku ispitivanja, za svaku od epruveta su memorisani podaci (U_F, U_ε) parova koji predstavljaju u voltima izražene električne signale za silu F i deformaciju ε . Veza

računara sa davačem sile i ekstenzometrom, prema sl. 5.32, ostvarena je preko A/D (analogno/digitalnog) konvertora i kontrolnog sistema.

Za određivanje modula elastčnosti E, epruveta izvađenih iz eksploatisanog (A) i novog (B) materijala, korišćeni su delovi monotonih naponsko - deormacionih krivih. Dobijene vrednosti modula elastčnosti eksploatisanog i novog materijala, uključujući i srednju vrednost E_{sr} , date su u tab. 6.9.

Tabela 6.9. Podaci o modulima elastčnosti.

Epruveta eksploat. materijala	E_E [MPa]	E_{Esr} [MPa]	Epruveta novog materijala	E_N [MPa]	E_{Nsr} [MPa]
A1	198	204.2	B1	209	208.2
A3	202		B3	207	
A5	197		B5	207	
A7	202		B7	208	
A9	203		B9	210	

Podaci o stabilizovanim histerezama, dopunjeni sa podacima o broju ciklusa do iniciranja prsline N_f , za eksploatisani materijal dati su u tab. 6.10, a za novi materijal u tab. 6.11.

Tabela 6.10. Podaci o stabilizovanim histerezama epruvete eksploatisanog materijala.

Epruveta	$\Delta\epsilon/2$	σ_{max} MPa	σ_{min} MPa	$\Delta\epsilon_p$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\epsilon_c/2$	$\Delta\sigma/2$ MPa	N_f
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A2	0.005	327.6	- 328.8	0.002755	0.001378	0.003623	328.2	2160
A4	0.006	345.9	- 348.7	0.003821	0.001875	0.004126	347.3	1357
A6	0.007	378.6	- 373.0	0.005132	0.002516	0.004484	375.8	554
A8	0.008	405.1	- 401.7	0.006943	0.003372	0.004629	403.4	287
A10	0.009	427.8	- 430.4	0.008995	0.004298	0.004703	429.1	188

Tabela 6.11. Podaci o stabilizovanim histerezama za epruvete novog materijala.

Epruveta	$\Delta\epsilon/2$	σ_{max} MPa	σ_{min} MPa	$\Delta\epsilon_p$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\epsilon_c/2$	$\Delta\sigma/2$ MPa	N_f
1	2	3	4	5	6	7	8	9
B2	0.005	351.8	- 354.6	0.002794	0.001397	0.003603	353.2	2970
B4	0.006	374.2	- 376.8	0.004018	0.002009	0.003991	375.5	1840
B6	0.007	401.3	- 404.9	0.005442	0.002721	0.004279	403.1	985
B8	0.008	429.1	- 432.6	0.007232	0.003616	0.004384	430.9	623
B10	0.009	457.8	- 461.3	0.009325	0.004663	0.004337	459.6	312

Stepena funkcija amplituda napona ($\Delta\sigma/2$) - amplituda plastične deformacije ($\Delta\epsilon/2$), u log-log koordinatnom sistemu se linearizuje, odnosno transformiše u jednačinu prave

$$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n \log \frac{\Delta\epsilon_p}{2} + \log K' \quad (6.2)$$

u čijem se eksperimentalno određenom obliku uočava vrednost eksponenta cikličnog deformacionog ojačavanja n' dok se do koeficijenta ciklične čvrstoće K' dolazi inverzijom.

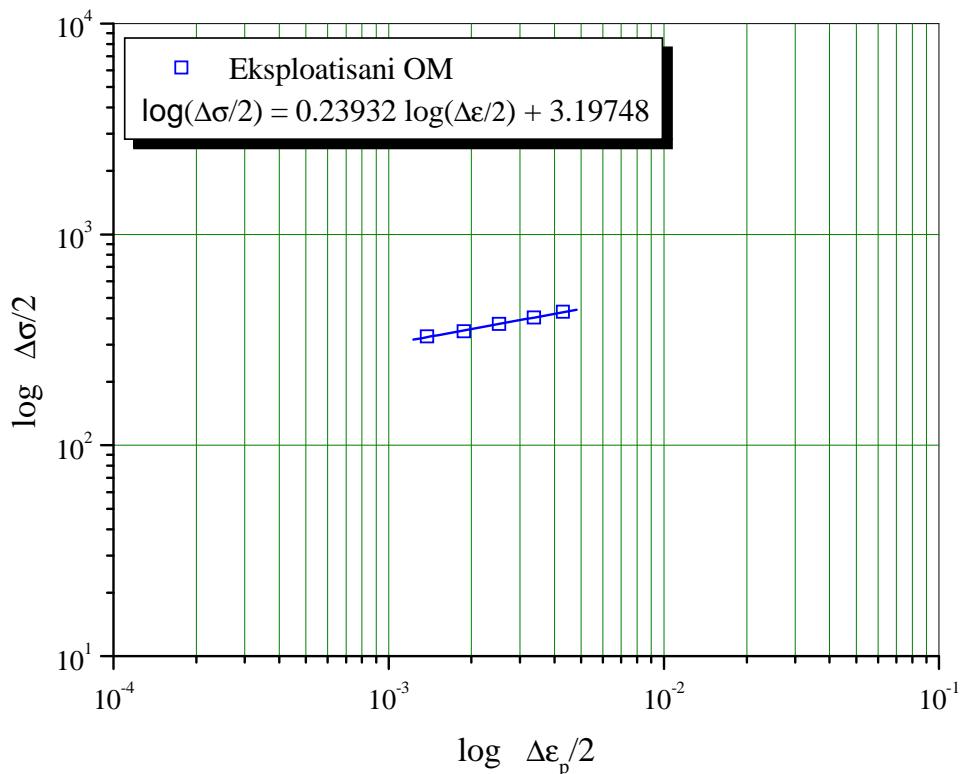
Obradom podataka iz kolona 6 i 8, tab. 6.10 i 6.11, i primenom metoda najmanjih kvadrata origininalnog korisničkog softvera, u log - log koordinatnom sistemu, dobijena je linearizovana stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije, za eksploatisani materijal

$$\log\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)_A = 0.23932 \log\left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)_A + 3.19748 \quad (6.3)$$

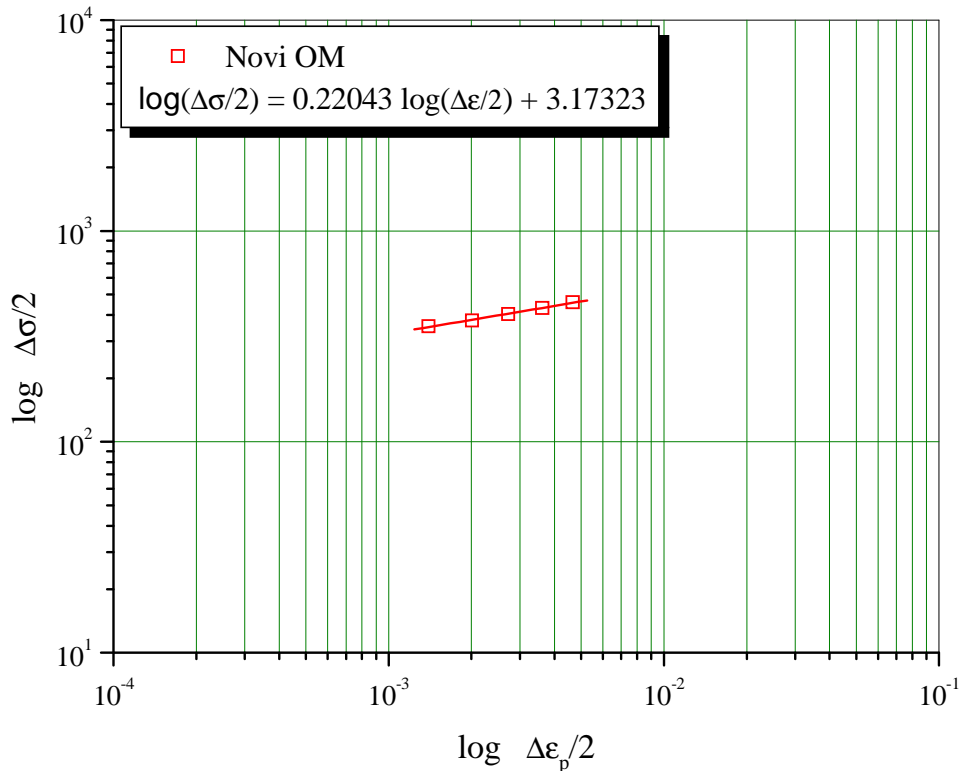
i linearizovana stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije, za novi materijal

$$\log\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)_B = 0.22043 \log\left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)_B + 3,17323 \quad (6.4)$$

Izgled linearizovane stepene funkcije amplituda napona - amplituda plastične deformacije u log - log dijagramu, za eksploatisani materijal je data na sl. 6.22, a za novi materijal na sl. 6.23.



Slika 6.22. Linearizovana stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije za eksploatisani materijal.



Slika 6.23. Linearizovana stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije za novi materijal.

Na osnovu opšteg oblika datog u jednačini 6.2, i dobijenih linearizovanih stepenih funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije, jedn. 6.3 i 6.4, određene su vrednosti za eksploatisani materijal:

- eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, $n_A' = 0.23932$ i
- koeficijent ciklične čvrstća, $K_A' = 1575.7$ MPa.
i za novi materijal:
- eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, $n_B' = 0.22043$ i
- koeficijenta ciklične čvrstće, $K_B' = 1490.1$ MPa.

Obradom podataka iz kolona 7 i 9, odnosno kolona 6 i 9, tab. 6.10 i 6.11, takođe primenom metoda najmanjih kvadrata originalnog korisničkog softvera, u log-log koordinatnim sistemima, dobijene su linearizovana elastična i linearizovana plastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora.

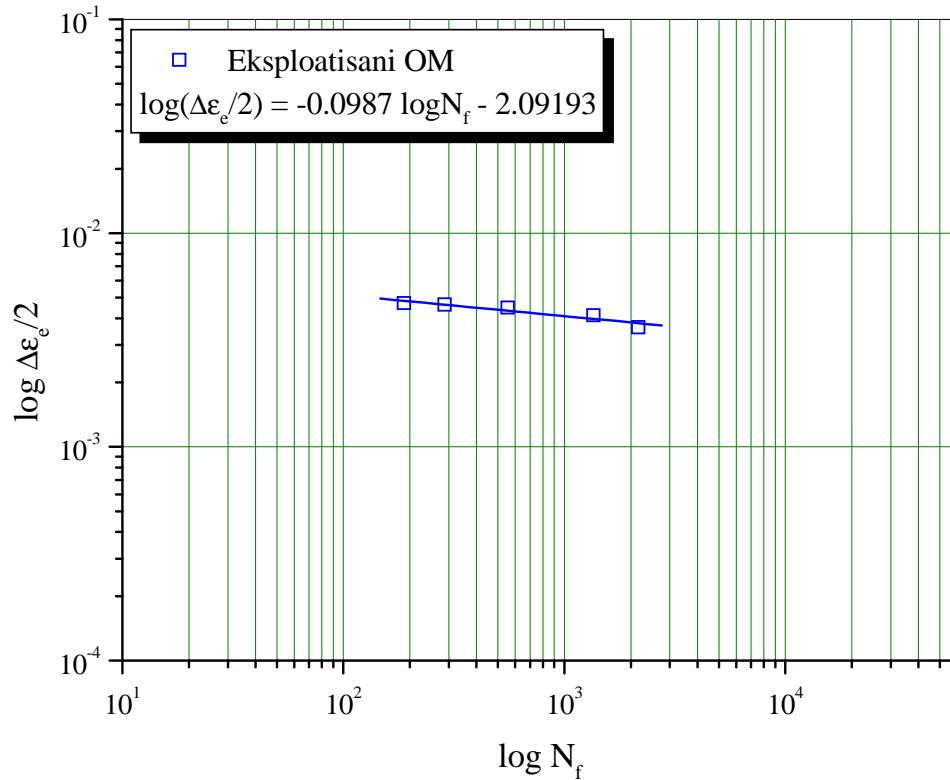
Elastična i plastična komponenta ukupne amplitudne deformacije, u log-log koordinatnim sistemima se linearizuju - transformišu u jednačine pravih

$$\log \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma_f'}{E} \quad (6.5)$$

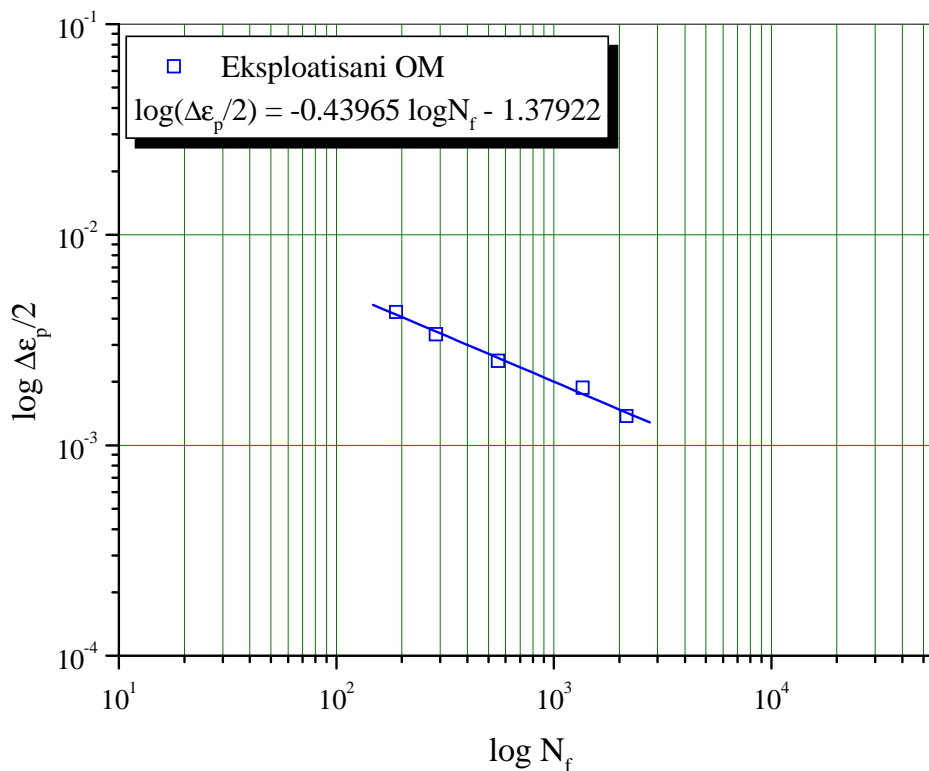
$$\log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \varepsilon_f' \quad (6.6)$$

iz čijih se eksperimentalno određenih oblika određuju koeficijenti i eksponenti potrebni za definisanje jednačine osnovne krive malocikličnog zamora.

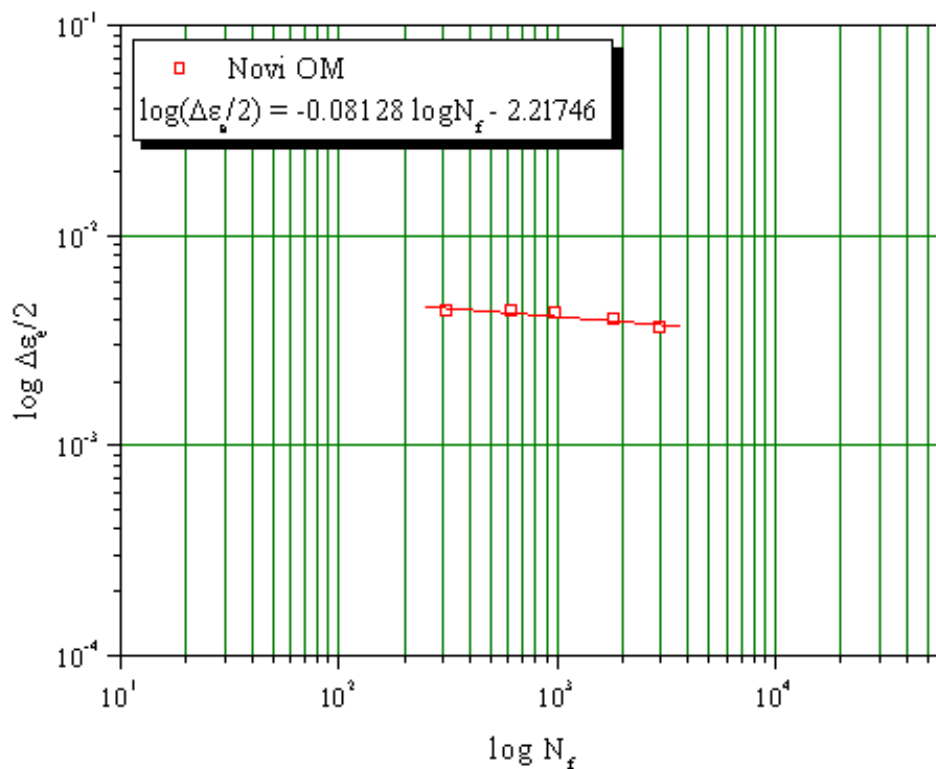
Izgled linearizovane elastične i linearizovane plastične komponente osnovne krive malocikličnog zamora u log - log dijagramu, za eksploatisani materijal je data na sl. 6.24 i 6.25, a za novi materijal na sl. 6.26 i 6.27.



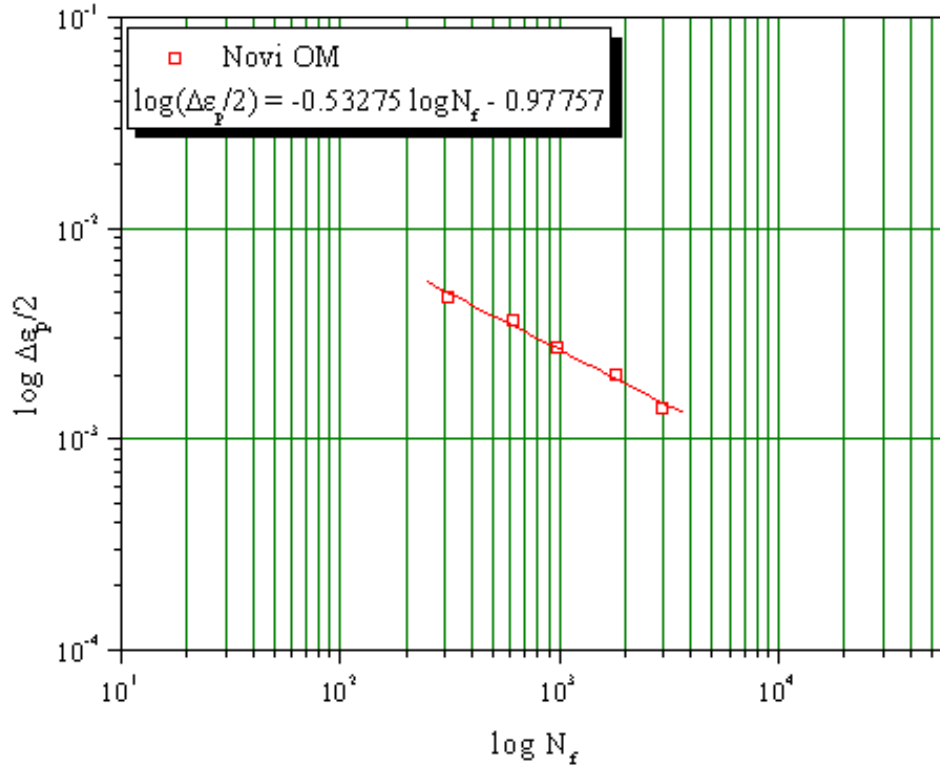
Slika 6.24. Linearizovana elastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora.



Slika 6.25. Linearizovana plastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora.



Slika 6.26. Linearizovana elastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora.



Slika 6.27. Linearizovana plastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora.

Linearizovana elastična i plastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora su definisane jednačinama pravih. One su za eksploatisani materijal dati u obliku

$$\log\left(\frac{\Delta \epsilon_e}{2}\right)_A = -0.0987 \log N_{Af} - 2.09193 \quad (6.7)$$

$$\log\left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2}\right)_A = -0.43965 \log N_{Af} - 1.37922 \quad (6.8)$$

iz kojih su za modul elastičnosti za eksploatisani materijal $E_A = E_{Asr} = 204200$ MPa, a na osnovu opštih jednačina 5.36 i 5.37, određeni:

- eksponent zamorne čvrstoće, $b_A = -0.09870$,
- koeficijent zamorne čvrstoće, $\sigma'_{Af} = 1290.2$ MPa,
- eksponent zamorne duktilnosti, $c_A = -0.43965$ i
- koeficijent zamorne duktilnosti, $\epsilon'_{Af} = 0.04176$.

Linearizovana elastična i plastična komponenta osnovne krive malocikličnog zamora je za novi materijal data u obliku

$$\log\left(\frac{\Delta \epsilon_e}{2}\right)_B = -0.08128 \log N_{Bf} - 2.21746 \quad (6.9)$$

$$\log\left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)_B = -0.53275 \log N_{Bf} - 0.97757 \quad (6.10)$$

iz kojih su za modul elastičnosti za novi materijal $E_B = E_{Bsr} = 208200$ MPa, a na osnovu opštih jednačina 5.36 i 5.37, određeni:

- eksponent zamorne čvrstoće, $b_B = -0.08128$,
- koeficijent zamorne čvrstoće, $\sigma'_{Bf} = 1261,9$ MPa,
- eksponent zamorne duktilnosti, $c_B = -0.53275$ i
- koeficijent zamorne duktilnosti, $\varepsilon'_{Bf} = 0.10530$.

Komplet tabelarno sistematizovanih cikličnih karakteristika eksploatisanog i novog materijala, određenih ispitivanjem otpornosti na malociklični zamor u uslovima kontrolisanih deformacija, sa faktorom asimetrije $R\varepsilon = -1$ su dati u tab. 6.12.

Koristeći vrednosti cikličnih karakteristika iz tab. 6.12, na osnovu opštih jednačina 5.27 i 5.35.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma_f'}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c$$

dobijene su:

jednačina ciklične naponsko deformacione krive za eksploatisani materijal

Tabela 6.12. Ciklične karakteristike eksploatisanog i novog materijala čelika.

Karakteristike	EM	NM
	ASTM A572 Grade 50	S355JR
Modul elastičnosti, E, MPa	204200	208200
Koeficijent ciklične čvrstoće, K', MPa	1575.7	1490.1
Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.23932	0.22043
Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f, MPa	1290.2	1261.9
Eksponent zamorne čvrstoće, b	-0.0987	-0.08128
Koeficijent zamorne duktilnosti, ε'_f	0.04176	0.10530
Eksponent zamorne duktilnost, c	-0.43965	-0.53275

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{1}{204200} \cdot \frac{\Delta \sigma}{2} + \left(\frac{1}{1575.7} \cdot \frac{\Delta \sigma}{2} \right)^{\frac{1}{0.23932}} \quad (6.11)$$

i jednačina osnovne krive malocikličnog zamora za eksploatisani materijal

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 0.006438 N_f^{-0.09870} + 0.01569 N_f^{-0.43965} \quad (6.12)$$

Takođe, dobijene su:

jednačina ciklične naponsko deformacione krive za novi materijal

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{1}{208200} \cdot \frac{\Delta \sigma}{2} + \left(\frac{1}{1490} \cdot \frac{\Delta \sigma}{2} \right)^{\frac{1}{0.22043}} \quad (6.13)$$

i jednačina osnovne krive malocikličnog zamora za novi materijal

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 0.006061 N_f^{-0.08128} + 0.10530 N_f^{-0.53275} \quad (6.14)$$

Ciklične karakteristike eksploatisanog i novog materijala, iz tabele 6.12, koristimo dalje u poglavlju 7 za procenu preostalog veka konstrukcije tornja.

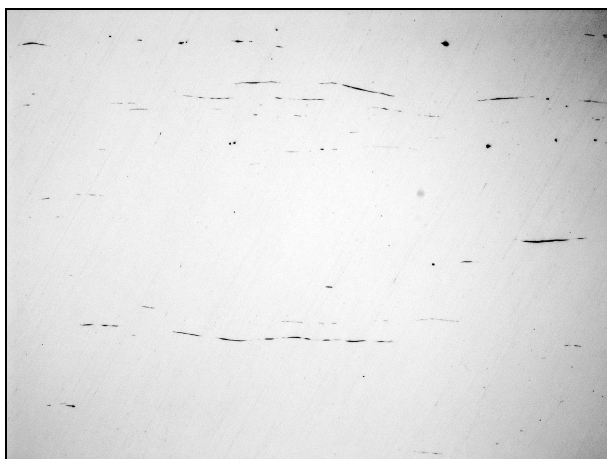
6.8. Makro i mikrostrukturna ispitivanja - rezultati

6.8.1. *Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka materijala*

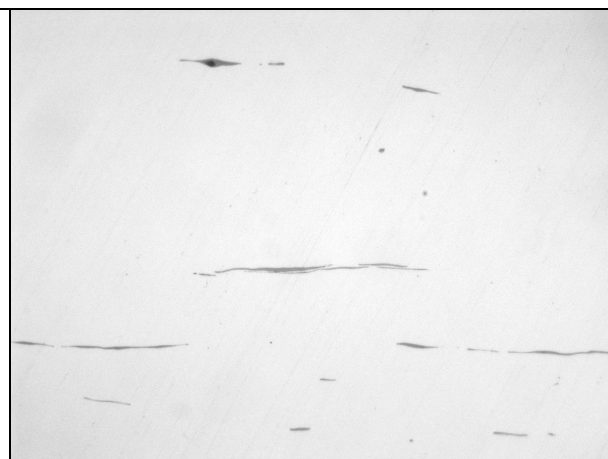
Prisutni su uključci u nizu i u eksploatisanom materijalu i u novom, sl. 6.28 i 6.29 i sl. 6.32 i 6.33.

Mikrostruktura eksploatisanog materijala je feritno-perlitna, sa lamelarnim perlitom, sl. 6.30 i 6.31. Mikrostruktura novog materijala je takođe feritno-perlitna, ali perlit je sferoidiziran sl. 6.34 i 6.35.

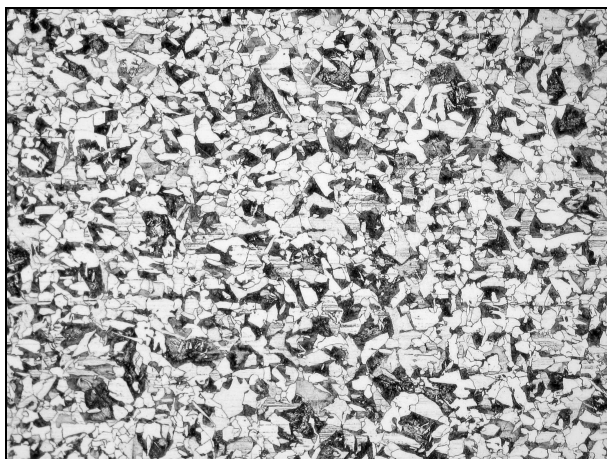
EKSPLOATISANI materijal



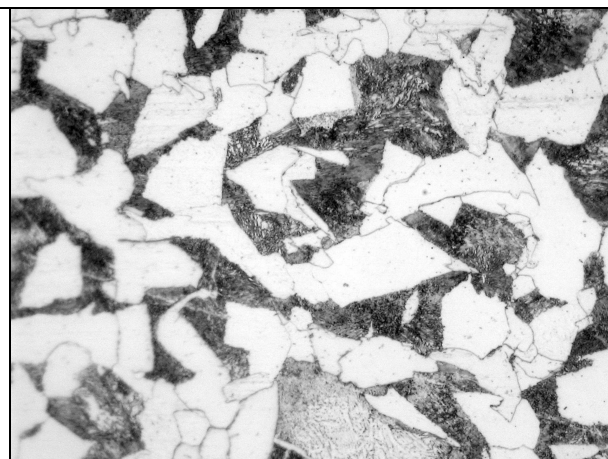
Slika 6.28. Uključci
nenagriženo 100x



Slika 6.29. Uključci
nenagriženo 500x

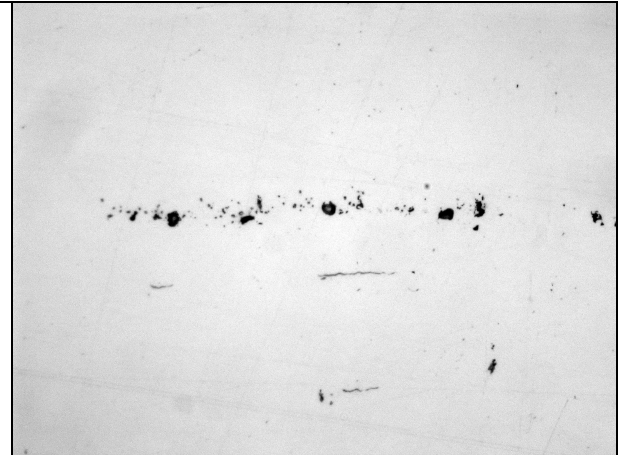
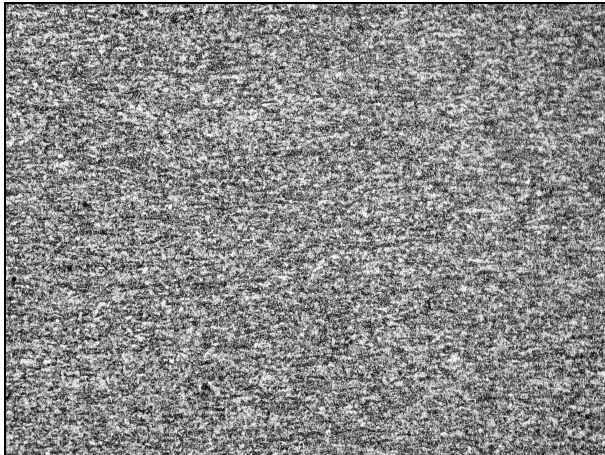
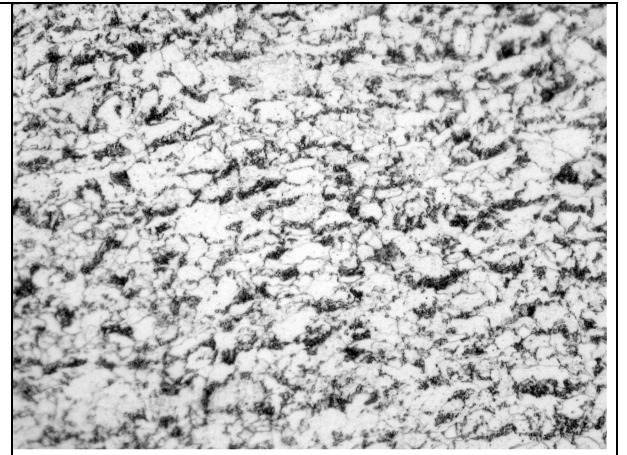


Slika 6.30. Mikrostruktura-uzdužni presek 100x
nagriženo nital



Slika 6.31. Mikrostruktura-uzdužni presek 500x
nagriženo nital

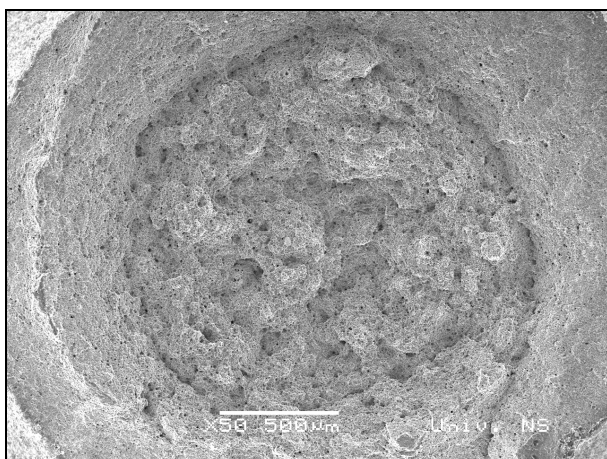
NOVI materijal

Slika 6.32. Ukljucci
nenagriženo 100xSlika 6.33. Ukljucci
nenagriženo 500xSlika 6.34. Mikrostruktura-uzdužni presek
nagriženo 100x nitalSlika 6.35. Mikrostruktura-uzdužni presek
nagriženo 500x nital

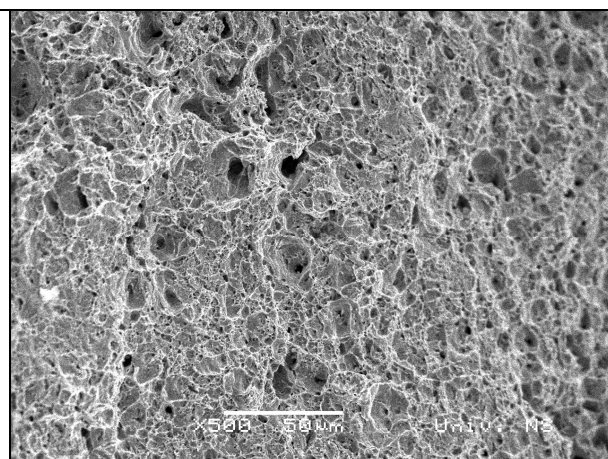
6.8.2. Površina preloma uzoraka za zatezanje

Uzorak novi materijal NM - 1

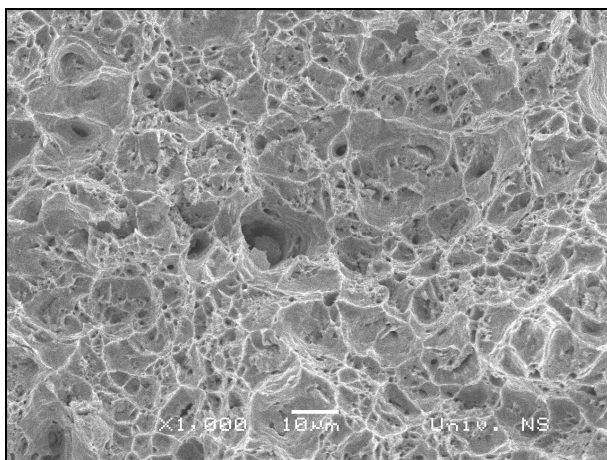
Površina preloma u obliku čaše-kupe je tipična za duktilne materijale, sl. 6.36. Po celoj površini je duktilni lom sa jamicama, sl. 6.37 i 6.38, i sa vidljivim uključcima u jamicama sl. 6.39.



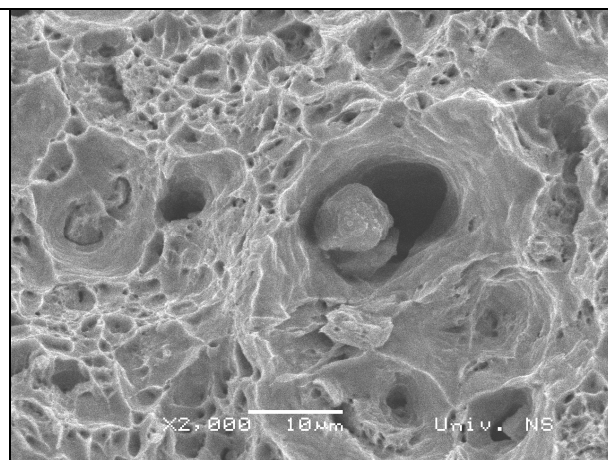
Slika 6.36. Površina preloma 50x



Slika 6.37. Površina preloma 500x



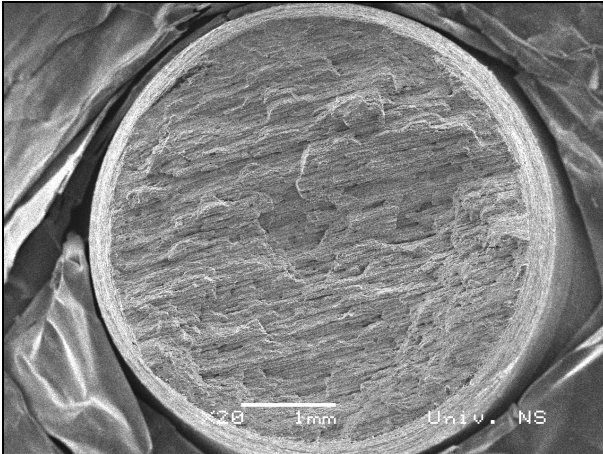
Slika 6.38. Površina preloma 1000x



Slika 6.39. Površina preloma 2000x

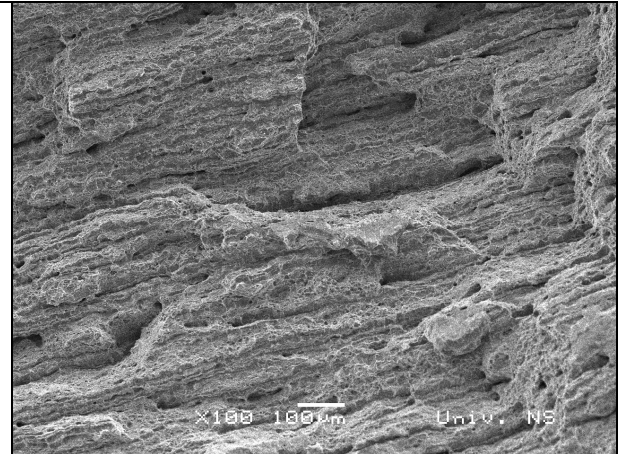
Uzorak eksploatisani materijal EM

Površina preloma je približno pod uglom od 45° na dejstvo sile, sl. 6.40. Površini preloma je trakasta, sl. 6.41 i 6.43. Područja tipičnog duktilnog loma se smenjuje sa područjima u kojima je vidljivo razvlačenje, sl. 6.42.



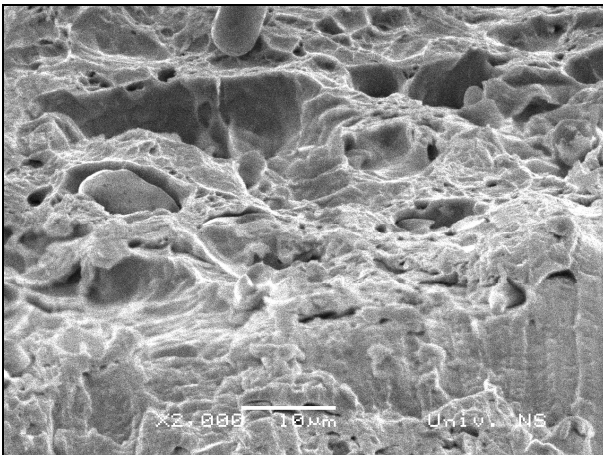
Slika 6.40. Površina preloma

20x



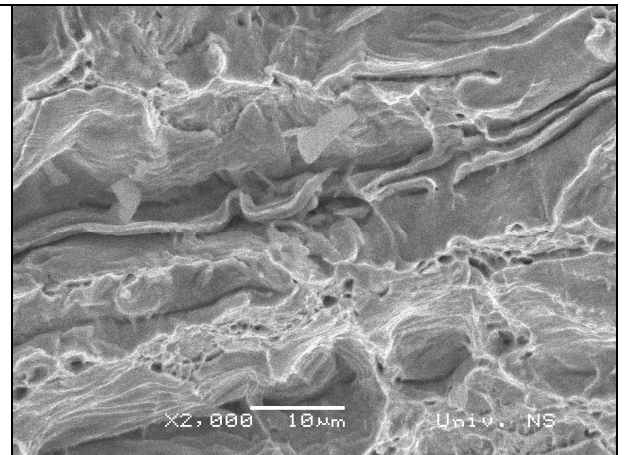
Slika 6.41. Površina preloma

100x



Slika 6.42. Površina preloma

2000x



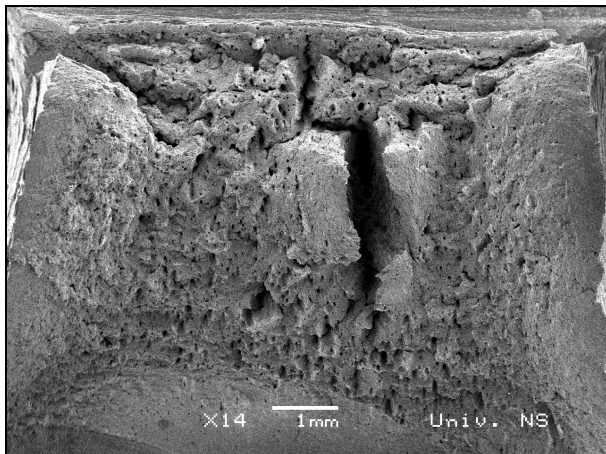
Slika 6.43. Površina preloma

2000x

6.8.3. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka na žilavost

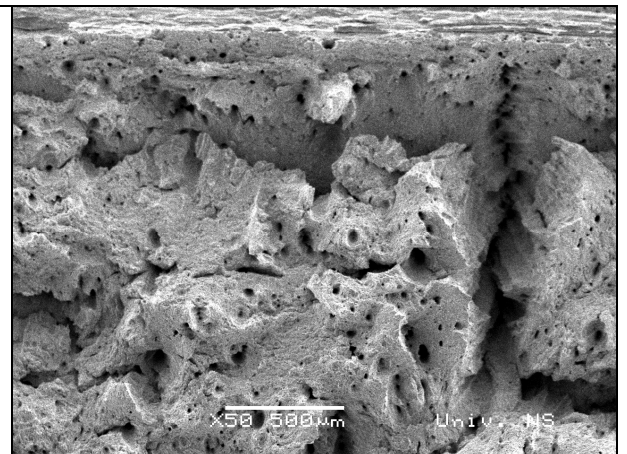
Ispitivanja površine preloma uzoraka na kojima je određivana energija udara pomoću Šarpijevog klatna su prikazana na sl. 6.44, gde se na makrosnimku vidi žilavi karakter loma. Površina preloma područja odmah do zarezaja je prikazana na sl. 6.45. Površina preloma je sa karakterističnim duktilnim jamicama sl. 6.46, koje su prikazane i na većim uvećanjima sl.6.47.

MS1- eksploatisani materijal EM



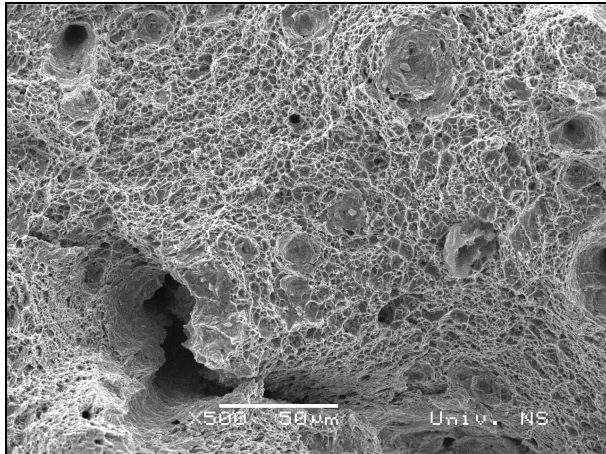
Slika 6.44.Sarpi

14x



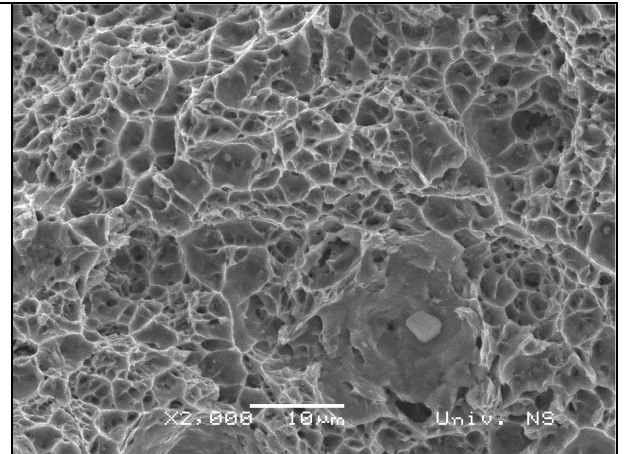
Slika 6.45. Sarpi

500x



Slika 6.46. Sarpi

50x

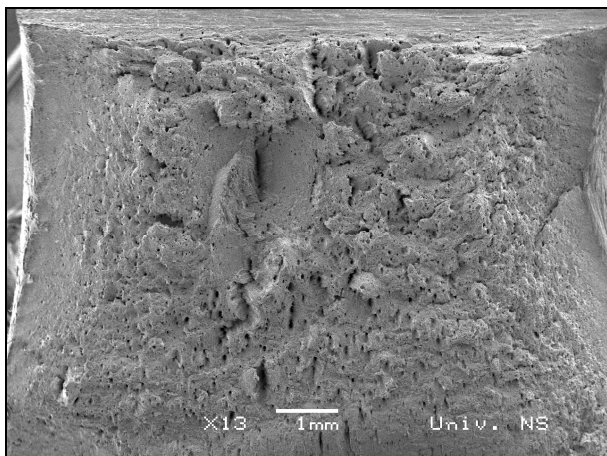


Slika 6.47.Sarpi

2000x

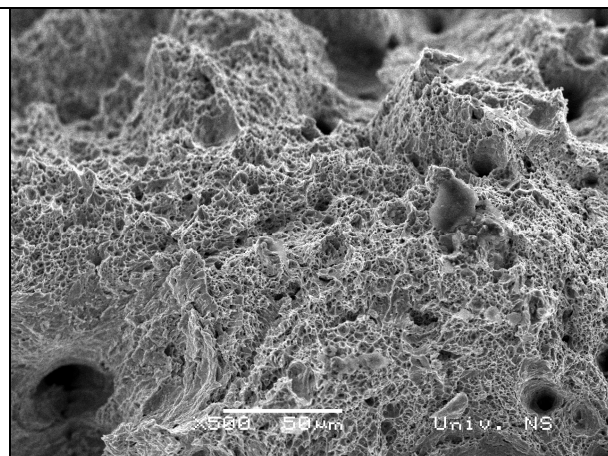
MS2 - novi materijal NM

Ispitivanja površine preloma uzoraka na kojima je određivana energija udara pomoću Šarpijevog klatna su prikazana na sl. 6.48, gde se na makrosnimku vidi žilavi karakter loma. Površina preloma područja odmah do zareza je prikazana na sl. 6.49. Površina preloma je sa karakterističnim duktilnim jamicama sl. 6.50, koje su prikazane i na većim uvećanjima sl.6.50 i 6.51.



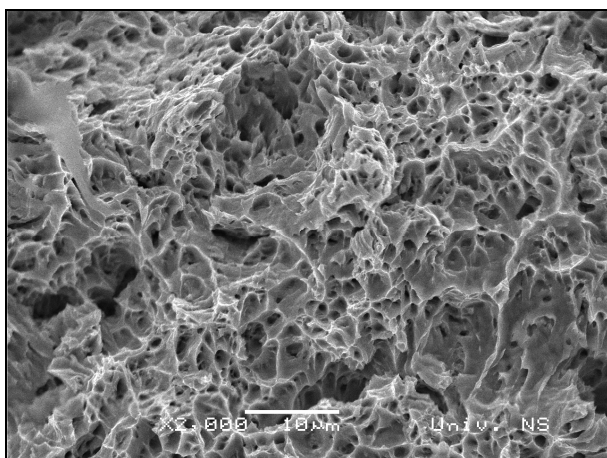
Slika 6.48. Sarpi

13x



Slika 6.49. Sarpi

500x



Slika 6.50. Sarpi

2000x

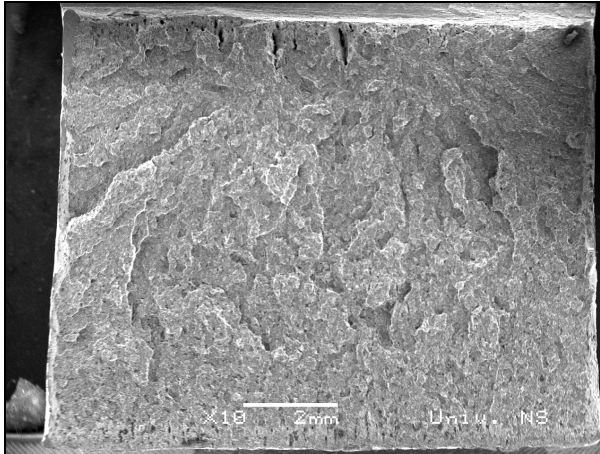


Slika 6.51. Sarpi

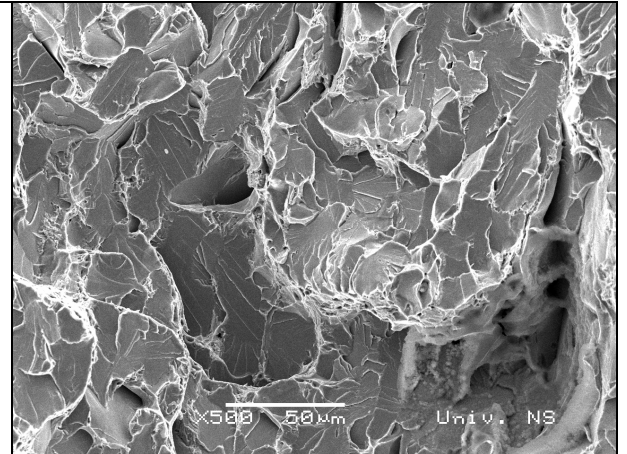
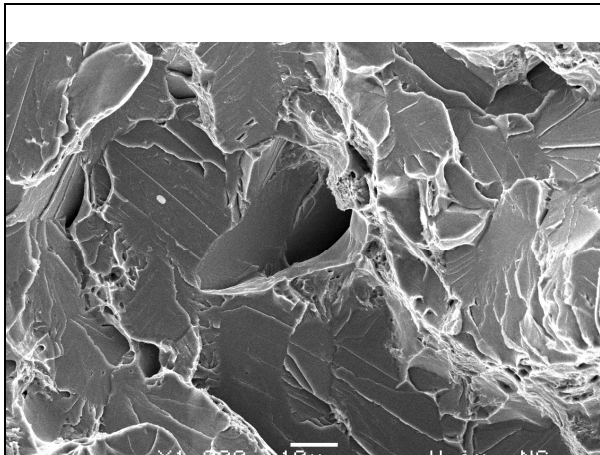
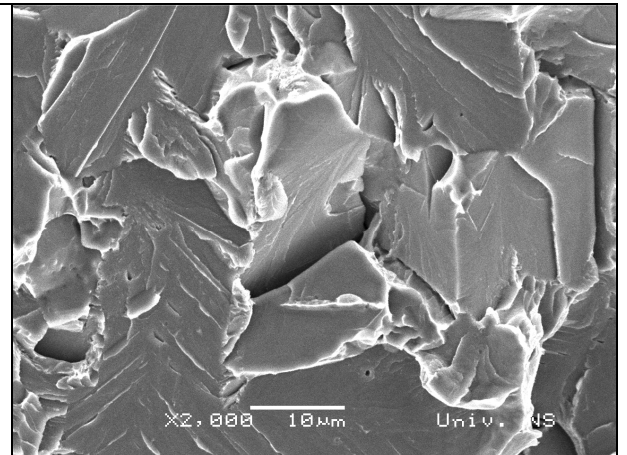
2000x

Ispitivanje Šarpijem je rađeno na niskim temperaturama do -50°C .

Površina preloma je bez tragova plastične deformacije, sl. 6.52. Površina preloma je sa područjima cepanja (cleavage), glatkim površinama koje su prikazane na sl. 6.53 - 6.55.

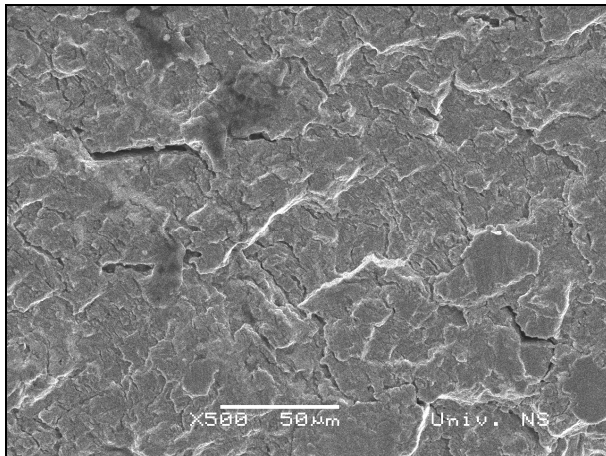


Slika 6.52. Površina preloma MS 3 01 10x

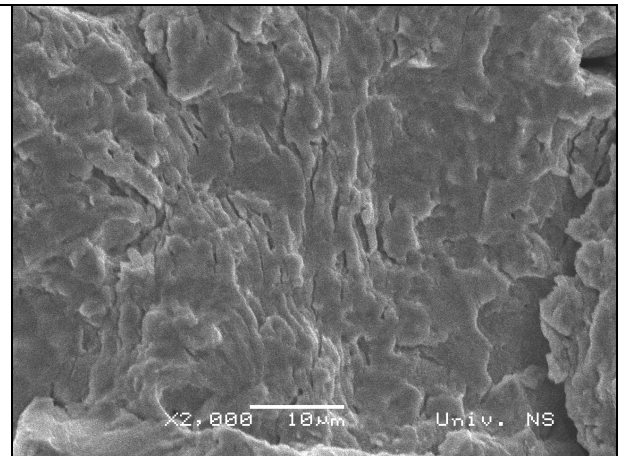
Slika 6.53. Površina preloma MS 3 02 500x
NenagriženoSlika 6.54. Površina preloma MS 3 03 500x
NenagriženoSlika 6.55. Površina preloma MS 3 04 2000x
Nenagriženo

6.8.4. MZIN novi materijal širenje prsline

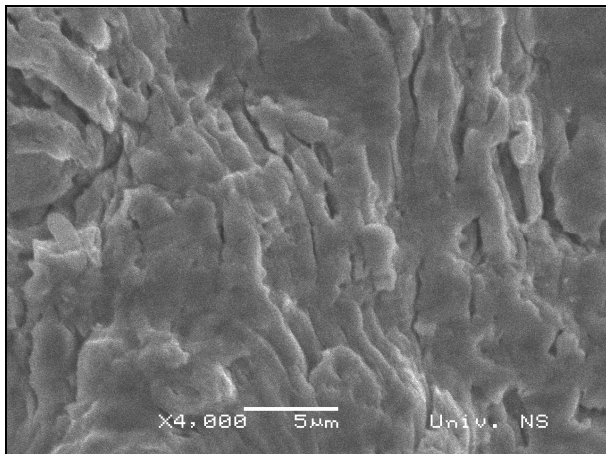
Na površini preloma se vidi kako počinje prslina da raste sa tipičnim brazdicama, sl. 6.56 - 6.59.



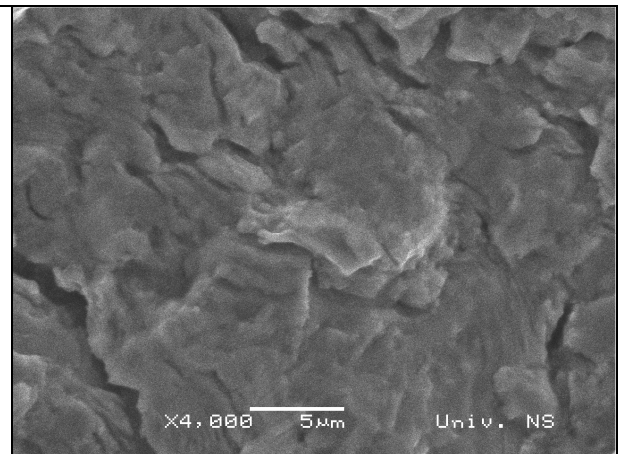
Slika 6.56. Površina preloma 500x



Slika 6.57. Površina preloma 2000x



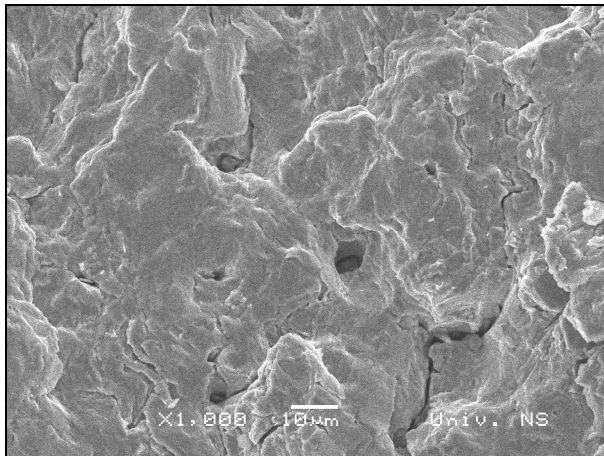
Slika 6.58. Površina preloma 4000x



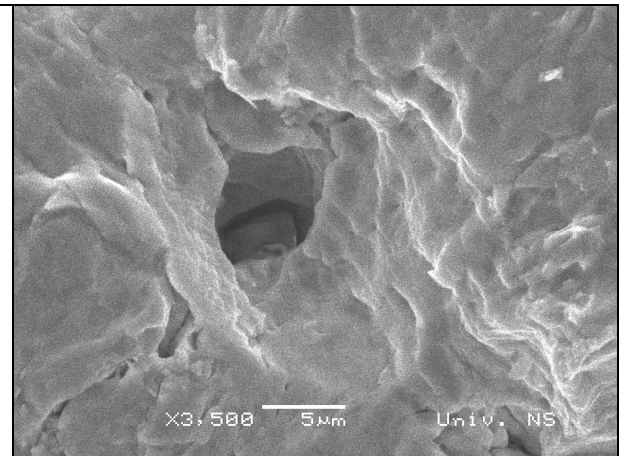
Slika 6.59. Površina preloma 4000x

MZIS eksploatisani materijal EM

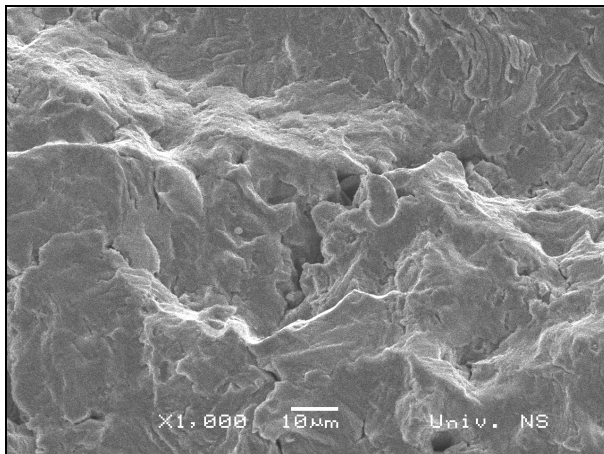
Na površini preloma se vidi kako počinje prslina da raste sa tipičnim brazdicama, sl. 6.60. Prisutan je veliki broj uključaka sl. 6.61 - 6.63.



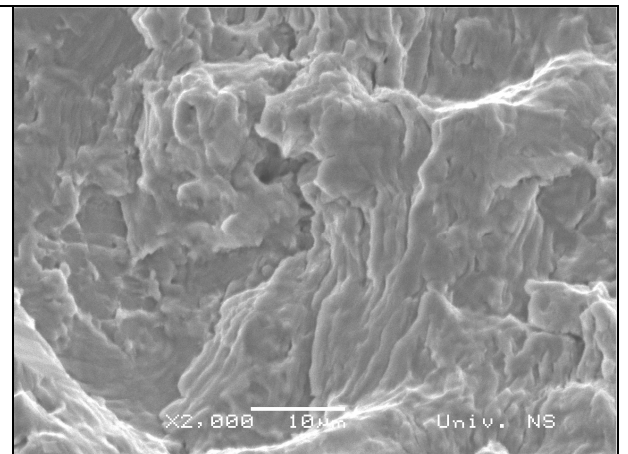
Slika 6.60. Površina preloma 1000x



Slika 6.61. Površina preloma 3500x



Slika 6.62. Površina preloma 1000x



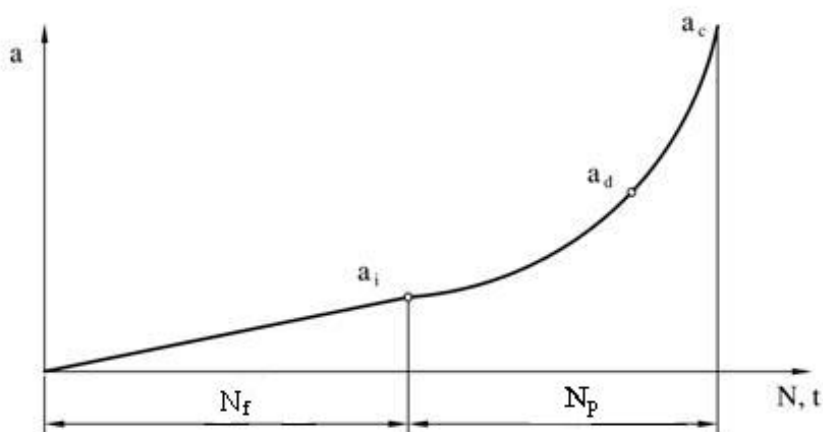
Slika 6.63. Površina preloma 2000x

7. METODE PROCENE PREOSTALOG VEKA KONSTRUKCIJE TORNJA

Ukupni proces zamora i loma se može podeliti u tri vremenske faze [7.1]:

1. Fazu stvaranja (inicijacije) mikroprslina a_i i njenog daljeg rasta do veličine nazvane inženjerskom prslinom.
2. Fazu propagacije (stabilnog rasta) makroprslina do kritične dužine a_c .
3. Fazu nestabilnog rasta i konačnog loma.

Pošto se mehanizam stvaranja (inicijacije) i rasta mikroprslina (faza 1) razlikuje od mehanizma propagacije (širenja) makroprslina (faza 2), potrebno je uvesti i dva različita pristupa za ocenu udela tih faza u ukupnom veku zamora, sl. 7.1. Za procenu broja ciklusa (N_f) potrebnih za iniciranje prslina obično se koristi koncept lokalnih deformacija, a za procenu broja ciklusa u fazi rasta (propagacije) prslina (N_p), koristi se koncept mehanike loma. Pošto prelaz iz faze iniciranja u fazu propagacije prslina nije lako definisati u praksi je najčešće slučaj, da se u cilju pojednostavljenja postupka određivanja ukupnog veka zamora uoči, koja faza zamora je dominantna i da se, zatim, ona samostalno posmatra. Prilikom konstruisanja mašina uobičajena je pretpostavka, da u njenim delovima nema grešaka, tada je značajnija prva faza, faza inicijacije prslina. Za male, pažljivo pripremljene delove mašina bez oštih zarezova, ovo je tipičan i logičan koncept. Nasuprot tome, u velikim konstrukcijama mnogo je bliža pretpostavka da inicijalne prslina već postoje i da treba odrediti njihovu propagaciju tj. kako se brzo one razvijaju i dokle je konstrukcija sigurna. Radni vek ovakvih konstrukcija kao što su brodovi, morske platforme za vađenje nafte, tornjevi, mostovi i posude pod pritiskom, uglavnom se sastoji od razvoja postojećih oštećenja.



Slika 7.1. Udeo perioda iniciranja N_f i perioda rasta zamorne prslina N_p u ukupnom veku zamora N_u [7.1].

Kao što je je u uvodu pomenuto procena veka konstrukcija se može podeliti u dva dela: (1) do pojave inicijalnog oštećenja (inicijacija, stvaranje) prslina i (2) za vreme širenja (propagacija, preostali vek) prslina. Predmet ovog istraživanja je usmeren na procenu veka elemenata konstrukcija u prisustvu prslina pod dejstvom cikličnih opterećenja.

Kada se radi o proceni preostalog veka konstrukcija u radu će se koristiti dva pristupa:

1. Procena preostalog veka elemenata konstrukcija primenim konvencionalnih zakona širenja prslina [7.2-7.7].
2. Procena preostalog veka elemenata konstrukcija koristeći metodu gustine energije deformacije (GED) [7.18, 7.19].

Oba pristupa baziraju na analizi širenja prslina pod dejstvom cikličnih opterećenja. U narednim razmatranjima će se prikazati kompletna metodologija ova dva suštinski različita pristupa za procenu preostalog veka konstrukcija. Suštinska razlika ova dva pristupa je u tome što prvi tj. konvencionalni pristup za analizu širenja prslina koristi dinamičke karakteristike materijala (Parisove konstante itd.), dok metoda GED koristi ciklične karakteristike materijala.

U narednim razmatranjima će se prikazati oba ova pristupa kao i njihova konkretna primena u proceni preostalog veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prslina. Takođe se predviđa poređenje proračunskih procena preostalog veka reprezentativnih (strukturalnih) elemenata sa inicijalnim oštećenjima koristeći ova dva pristupa sa eksperimentalnim rezultatima.

Softverski paket „PP_VEK“ - Procena Preostalog veka elemenata konstrukcija, služi za analizu širenja prslina i procenu preostalog veka, za bilo koji oblik oštećenja elemenata konstrukcija u vidu prslina, kako za ciklična opterećenja konstantne amplitude tako i pod dejstvom spektra opterećenja.

Korisnik može da bira koji metod za analizu širenja prslina želi da koristi. Tu može da bira (1) konvencionalne zakone širenja (Paris, Forman, itd.) ili (2) zakon širenja prslina na bazi Gustine Energije Deformacije (GED). U zavisnosti od izabranog zakona širenja prslina, koji u analizi želi da koristi, pojavljuju se i zahtevane geometrijske karakteristike i karakteristike materijala, koje korisnik treba da unese. Na isti način se postupa i sa cikličnim opterećenjima, bilo da se radi sa konstantnom amplitudom ili spektrom opterećenja.

Nadalje su prikazani rezultati primene konvencionalnih zakona i metoda gustine energije (GED) širenja prslina, koji su ugrađeni u ovaj softverski paket.

7.1. Procena preostalog veka elemenata konstrukcija primenim konvencionalnih zakona širenja prslina

7.1.1. *Opšte napomene*

Ovde se razmatra procena veka elemenata konstrukcija pod dejstvom promenljivih opterećenja, konstantnih amplituda i spektra opterećenja. Pažnja je usmerena na procenu veka reprezentativnih (strukturalnih) elemenata, kod kojih već postoje inicijalna oštećenja u vidu prslina. Veličine inicijalnih prslina se definišu u skladu sa preporukama o dopustivim oštećenjima za konstrukcije, za koje su takve preporuke sistematizovane. Svakako treba istaći da se lokacije inicijalnih oštećenja kod složenih konstrukcija danas, po pravilu, određuju primenom strukturalne analize na bazi metode konačnih elemenata (MKE). Procena preostalog veka se svodi na analizu širenja prslina.

Posebna pažnja u radu je usmerena na uspostavljanje metodologije za procenu preostalog veka konstrukcije tornja remontnog postrojenja za eksploataciju nafte i gasa. Toranj je u osnovi rešetkasta konstrukcija čiji su elementi napravljeni od konstrukcionog čelika. On je tokom eksploatacije, izložen dejstvu promenljivog opterećenja, te je pri dimenzionisanju ovih konstrukcija potrebno vršiti procene veka, kako do pojave inicijalnih oštećenja (prsline), tako i za vreme širenja prsline. Upravo predmet ovog istraživanja u ovom radu je usmeren na analizu širenja prsline, odnosno na procenu preostalog veka elemenata konstrukcije tornja od čelika (tačka 6.1).

Za tu svrhu su eksperimentalno, prvo određene dinamičke karakteristike materijala neophodne za modeliranje širenja prsline koristeći Parisov, Formanov ili pak neki drugi konvencionalni zakon širenja prsline, kao i žilavost loma materijala.

Za izabrani kritični element konstrukcije, potrebno je definisati lokaciju i oblik inicijalnog oštećenja u vidu prsline, a potom za isti, uspostaviti analitički izraz za faktor intenziteta napona (FIN). Kada se radi o rešetkastoj konstrukciji, kakav je toranj remontnog postrojenja za eksploataciju nafte, elementi tornja su standardni profili, pa se sa potrebnom tačnošću mogu koristiti analitički izrazi za faktore intenziteta napona. Pošto je u radu pažnja usmerena na uspostavljanje metodologije za procenu preostalog veka elemenata konstrukcije tornja remontnog postrojenja, za analizu je izabran reprezentativni (strukturni) element sa otvorom opterećen jednoosnim opterećenjem i inicijalnom prsline na jednoj strani otvora u zoni koncentracije napona.

7.1.2. Zakoni širenja prsline pri cikličnim opterećenjima konstantne amplitude

Za analizu širenja prsline uspostavljeni su različiti zakoni, od kojih se većina bazira na empirijskim osnovama. Razlika između pojedinih zakona ogleda se u njihovim mogućnostima da uključe pojedine efekte, poput: uticaja srednjeg napona, žilavosti loma materijala, K_{Ic} , prag zamora materijala, K_{th} , i slično. U narednim razmatranjima će biti prikazani neki od ovih zakona (modela) koji su se u praksi pokazali kompetentnim.

7.1.3. Parisov model

Parisov zakon širenja [7.2] za analizu širenja prsline predstavlja jedan od prvih modela uspostavljenih ranih 60-tih godina. Definisan je na čisto empirijskoj osnovi, i ima oblik:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (7.1)$$

gde su:

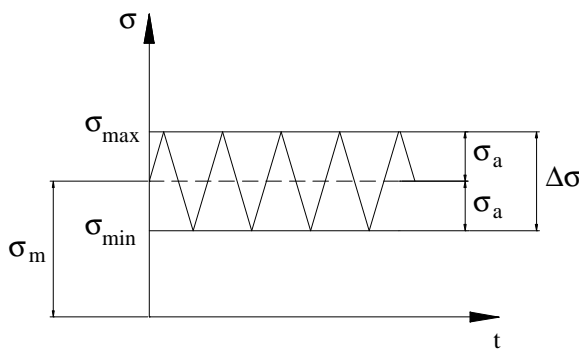
$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7.2)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) Y \sqrt{\pi a} \quad (7.3)$$

K - faktor intenziteta napona; C,m - Parisove konstante - karakteristike materijala;

N - broj ciklusa (odnosno ekvivalent vremena t)

Na sl. 7.2, grafički su ilustrovani pojedini naponi pri cikličnom opterećenju konstantne amplitude.



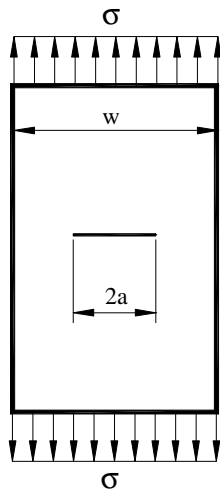
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (7.4)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} - \text{srednji napon}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} - \text{amplitudni napon}$$

Slika 7.2. Definisane napone pri cikličnom opterećenju konstantne amplitude.



Za svaki FIN, K, može se primeniti Parisova jednačina za analizu širenja prsline. Rešavanjem jednačine (7.1) dobija se zavisnost između dužine prsline, a , i broja ciklusa, N . Ilustracija zakona širenja prsline izvršena je za ploču širine, w , sa prsline dužine, $2a$, na sredini same ploče, opterećenoj aksijalnim opterećenjem normalno na pravac prsline, sl. 7.3, jednačina (7.1) se može napisati u obliku:

Slika 7.3. Model ploče sa prsline.

$$\frac{d(2a)}{dN} = C(Y\Delta\sigma)^m \pi^2 a^2 \quad (7.5)$$

ili

$$\frac{d(2a)}{a^2} = \frac{C}{2} (Y\Delta\sigma)^m \pi^2 dN \quad (7.6)$$

Integracijom gornje jednačine dobija se:

$$\frac{1}{a_i - a_c} = \frac{C}{2} (Y\Delta\sigma)^m \pi^2 N_i \quad (7.7)$$

Odnosno

$$N_i = \frac{2 \left[\frac{1}{a_i} - \frac{1}{a_c} \right]}{C \pi^2 (Y \Delta \sigma)^m} \quad (7.8)$$

gde su : N_i , a_i - tekuće vrednosti broja ciklusa i dužine prsline, dok je a_c - kritična dužina prsline.

Kritična dužina prsline, a_c , dobija se iz uslova, $K=K_c$:

$$K_c = Y \sigma \sqrt{\pi a_c} = \sqrt{\frac{w}{\pi a_c} \operatorname{tg} \frac{\pi a_c}{w}} \sigma \sqrt{\pi a_c} \quad (7.9)$$

Odnosno

$$a_c = \frac{w}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{K_c^2}{w \sigma^2} \quad (7.10)$$

Korišćenjem nekog od standardnih inkrementalnih postupaka za rešavanje jednačine (7.8), dobija se zavisnost a - N , kao i broj ciklusa, N_u , koji odgovara kritičnoj dužini prsline, a_c . Znači, N_u , predstavlja broj ciklusa pri kome nastaje rapidno širenje prsline, odnosno lom.

7.1.4. *Modifikovan Parisov model*

Zakon širenja prsline (7.1) ne uzima u obzir uticaj srednjih napona, što je posebno važno pri analizi širenja prsline pri opštim spektrima opterećenja. Uticaj srednjih napona prema koeficijentu asimetrije, R , sam Paris je modifikovao u obliku:

$$\frac{d(2a)}{dN} = C (K'_{\max})^m \quad (7.11)$$

gde je $K'_{\max} = K_{\max} \sqrt{1-R}$

odnosno

$$\frac{d(2a)}{dN} = C (Y \sigma_{\max} \sqrt{1-R})^m \pi^2 a^2 \quad (7.12)$$

ili

$$\frac{d(2a)}{a^2} = \frac{C}{2} (Y \sigma_{\max} \sqrt{1-R})^m \pi^2 dN \quad (7.13)$$

Integracijom poslednje jednačine u intervalu a_0 do a_c dobijaju se odgovarajući brojevi ciklusa u obliku:

$$N_i = \frac{2 \left[\frac{1}{a_i} - \frac{1}{a_c} \right]}{C \pi^2 (Y \sigma_{\max} \sqrt{1-R})^m} \quad (7.14)$$

Gornja zavisnost uključuje efekte srednjih napona preko odnosa R i zbog svoje jednostavnosti ima značajnu primenu u praksi.

7.1.5. Zakon širenja Walker-a

Napred je pomenuto da su iz osnovnog Parisovog zakona širenja prsline izvedeni mnogi drugi empirijski zakoni. U tu grupu spada i često korišćeni zakon Walker-a [7.3] koji ima oblik:

$$\frac{da}{dN} = C \left[(1-R)^n K_{\max} \right]^m \quad \text{za } R > 0 \quad (7.15)$$

i

$$\frac{da}{dN} = C \left[(1-R)^q K_{\max} \right]^m \quad \text{za } R < 0 \quad (7.16)$$

gde su: C , n , m , q - materijalne konstante. Osnovna razlika u odnosu na modifikovani Parisov zakon širenja (7.11) je, što ovaj model razdvaja zakon širenja prsline u zavisnosti od toga da li je koeficijent asimetrije ciklusa R pozitivan ili negativan.

7.1.6. Formanov zakon širenja

Ovaj model širenja prsline obuhvata uticaj srednjeg napona, koeficijenta asimetrije i žilavost loma materijala, K_c , i ima oblik [7.4]

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (7.17)$$

Za razliku od Parisov-ih modela širenja prsline, Formanov zakon uključuje povećanje brzine širenja prsline kada se K_{\max} približava vrednosti K_c . U osnovi, Formanova jednačina je primarno bila razvijena sa ciljem da modelira nestabilni domen širenja prsline. U većini praktičnih inženjerskih situacija, ovo područje se može zanemariti, zato što ne doprinosi značajno ukupnom veku. Područje nestabilnog širenja prsline je u osnovi interesantno u situacijama kada je vek usled širenja prsline reda veličine 10^3 ciklusa. Svakako treba istaći da se jednačina (7.17) redovno koristi i u domenu stabilnog širenja prsline (područje gde nagib $\log(da/dN)$ prema $\log \Delta K$ ima približno linearni karakter).

7.1.7. *Uključivanje efekata plastifikacije u zakon širenja*

U situacijama gde je efekat plastifikacije oko vrha prsline značajniji, te zbog toga linearno elastična mehanika loma (LEML) nije primenljiva, već je potrebno uvesti korekcije pri sračunavanju FIN. Za tu svrhu potrebno je korigovati i prethodne zakone širenja prsline. Ilustracije radi, jednačina (7.1), sa uključivanjem efekata plastifikacije ima oblik:

$$\frac{da}{dN} = C_p \left[Y \Delta \sigma \sqrt{\pi(a + r_p^*)} \right]^m \quad (7.18)$$

zamenom $C = C_p (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi})^m$ i integracijom dobija se:

$$a_i = \left[N_i C \left(1 - \frac{m}{2} \right) + (a_0 + r_{pl}^*)^{\frac{1}{1-m/2}} \right] - r_{pl}^* \quad (7.19)$$

Gornja jednačina predstavlja zavisnost između dužine prsline a_i i broja ciklusa N_i . Za rešavanje jednačine (7.19) i dobijanje zavisnosti $a - N$ koristi se neka od standardnih inkrementalnih tehnika.

7.1.8. *Procena veka strukturalnih elemenata pri opštem spektru opterećenja*

Značajan deo konstrukcija u eksploataciji izložen je promenljivim nivoima opterećenja. Kod nekih konstrukcija, poput tornjeva, ova promena amplituda opterećenja je veoma česta, te se smatra da su iste izložene opštem spektru opterećenja. U okviru opšteg spektra opterećenja tornja, postoje različite misije operacija. Svaka od ovih misija, ima poseban oblik spektra opterećenja. Prema projektim zahtevima, a u skladu sa namenom tornja, unapred se predviđa koliki je udeo pojedinih misija u okviru predviđenog veka upotrebe. To znači da za neke misije postoji značajan udeo spektra, čija se promena amplituda opterećenja ne javlja tako često već su isti izloženi jednom nivou opterećenja sa konstantnom amplitudom cikličnog opterećenja, pa potom drugim nivoom cikličnog opterećenja i tako redom. Ovakva opterećenja predstavljaju spektar opterećenja sa konstantnim amplitudama cikličnih opterećenja na pojedinim nivoima, a sam spektar se definiše kao spektar opterećenja sa višestepenim nivoima opterećenja. Postoje i druge misije gde se, pored stepenastih promena nivoa opterećenja u okviru spektra, javljaju i pojedinačna vršna opterećenja u vidu pojedinačnih “pikova”. Ova opterećenja se po pravilu ne javljaju često u okviru spektra, ali su njihovi efekti zbog visokih nivoa opterećenja značajni. Efekti ovih pikova na brzinu širenja nisu predmet ovog rada.

Predmet analize u ovom poglavlju usmeren je na numeričku procenu preostalog veka, pri spektru opterećenja sa konstantnim amplitudama na pojedinim nivoima ili preciznije procena preostalog veka pri ovom tipu spektra opterećenja. Kada se radi o opštim spektrima opterećenja, za procenu preostalog veka potrebno je izvršiti konverziju spektra opterećenja. Za tu svrhu potrebno je koristiti specijalne algoritme, koji od opštih amplituda spektra formiraju pravilne petlje histereze. U praksi se koriste različiti algoritmi za tu svrhu, poput “rain-flow” algoritma koji je ugrađen i u softverski paket “LOM-3” [2.16]. Sa aspekta zahtevane konverzije spektra opterećenja, napred pomenuti spektar sa višestepenim nivoima opterećenja je znatno jednostavniji.

Međutim, treba istaći da se u slučajevima prelaska sa jednog na drugi nivo opterećenja u okviru stepenastog spektra, javljaju efekti usporavanja ili ubrzanja širenja prsline. Zbog sistematičnosti treba samo istaći, da se u slučajevima kada se prelazi sa jednog nivoa na drugi u području opterećenja na zatezanje javlja usporenje širenja prsline. Predmet istraživanja u radu su efekti koji se mogu javiti kod spektra opterećenja gde je dominantno zatezanje. Za uključivanje efekata usporenja ili ubrzanja širenja prsline postoji više modela [7.5 - 7.9].

7.1.9. Procena preostalog veka

Opšti izraz za proračun širenja prsline pri opštem spektru opterećenja može se izraziti kao:

$$a_{i+1} = a_o + \sum_{i=1}^M \Delta a_i \quad (7.20)$$

gde su:

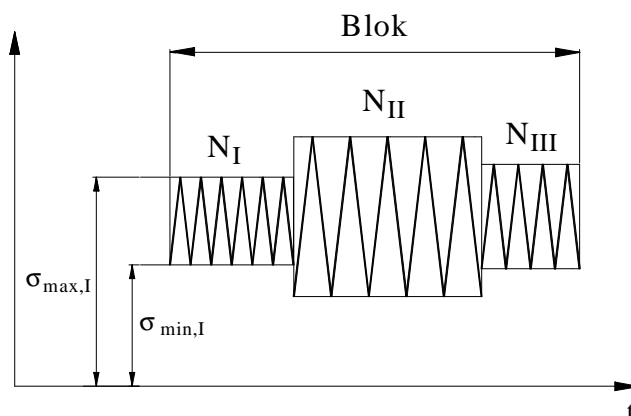
a_0 - inicijalna (početna) dužina prsline

Δa_i - ukupna dužina prsline za i -ti nivo spektra opterećenja

M - ukupni broj nivoa opterećenja u spektru

Za pojedine nivoe opterećenja, procena širenja prsline se vrši na ranije izložen način, koji se odnosi na konstantne amplitude opterećenja.

Na sl.7.4, dat je opšti izgled spektra opterećenja sa različitim nivoima opterećenja. Znači, ovaj tip spektra opterećenja uključuje efekte srednjih napona (σ_m). U okviru ovog istraživanja razmatran je i spektar opterećenja, koji uključuje i srednje napone, koji se u osnovi izražava u zakonima širenja prsline preko odnosa R .



Slika 7.4. Spektar opterećenja.

Znači, kod razmatranog spektra opterećenja poput ovoga ilustrovanog na sl.7.4., definiše se ukupan broj ciklusa za pojedine nivoe u okviru spektra, pri čemu broj nivoa nije ograničen. Moguće su različite kombinacije spektra, kao primera radi, da se definiše ukupan broj ciklusa za pojedine nivoe u okviru spektara, izuzev poslednjeg nivoa za koji se određuje broj ciklusa pri kome se javlja lom, N_u .

U opštim razmatranjima spektar opterećenja se definiše u vidu bloka, sl.7.4 pri čemu broj nivoa u bloku nije ograničen. Svaki blok, po pravilu, odgovara određenoj rudarskoj

operaciji, pa se na osnovu procenjenih broja blokova, N_{bl} , može jednostavno odrediti i vek strukturalnog elementa pod dejstvom cikličnih opterećenja.

7.1.10. Uticaj oblika spektra opterećenja na brzinu širenja prsline

Da bi se uključio uticaj prelaska sa jednog nivoa na drugi uspostavljeni su različiti analitički modeli [7.5 - 7.9]. Pošto je primarna pažnja usmerena na spektre opterećenja gde dominiraju opterećenja na zatezanje, to će se koristiti modeli pogodni za rešavanje ove vrste problema.

Kao što je napred pomenuto, promene nivoa opterećenja u okviru spektra mogu da dovedu do usporenja ili ubrzanja širenja prsline. Za tu vrstu analize prilagođen je model Walkera, kod koga zakon širenja prsline sada ima oblik:

$$\frac{da}{dN} = C \left[(1-R)^{n-1} \Delta K_{ef} \right]^m \quad (7.21)$$

gde su: C, m, n - konstante koje definišu karakteristike materijala; pri čemu je za izračunavanje efektivnog FIN, ΔK_{ef} , korišćen Vromanov izraz u obliku [7.8] :

$$\Delta K_{ef} = \frac{4}{3} \left[K_{max} - \frac{3}{4} (K_{min}) + \frac{1}{3} K_{max,ol} \sqrt{\frac{a_{ol} + r_{yol} - a_i}{r_{yol}}} \right] \quad (7.22)$$

gde su: K_{max} i K_{min} , maksimalne i minimalne vrednosti FIN za pojedine nivoje opterećenja u okviru spektra; a_{ol} i $K_{max,ol}$ su dužine prsline i vrednost FIN pre pojave preopterećenja. Zona plastifikacije oko vrha prsline definisana je za ravno stanje napona kao:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right]^2 \quad (7.23)$$

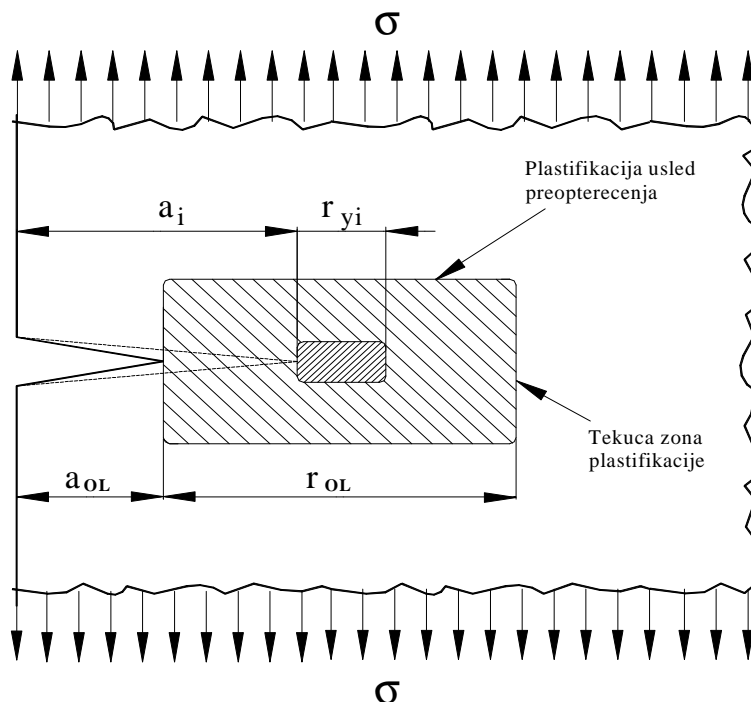
Na sl.7.5, prikazane su dve zone plastifikacije oko vrha prsline: tekuća i druga nastala usled preopterećenja. Tekuća zona plastifikacije se redovno javlja oko vrha prsline, dok je ova druga posledica promene jednog nivoa na drugi nivo u okviru spektra opterećenja.

Jednačina (7.22) može se preformulisati u oblik:

$$\Delta K_{ef} = (K_{max} - K_{min}) - \frac{1}{3} \left[\sqrt{\frac{a_{ol} + r_{yol} - a_i}{r_{yol}}} - K_{max} \right] \quad (7.24)$$

Iz gornje jednačine se jasno vidi da se numerička vrednost ΔK_{ef} uvek menja u zavisnosti od $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, bez obzira kakav oblik "stepenastog" spektra se javlja. Ovo dovodi do usporenja širenja prsline, što je u saglasnosti sa eksperimentima. Eksperimentima je utvrđeno da pojave plastifikacije oko vrha prsline dovode do

usporenja širenja prsline. Primarna pažnja u radu usmerena je na “stepenasti” spektar opterećenja, dok uticaj pojedinačnih “pikova” nije predmet ovog istraživanja.

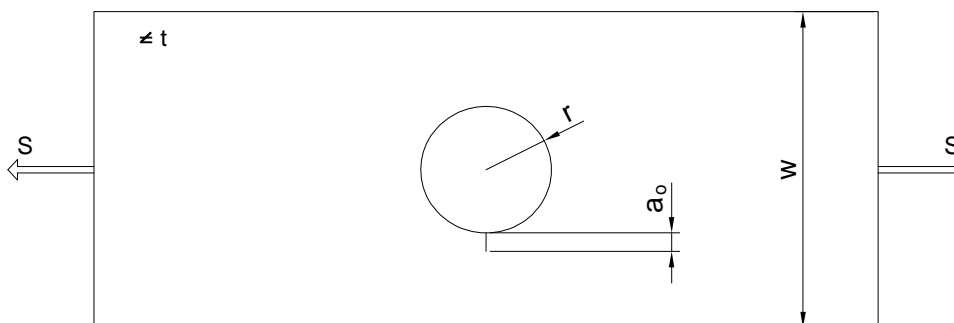


Slika 7.5. Zone plastifikacije - tekuća i usled preopterećenja.

7.1.11. Numerički primeri: Proračunska analiza širenja prsline primenom konvencionalnih zakona širenja

Za prikaz primene konvencionalnih zakona širenja prsline izabran je reprezentativni (strukturalni) element sa otvorom i inicijalnom prslinom u zoni koncentracije napona, sl. 7.6. Ovaj element je izrađen od istog materijala kao i sam toranj i opterećen je na zatezanje jednoosnim opterećenjem tako da je on reprezent za ilustraciju i uspostavljanje metodologije za analizu širenja i procene preostalog veka tornja.

Ovde je razmatran problem širenja prsline kod reprezentativnog elementa sa otvorom i jednom prslinom na otvoru, sl. 7.6, sa sledećim geometrijskim karakteristikama: $w=50$ mm, $r=5$ mm, $t=5$ mm, $a_0=3.5$ mm.



Slika 7.6. Geometrija reprezentativnog elementa sa otvorom i inicijalnom prslinom.

Analiza širenja prsline prikazanog reprezentativnog elementa prikazanog na sl. 7.6 je vršena napred pomenutim Programom „PP_VEK“ – Procena Preostalog veka elemenata konstrukcija. Za analizu širenja prsline korišćen je Parisov zakon širenja. Materijal reprezentativnog elementa je konstrukcioni čelik, od koga je napravljen toranj remontnog postrojenja (eksploatacioni materijal) i konstrukcioni čelik koji se koristi za njegovu popravku (novi materijal).

Za tu svrhu su eksperimentalno određene dinamičke karakteristike ponašanja materijala opisane pomoću Parisa C i m kao i žilavost loma materijala K_c (poglavlje 6).

$C=6.71 \cdot 10^{-12}$, $m=4$, za eksploatacioni materijal,

$C=1.97 \cdot 10^{-11}$, $m=3.31$, za novi materijal.

Reprezentativni element, sl. 7.6, je pod dejstvom cikličnih napona konstantne amplitude maksimalni napon $S_{max}= 80$ MPa (koji je uzet iz ranijih istraživanja [3.1]) i minimalni napon $S_{min}= 8$ MPa (koji je izračunat pomoću odnosa napona $R=0,1$)

U tabelama 7.1. i 7.2, kao rezultat proračunske analize širenja prsline primenom softverskog paketa „PP_VEK“ su prikazani svi neophodni ulazni podaci koji uključuju: geometrijske karakteristike razmatranog reprezentativnog elementa sa inicijalnom prsline, odgovarajući zakon širenja prsline i za njega neophodnim karakteristikama materijala, kao i tip promenljivog opterećenja. Program sve vreme daje vrednosti faktora intenziteta napona K_I i korektivne funkcije Y za porast dužine prsline od 0,5 mm, do kritične dužine prsline.

Za posmatrani primer uneti su sledeći podaci: Parisove konstante (C,m), dimenzije epruvete (širina $w=50$ mm, poluprečnik otvora $r=5$ mm), dužina prsline (početna 3,5 mm i kritična 17 mm, koja je dobijena konstruktivno, sl.7.6), priraštaj prsline 0,5 mm, maksimalni i minimalni napon (razlika napona i odnos napona $R=0,1$), prag zamora, žilavost loma materijala i modul elastičnosti.

Kompletni rezultati proračunske analize širenja prsline koristeći Parisov zakon dati su u tabeli 7.1 i 7.2.

Kao primarni izlazni rezultat iz navedenih tabela se dobija zavisnost između dužine prsline u zavisnosti od broja ciklusa, odnosno dobija se zavisnost $a - N$. Kao kriterijum za analizu širenja prsline je trenutak kada vrednost dužina prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm.

Tabela 7.1. Rezultati širenja prsline primenom Parisovog zakona za eksploatisani materijal.

Otvor sa jednom prskotinom

Ulazni podaci za GED

E: 204200 In': W: 0.05
 SigmaF: Psi: a0: 0.0035
 EpsilonF': DeltaKth0: 5.8 SigmaMax: 80
 n': Kc: 125 SigmaMin: 8
 Poluprecnik: 0.005

Parisove konstante

C: 0.00000000000671
 m: 4

Unesiteduzinu **Zakon širenja:**
 Exploatisani: 0.0005 Paris Izracunaj Brisi

	NUkupno	a0	a1	KI	y
	1025.936078	0.0035	0.004	16.583768949313	2.054687647
	1978.050737	0.004	0.0045	16.860472336884	1.969500281
	2874.989328	0.0045	0.005	17.088865253185	1.893741909
	3728.811172	0.005	0.0055	17.282813406559	1.826104655
▶	5336.821191	0.006	0.0065	17.604113224279	1.711000128
	6100.398879	0.0065	0.007	17.743772010814	1.661841100
	6841.055289	0.007	0.0075	17.874968058817	1.617361906
	7560.766726	0.0075	0.008	18.000501400073	1.577001753
	8260.978852	0.008	0.0085	18.122437431598	1.540280131
	9606.951535	0.009	0.0095	18.361202054941	1.476154702
	10254.16948	0.0095	0.01	18.479963146882	1.448083709
	10884.93728	0.01	0.0105	18.599168503152	1.422300775
	11499.68689	0.0105	0.011	18.719232972356	1.398570212
	12098.79462	0.011	0.0115	18.840441440158	1.376685446
	12682.60113	0.0115	0.012	18.962980568757	1.356464849
	13251.42530	0.012	0.0125	19.086962898653	1.337748245
	13805.57385	0.0125	0.013	19.212445228989	1.320393973
	14345.34781	0.013	0.0135	19.339442682670	1.304276404
	14871.04665	0.0135	0.014	19.467939497097	1.289283834
	15382.97079	0.014	0.0145	19.597897316980	1.275316691
	15881.42291	0.0145	0.015	19.729261572561	1.262286008
	16366.70849	0.015	0.0155	19.861966384330	1.250112105
	16839.13569	0.0155	0.016	19.995938329705	1.238723465
	17299.01491	0.016	0.0165	20.131099328151	1.228055761
	17746.65812	0.0165	0.017	20.267368841801	1.218051014
*					

Izracunate konstante

DeltaSigma: 72
 R: 0.1
 ac: 0.017
 C GED: Konstanta:

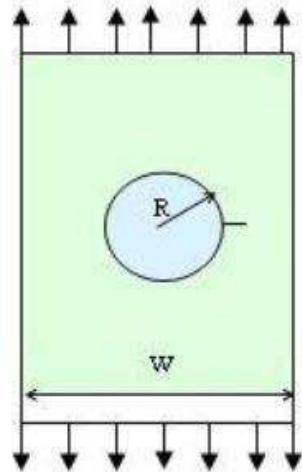


Tabela 7.2. Rezultati širenja prsline primenom Parisovog zakona za novi materijal.

Otvor sa jednom prskotinom

Ulazni podaci za GED

E	208200	In'		W	0.05
SigmaF		Psi		a0	0.0035
EpsilonF'		DeltaKth0	6.1	SigmaMax	80
n'		Kc	146	SigmaMin	8
		Poluprecnik	0.005		

Parisove konstante

C	0.0000000000197
m	3.31

Unesiteduzinu Zakon širenja:

Novi OM: 0.0005 Zakon širenja: Paris Izracunaj Brisi

	NUkupno	a0	a1	KI	y
	0	0.0035	0.004	16.583768949313	2.054687647
	2409.365456	0.004	0.0045	16.860472336884	1.969500281
	4674.390329	0.0045	0.005	17.088865253185	1.893741909
	6830.260594	0.005	0.0055	17.282813406559	1.826104655
	8900.021209	0.0055	0.006	17.452189060680	1.765496460
	10899.21909	0.006	0.0065	17.604113224279	1.711000128
	12838.57353	0.0065	0.007	17.743772010814	1.661841100
	16565.62649	0.0075	0.008	18.000501400073	1.577001753
	18362.49187	0.008	0.0085	18.122437431598	1.540280131
	20118.97756	0.0085	0.009	18.242298402035	1.506783542
	21837.13310	0.009	0.0095	18.361202054941	1.476154702
	23518.49348	0.0095	0.01	18.479963146882	1.448083709
	25164.23491	0.01	0.0105	18.599168503152	1.422300775
	26775.28595	0.0105	0.011	18.719232972356	1.398570212
	28352.40719	0.011	0.0115	18.840441440158	1.376685446
	29896.24826	0.0115	0.012	18.962980568757	1.356464849
▶	32886.36604	0.0125	0.013	19.212445228989	1.320393973
	34333.69714	0.013	0.0135	19.339442682670	1.304276404
	35749.89053	0.0135	0.014	19.467939497097	1.289283834
	37135.45601	0.014	0.0145	19.597897316980	1.275316691
	38490.91005	0.0145	0.015	19.729261572561	1.262286008
	39816.77884	0.015	0.0155	19.861966384330	1.250112105
	41113.59963	0.0155	0.016	19.995938329705	1.238723465
	42381.92079	0.016	0.0165	20.131099328151	1.228055761
	43622.30103	0.0165	0.017	20.267368841801	1.218051014
*					

Izracunate konstante

DeltaSigma	72
R	0.1
ac	0.017
C GED	
Konstanta	

7.2. Procena preostalog veka elemenata konstrukcija koristeći metodu gustine energije deformacije

U ovom poglavlju data je metoda za procenu preostalog veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prslina primenom metode Gustine Energije Deformacije (GED).

Ovde je prikazana kompletna metoda za analizu širenja prslina, tj. procenu preostalog veka elemenata konstrukcije tipa ploče sa otvorom i jednom inicijalnom prslinom. Metoda je bazirana na energetskom kriterijumu, odnosno gustini energije deformacije (GED). Metoda GED koristi ciklične karakteristike materijala iz domena malocikličnog zamora (MCZ), odnosno iste karakteristike materijala koje se koriste i za procenu veka do pojave inicijalnog oštećenja. Svakako, kao i kod konvencionalnih zakona širenja prslina neophodno je poznavanje faktora intenziteta napona. Faktori intenziteta napona mogu biti određeni analitičkim putem ili primenom numeričkih metoda poput metode konačnih elemenata (MKE). Budući da je u radu pažnja usmerena na uspostavljanje metodologije za procenu preostalog veka tornja remontnog postrojenja, koji je, u osnovi, izrađen od različitih profila to će se ovde pažnja usmeriti na dvodimenzione reprezentativne (strukturne) elemente sa pretpostavljenim inicijalnim prslinama kroz celu debljinu ovih elemenata. Ovde će se potom ilustrovati primena same metode GED za procenu veka strukturalnih elemenata u uslovima dejstva aksijalnog opterećenja konstantne amplitude (kao reprezenta delova konstrukcije tornja). Rezultati numeričke simulacije širenja prslina na bazi metode gustine širenja prslina će se potom porediti i verifikovani sa sopstvenim eksperimentalnim istraživanjima.

Metoda gustine energije deformacije, za razliku od konvencionalnih zakona širenja prslina razmatra u osnovi promenu energije za vreme inkrementa širenja prslina. Osnovne postavke same metode širenja prslina na bazi energije odnosno na njenoj promeni za vreme širenja prslina su date u radovima [7.10, 7.11, 7.12].

Postoji serija fizičkih modela predloženih u nekoliko proteklih decenija, kojima se predviđa rast prslina (obično odnos $da/dN - \Delta K$). Relacija rasta prslina između lokalnog oštećenja ispred prslina privlači posebnu pažnju, jer imaju tendenciju da povežu mikroskopski zamor sa cikličnim karakteristikama materijala kod MCZ ili sa mikrostrukturnim parametrima. Dosta modela je predviđalo rast prslina pomoću MCZ, ali su poboljšanja i dalje potrebna, da bi se prevazišli određeni nedostaci.

Ova metoda može da predvidi preostali vek za mešovite oblike prslina [7.11]. Brzina rasta prslina ne zavisi samo od amplitude opterećenja, već i od pravca širenja prslina. Na pravac rasta prslina utiče mnogo faktora, kao što su: tip opterećenja, geometrija strukture i osobine materijala.

Model brzine rasta prslina data je izrazom (7.25):

$$\frac{da}{dN} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E \left(\frac{dW}{dV}\right)_c} \left[\frac{A(1-2\nu)}{\varepsilon_f' E \sqrt{2\pi}} x \left(\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E \left(\frac{dW}{dV}\right)_c} \right)^{1/2-\beta} \right]^{1/m} \Delta K_I^{2+2(1-\beta)/m} \quad (7.25)$$

Preostali vek rasta prsline od početne brzine a_0 do kritične brzine a_c dat je izrazom (7.26):

$$N_p = \frac{2\pi E \left(\frac{dW}{dV}\right)_c}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{A(1-2\nu)}{\varepsilon_f' E \sqrt{2\pi}} x \left(\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E \left(\frac{dW}{dV}\right)_c} \right)^{1/2-\beta} \right]^{-1/m} x \int_{a_0}^{a_c} \Delta K_I^{2(\beta-1)/m-2} da \quad (7.26)$$

u jednačinama (7.25) i (7.26) su: $n', \sigma_f', \varepsilon_f', b, c$ su ciklične karakteristike materijala, E - modul elastičnosti materijala, ν - Pasonov koeficijent materijala, ΔK_I - interval FIN, $\left(\frac{dW}{dV}\right)_c$ kritična vrednost gustine energije, A, β, m - konstante materijala.

Validnost modela je prikazana u 2 slučaja: prsline u centru ploče i prsline na ivici rupe u ploči. Za 1. slučaj FIN je analitički određen, dok je za 2. slučaj izračunat pomoću metode MKE. Dobijeni rezultati su upoređeni sa eksperimentom i pokazuju dobro slaganje za materijal legura Al 2024 - T3.

Kujawski [7.13], je model brzine rasta prsline dao sledećim izrazom (7.27):

$$\frac{da}{dN} = 2\delta^* \left[\frac{\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2}{4(1+n')(\sigma_f' - \sigma_m^*)\varepsilon_f' \pi E \delta^*} \right] \quad (7.27)$$

u jednačini (7.27) su: $n', \sigma_f', \varepsilon_f', b, c$ ciklične karakteristike materijala, ΔK_{th} - prag intenziteta napona, ΔK - interval napona, δ^* - dužina process zone u kojoj se pretpostavlja zamorno oštećenje (zona oštećenja), σ_m^* - lokalni srednji napon u zona oštećenja, E - modul elastičnosti materijala.

U jednačini (7.27) u obzir su uzeti lokalni srednji naponi, koji su u suprotnosti sa odnosom opterećenja. Međutim treba napomenuti da δ^* može da se odredi eksperimentalno, pre nego što je urađeno realno predviđanje odnosa ($da/dN - \Delta K$). Drugim rečima jednačina (7.27) nije realno predviđena, zato što su međusobno povezani eksperimentalni podaci rasta prsline.

Teoretski pristup poboljšanja brzine rasta prsline modela [7.12], koji je zasnovan na akumulaciji oštećenja, koristi ciklične karakteristike materijala kod MCZ. U ovom modelu se umesto odnosa ($da/dN - \Delta K$) koristi se odnos ($da/dN - \Delta J$), ali predviđanje

rasta prsline je veoma osetljivo na određivanje dužine inicijalne prsline, što nije uvek izvodljivo.

Model brzine rasta prsline dat je izrazom (7.28):

$$\frac{da}{dN} = \frac{\delta^*}{N^*} = \left[\frac{\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2}{\frac{1}{2} \pi E (\sigma'_y)^{1-\frac{1}{\beta}} [4 \varepsilon'_f (1+n') (\sigma'_f - \sigma_m^*)]^{\frac{1}{\beta}}} \right] \quad (7.28)$$

gde je: σ'_y - ciklična granična čvrstoća, N^* - broj ciklusa za širenje prsline kroz δ^* .

Zadovoljavajući model je našao primenu kod čelika visoke čvrstoće A533-B1 sa različitim nivoima opterećenja.

U prilogu 10.3. dat je zbirni pregled rezultata drugih autora pronađenih u literaturi za različite materijale, a posebno cikličnih karakteristika materijala, koje se koriste u metodi gustine energije (GED) za procenu preostalog veka.

7.2.1. Osnove metode GED

Spoljašnja opterećenja koja deluju tokom radnog veka. na elemente struktura odnosno cele konstrukcije, su proizvoljno promenljivog cikličnog karaktera. Takva promenljiva ciklična opterećenja postepeno razaraju element strukture od ciklisa do ciklusa i mogu prouzrokovati lom usled zamora. Zamor zbog svoje složenosti može biti razmatran kroz dve faze. prvu fazu koja je poznata kao faza do pojave inicijalnog oštećenja [7.14] i drugu, fazu širenja prsline [7.15]. Predmet ovog istraživanja je usmeren na drugu fazu, odnosno na procenu preostalog veka elemenata konstrukcija sa inicijalnim oštećenjima u vidu prsline. Bez obzira o kojoj fazi je reč pored realizacije velikog broja eksperimenata, neophodno je razvijati nove i poboljšati već postojeće numeričke modele za procenu veka. U inženjerskoj praksi primena takvih numeričkih modela za procenu veka omogućava da se relativno brzo, matematičkim putem, proceni vek odgovarajućeg elementa strukture. Svaki od numeričkih modela za procenu veka mora biti baziran na odgovarajućim kriterijumima.

Lom elementa strukture se događa u fazi širenja prsline tako da posebna pažnja mora biti usmerena baš na tu fazu. Pošto do loma najčešće dovodi prisustvo plastičnih deformacija, značajno je da se u okviru kriterijuma analizira i uključi u razmatranje prisustvo kako elastične tako i plastične deformacije. Na taj način i proračun veka za fazu širenja prsline realnije opisuje stvarno ponašanje elementa strukture u uslovima dejstva cikličnog opterećenja. Jedan od kriterijuma koji uključuje u razmatranje prisustvo i elastične i plastične deformacije je energetska kriterijum. Prilikom formulisanja energetskog kriterijuma mogu biti korišćeni različiti parametri. Međutim najbolje je koristiti one parametre pomoću kojih adekvatno može biti definisana energija koja se absorbuje u materijalu i kasnije dovodi do loma elementa strukture. Tako, modeli koji su formulisali Weertman [7.16] i Burck [7.17], su bazirani na parametrima malocikličnog zamora. Oni su došli do zaključka da je moguće odrediti absorbovanu energiju do loma uz poznavanje malocikličnih parametara. Nešto kasnije, Liu [7.18] kao i mnogi drugi [7.19, 7.20, 7.10, 7.22], u okviru svojih istraživanja su

koristili parametre malocikličnog zamora prilikom procene veka elemenata struktura sa inicijalnim oštećenjima. Značajan doprinos dali su Chand i Garg [7.19], jer su u svom modelu izvršili modifikaciju modela Weertman-a, uz korišćenje Rice-ove metode superpozicije [7.21].

Cilj ovog rada je da se razvije pogodan i efikasan numerički pristup koji omogućava procenu veka elemenata konstrukcije za fazu širenja prslina. Pored toga, formulisani model je baziran na energetskom kriterijumu [7.22, 7.14].

U okviru predloženog modela/procedure koriste se isti parametri koji su potrebni za fazu do pojave inicijalnog oštećenja. U inženjerskoj praksi kada je reč o tornju remontnog postrojenja, postoje reprezentativni (strukturni) elementi sa geometrijskim diskontinuitetima u vidu otvora, gde se javlja koncentracija napona, a pri dugotrajnoj eksploataciji i pojava inicijalnih prslina. Upravo predmet rada je uspostava efikasnog pristupa za procenu preostalog veka elemenata pomenutog tornja sa geometrijskim diskontinuitetima u vidu kružnog otvora sa inicijalnim oštećenjem u vidu prslina, a pod dejstvom cikličnih opterećenja konstantne amplitude.

7.2.2. Formulisanje modela za procenu preostalog veka na bazu GED

Prilikom procene veka elemenata konstrukcije sa inicijalnim oštećenjem neophodno je formulisati funkcionalnu zavisnost između gradijenta širenja prslina da/dN i faktora intenziteta napona K_I .

Najveća akumulacija oštećenja se javlja u proces zoni [7.18, 7.23]. Samim tim, neophodno je definisati a nakon toga i odrediti energiju koja prouzrokuje oštećenje u proces zoni. Za zonu oko vrha prslina odnosno, proces zonu moguće je definisati energiju nastalu usled plastične deformacije ω_p u ciklusu po jedinici dužine kao funkcije opsega faktora intenziteta napona ΔK_I i to:

$$\omega_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2}{E I_{n'}} \psi \quad (7.29)$$

gde su: n' - eksponent deformacionog ojačanja pri cikličnom opterećenju, E - Young-ov moduo elastičnosti, $I_{n'}$, ψ - konstante zavisne od indeksa ojačanja n' .

Pošto je definisana zavisnost za energiju usled plastične deformacije ω_p kao funkcija ΔK_I , sada je neophodno uspostaviti zavisnost između gradijenta širenja prslina da/dN i ω_p . Prilikom uspostavljanja potrebne zavisnosti mora se poći od činjenice da dolazi do širenja prslina ukoliko energija pri plastičnoj deformaciji ω_p u ciklusu, dostigne apsorbovanu energiju u istom ciklusu W_c , odnosno:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\omega_p}{W_c} \quad (7.30)$$

U jednačini (7.30) apsorbovana energija u ciklusu W_c može biti definisana ukoliko je poznata relacija napon - deformacija odnosno jednačina ponašanja materijala. Pogodna

relacija za ponašanje materijala kojom se uključuje i elastično i plastično ponašanje je Ramberg - Osgood-ova jednačina [7.24]:

$$e_a = \frac{S_a}{E} + \left(\frac{S_a}{k'} \right)^{1/n'} \quad (7.31)$$

gde su: e_a - amplituda deformacije, S_a - amplituda napona, k' - koeficijent čvrstoće pri cikličnom opterećenju.

Ukoliko je jednačina ponašanja materijala data jednačinom (7.31), apsorbovana energija u ciklusu W_c predstavlja površinu ispod te krive u koordinatnom sistemu $S - \epsilon$, odnosno:

$$W_c = \frac{4}{1+n'} \sigma_f' \epsilon_f' \quad (7.32)$$

gde su: σ_f' - koeficijent čvrstoće pri zamoru, ϵ_f' - koeficijent zamorne duktilnosti.

Konačno, ukoliko se u jednačinu (7.30) zamene jednačine (7.29) i (7.31) dobija se funkcionalna zavisnost izmedju gradijenta širenja prsline i faktora intenziteta napona. Nakon toga, dobijena jednačina može biti integraljena od inicijalne dužine prsline a_i do krajnje dužine prsline a_c da bi se dobila relacija koja se može koristiti za procenu veka elemenata struktura koje sadrže inicijalno oštećenje, odnosno:

$$N = \frac{(1-n')\psi}{4 E I_{n'} \sigma_f' \epsilon_f'} \int_{a_i}^{a_c} (\Delta K_I - \Delta K_{th})^2 da \quad (7.33)$$

gde je ΔK_{th} - konstanta (opseg praga FIN), koja zavisi od $R=S_{min}/S_{max}$, odnosno

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1 - R)^\gamma \quad (7.34)$$

Gde je γ konstanta materijala, koja varira od 0 do 1 [7.25, 7.26]. Za većinu materijala uzima se $\gamma = 0.71$ [7.27]. Znači jednačina (7.33) predstavlja zakon širenja prsline na bazi metode gustine energije deformacije (GED). Očigledno je da kod ove zavisnosti se koriste ciklične karakteristike materijala iz domena malocikličnog zamora (MCZ) umesto dinamičkih parametara ponašanja materijala kod konvencionalnih zakona širenja prsline poput Parisa, Formana i drugih. Osnovna prednost ovog pristupa je u tome da se za analizu širenja prsline koriste iste ciklične karakteristike materijala koje se koriste i za procenu veka do pojave inicijalnog oštećenja.

7.2.3. Faktor intenziteta napona

U jednačini (7.33) za analizu širenja prsline i za procenu broja ciklusa za vreme širenja prsline sve do konačnog loma koriste se kao funkcije faktori intenziteta napona K_I . Faktor intenziteta napona je veličina kojom se u proračun uključuje geometrija

elementa strukture sa inicijalnom prslinom kao i tip spoljašnjeg opterećenja. U analitičkoj relaciji za faktor intenziteta napona, oblika:

$$K_I = Y S \sqrt{\pi a}, \quad (7.35)$$

Y predstavlja korektivnu funkciju kojom se opisuje geometrija elementa strukture i tip opterećenja, a - dužina prsline i S - napon.

U okviru numeričkih primera sa jednoosijalnim opterećenjem izabran je reprezentativni element sa otvorom sl.7.8, poluprečnika r i inicijalnom prslinom dužine a_0 . Korektivna funkcija za ovaj primer data je sledećom formulom [7.23]:

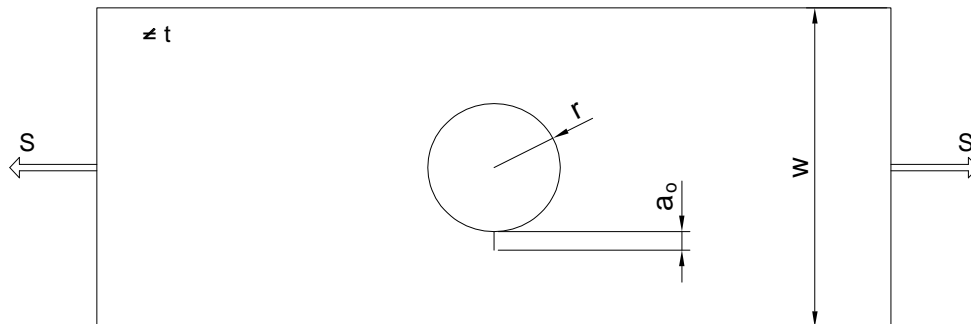
$$Y = z Y_w Y_{b1} \quad (7.36)$$

i

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\cos\left(2r \frac{\pi^2 w}{180}\right)}}; \quad Y_w = \sqrt{\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi(2r+a)}{2(w-a)}\right)}}; \quad (7.37)$$

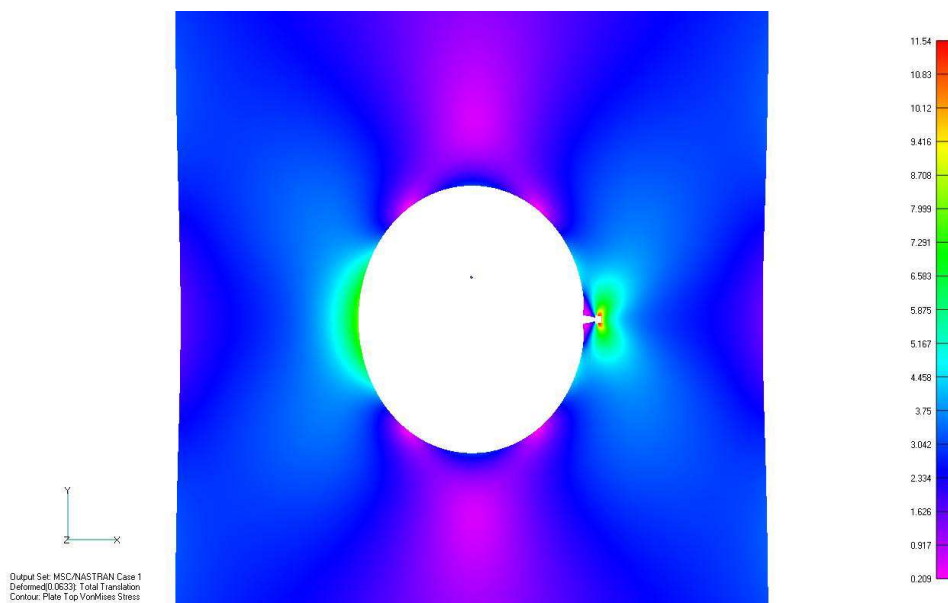
$$Y_{b1} = 0.70833 + 1.29275 e^{\frac{-(a/w)}{0.17197}} + 0.29223 e^{\frac{-(a/w)}{4.81617}} + 1.10057 e^{\frac{-(a/w)}{1.04267}} \quad (7.38)$$

Gde je r radijus otvora i a - dužina prsline. Analitički izraz za faktor intenziteta napona (FIN) (7.35), je verifikovan korišćenjem metode konačnih elemenata (MKE).



Slika 7.7. Geometrija reprezentivni elementa sa otvorom i inicijalnom prslinom.

Sl.7.7, prikazuje izgled reprezentivnog (strukturnog) elementa sa otvorom i jednom inicijalnom prslinom ($w=50$ mm, $r=5$ mm, $t=5$ mm, $a_0=3.5$ mm). Za proveru analitičke jednačine (7.35), korišćena je MKE. FIN (7.35), se izračunava koristeći MKE. Tačnije FIN se dobija proračunom singularnih konačnih elemenata različitih dužina prsline. Na osnovu diskretnih vrednosti FIN izračunatih MKE dobija se analitička formula u obliku polinoma za FIN poterbnih za širenje prsline. To potvrđuje jednačina (7.35). Reprezentivni prikaz strukturnog elementa sa otvorom i jednom prslinom dužine $a = 0,00127$ m, u MKE dat je na sl.7.8.



Slika 7.8. Analiza napona za reprezentativni element sa otvorom i jednom prslinom koristeći MKE ($F = 5200$ N and $a = 0.00127$ m).

Nakon analize napona, MKE za razne vrednosti dužina prsline mogu se odrediti FIN. Dobijene vrednosti date su u tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Poređenje analiza FIN.

	a_0 [mm]	K_I^{FEM}	K_I^{Anal} (7.35)	Δ [%]
1	1.27	12.8	12.23	4.45
2	2.5	15.4	15.6	-1.30
3	4	17.4	18.24	-4.83
4	6	19.6	21.07	-7.50

Rezultati u tabeli 7.3. pokazuju poređenja između analitičkih i numeričkih rezultata FIN za različite dužine prsline a . Zbog te činjenice relacije za korektivnu funkciju (7.36), (7.37), (7.38), se mogu koristiti u procesu predviđanja rasta prsline reprezentativnog elementa datog na sl. 7.8.

7.2.4. Numerički rezultati širenja prsline na bazi GED

Metoda za proračun veka elemenata konstrukcija za fazu širenja prsline formulisana u tačkama 7.2.2 i 7.2.3 je primenjena na reprezentativnom elementu sa otvorom i jednom prslinom pod dejstvom cikličnih opterećenja konstantne amplitude za eksploatisani i novi materijal tornja. Za ove materijale su eksperimentalno određene malociklične karakteristike materijala koje su neophodne za metdu GED, odnosno za analize širenja prsline na bazi gustine energije deformacije. U prvom delu su prikazani eksperimentalni rezultati širenja prsline za reprezentativni element sa otvorom i inicijalnom prslinom, kao na sl. 7.7. Potom je za ovaj element izvršena proračunska analiza širenja prsline koristeći metodu GED.

Tabela 7.4. Kompletni rezultati numeričke simulacije širenja prsline koristeći metod GED za eksploatisani materijal.

Otvor sa jednom prskotinom

Ulazni podaci za GED

E	204200	ln'		W	0.05
SigmaF	1290.2	Psi		a0	0.0035
EpsilonF'	0.04176	DeltaKth0	5.8	SigmaMax	80
n'	0.23932	Kc	125	SigmaMin	8
		Poluprecnik	0.005		

Parisove konstante

C	
m	

Unesiteduzinu **Zakon širenja:** GED Izracunaj Brisi

Exploatisani

	NUkupno	a0	a1	KI	y
	0	0.0035	0.004	16.583768949313	2.054687647
	915.8688056049	0.004	0.0045	16.860472336884	1.969500281
	1778.032353655	0.0045	0.005	17.088865253185	1.893741909
	2599.941715007	0.005	0.0055	17.282813406559	1.826104655
	3390.303359554	0.0055	0.006	17.452189060680	1.765496460
	4154.944060396	0.006	0.0065	17.604113224279	1.711000128
	4897.859947844	0.0065	0.007	17.743772010814	1.661841100
	5621.842890424	0.007	0.0075	17.874968058817	1.617361906
	7020.371032352	0.008	0.0085	18.122437431598	1.540280131
	7697.373419070	0.0085	0.009	18.242298402035	1.506783542
	8360.644310562	0.009	0.0095	18.361202054941	1.476154702
	9010.759122066	0.0095	0.01	18.479963146882	1.448083709
	9648.161350786	0.01	0.0105	18.599168503152	1.422300775
	10273.20328474	0.0105	0.011	18.719232972356	1.398570212
	10886.17505099	0.011	0.0115	18.840441440158	1.376685446
	11487.32534508	0.0115	0.012	18.962980568757	1.356464849
	12078.87616521	0.012	0.0125	19.086962898653	1.337748245
	12655.03319562	0.0125	0.013	19.212445228989	1.320393973
	13777.94802172	0.0135	0.014	19.467939497097	1.289283834
	14323.08960271	0.014	0.0145	19.597897316980	1.275316691
	14857.61017928	0.0145	0.015	19.729261572561	1.262286008
	15381.70430407	0.015	0.0155	19.861966384330	1.250112105
	15895.56916555	0.0155	0.016	19.995938329705	1.238723465
	16399.40465563	0.016	0.0165	20.131099328151	1.228055761
	16893.41314536	0.0165	0.017	20.267368841801	1.218051014

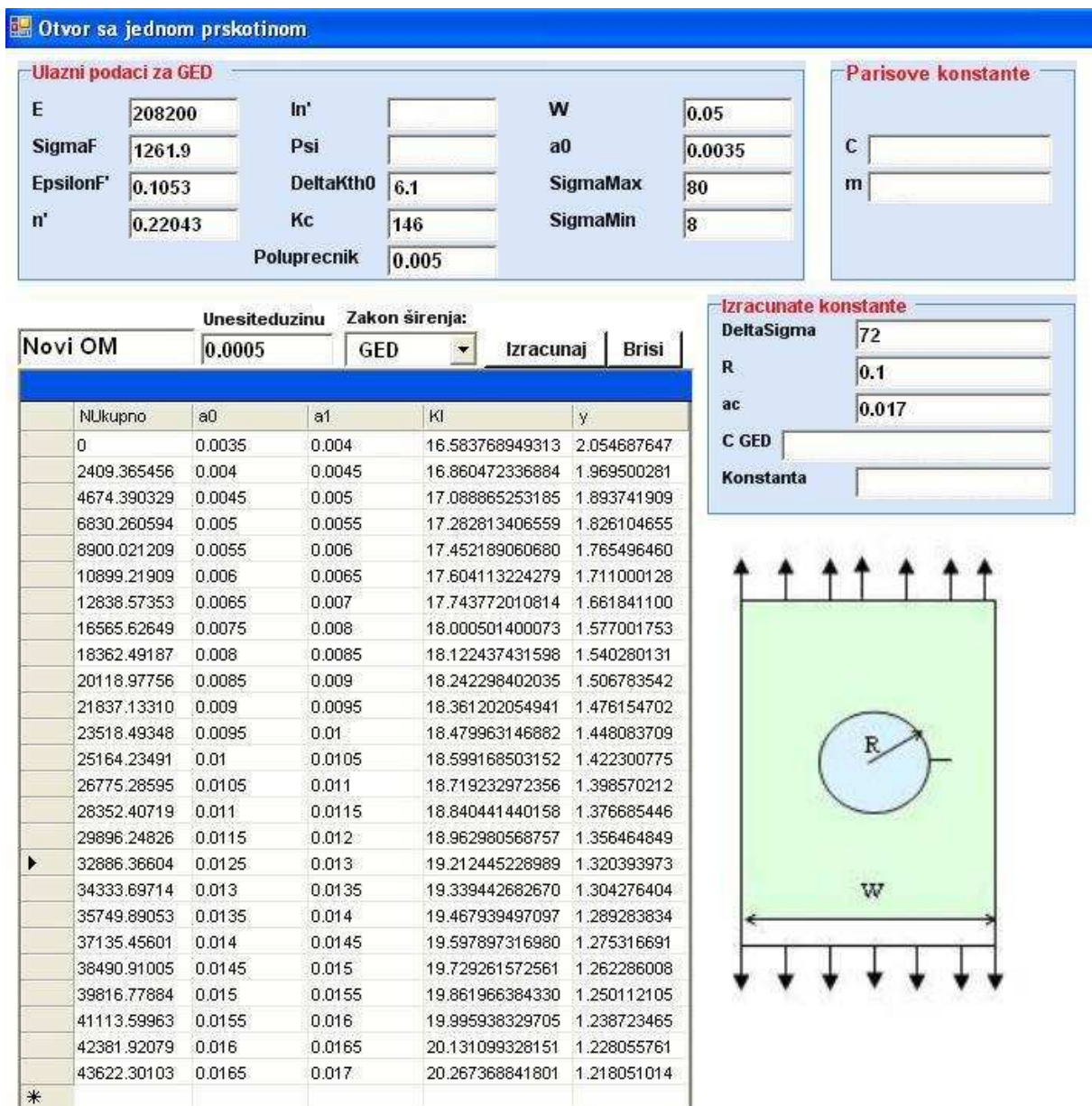
Izracunate konstante

DeltaSigma	72
R	0.1
ac	0.017
C GED	
Konstanta	

The diagram shows a rectangular plate of width W and height H . A central circular hole of radius R is present. The plate is subjected to a uniform distributed load (represented by upward arrows) on its top surface and a uniform distributed load (represented by downward arrows) on its bottom surface.

*

Tabela 7.5. Kompletni rezultati numeričke simulacije širenja prsline koristeći metodu GED za novi materijal.



U tabelama 7.4. i 7.5, kao rezultat proračunske analize širenja prsline na bazi gustine energije deformacije primenom softverskog paketa „PP_VEK“ su prikazani svi neophodni ulazni podaci, koji uključuju: geometrijske karakteristike razmatranog reprezentativnog elementa sa inicijalnom prslinom (kao za tabele 7.1 i 7.2), kao i zakon širenja prsline na bazi Gustine Energije Deformacije (GED) i za njega neophodne ciklične karakteristike materijala, kao i tip promenljivih opterećenja (bilo da se radi o cikličnom opterećenju sa konstantnom amplitudom ili o spektru opterećenja).

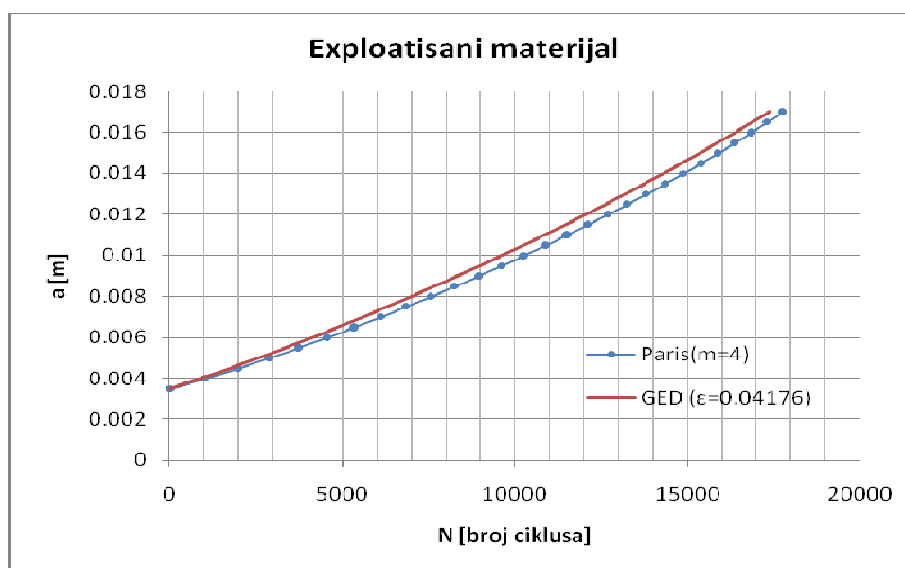
Kao primarni izlazni rezultat se dobije zavisnost između dužine prsline u zavisnosti od broja ciklusa, odnosno dobije se zavisnost $a - N$. Kao kriterijum za analizu širenja prsline je isti kao u tački 7.1, tj. trenutak kada vrednost dužine prsline prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm.

7.3. Poređenje (verifikacija) rezultata širenja prslina primenom različitih pristupa

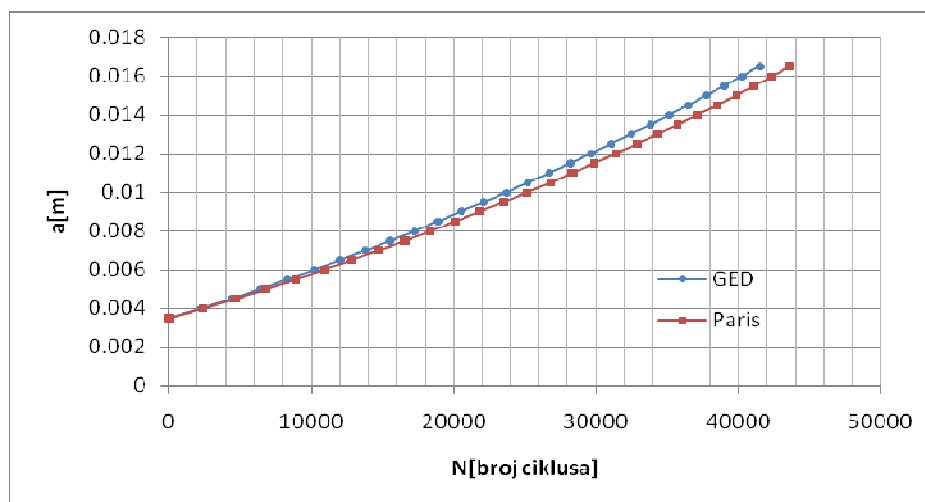
Predmet analize, koji je prethodno prikazan, je primer ploče sa otvorom i jednom inicijalnom prslinom. Ovde su samo prikazani uporedni rezultati širenja prslina koristeći dva potpuno različita pristupa.

Na sl. 7.9 i 7.10, prikazani su rezultati širenja prslina koristeći dva pristupa i to:

1. Konvencionalni Parisov zakon širenja prslina i
2. Metoda Gustine Denergije (GED) deformacije



Slika 7.9. Analiza širenja prslina primenom konvencionalnog zakona širenja (Paris) sa metodom GED za eksploatisani materijal.



Slika 7.10. Analiza širenja prslina primenom konvencionalnog zakona širenja (Paris) sa metodom GED za novi materijal.

Iz dijagrama, sl. 7.9 i 7.10, koji ilustruju širenje prsline primenom konvencionalnog Parisovog zakona širenja prsline i metode Gustine Energije Deformacije (GED) je evidentna dobra saglasnost rezultata.

Primarni cilj ovog istraživanja bio je usmeran da se pokaže valjanost metode gustine energije deformacije za analizu širenja prsline. Ovim je pokazana dobra saglasnost primene metode GED za analizu širenja prsline. Kao što je napred pomenuto osnovna prednost metode GED je u tome što se kod nje koriste ciklične malociklične karakteristike materijala, upravo iste one karakteristike, koje se koriste i pri proceni veka do pojave inicijalnog oštećenja. Znači kod ovog pristupa nisu neophodna dodatna eksperimentalna ispitivanja za određivanje dinamičkih karakteristika materijala.

Dobro slaganje metode GED sa konvencionalnim zakonom širenja, sl. 7.9 i 7.10, potvrđuju valjanost primene metode GED za analizu širenja prsline odnosno za procenu preostalog veka elemenata konstrukcija.

7.4. Zaključne napomene po pitanju primene GED

U radu je prezentovana kompletna procedura za procenu preostalog veka elemenata konstrukcije tipa reprezentativnog (strukturnog) elementa sa kružnim otvorom i sa inicijalnim oštećenjem u vidu prsline. Predložena procedura je izuzetno pogodna za procenu preostale čvrstoće pri zamoru jer ne zahteva dodatna eksperimentalna istraživanja za određivanje neophodnih dinamičkih parametara, već se koriste parametri za malociklični zamor (low cyclic properties). Znači ukoliko se za neki element konstrukcije određuje ukupan vek u domenu malocikličnog zamora, odmah posle određenog broja ciklusa do pojave inicijalnog oštećenja, moguće je pristupiti određivanju broja ciklusa do efektivnog loma. Za procenu preostalog veka, odnosno za analizu širenja prsline korišćena je metoda gustine energije deformacije. Dobijena su dobra slaganja između rezultata numeričke procene preostalog veka na bazi GED - a sa konvencionalnim zakonom širenja. Ova slaganja rezultata su dobijena za reprezentativni element od eksploatisanog i novog materijala tornja.

Konačno, kod tornja usvojenog remontnog postrojenja može da se vrši procena ukupnog veka: do pojave inicijalnog oštećenja i za vreme širenja prsline, pri čemu se u oba slučaja koriste ciklične karakteristike ponašanja materijala iz domena malocikličnog zamora. Dobra slaganja rezultata metode GED sa konvencionalnim zakonima širenja prsline prikazanih u tački 7.3 potvrđuju valjanost primene same metode GED za procenu preostalog veka tornja.

7.5. Procena preostalog veka tornja za realni spektar opterećenja

Na osnovu proseka rudarskih operacija za jednu godinu rada, koje izvršava remontno postrojenje (tačka 3.5.1), njihovih dijagrama opterećenja (tačke 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.5.1 i priloga 10.1) u tabelama 7.6 i 7.7, dat je realni spektar (blok) napona.

U razmatranje je uzet osnovni model tornja M1 (opterećenje na kuki tj. na vrhu tornja je 1250 kN i slučaj opterećenja III), sa maksimalnom vrednošću napona 252,62 MPa [3.1].

Za ostale vrednosti opterećenja tornja, vrednosti napona su dobijene skaliranjem i one su date u tabeli 7.6.

Tabela 7.6. Realni spektar napona.

operacija	Minimalni napon (Mpa)	Maksimalni napon (Mpa)	Broj ponavljanja
spuštanje sprava	0	42,84	365x111=40515
vađenje sprava	0	42,84	365x111=40515
bušenje cementnog čepa	44,87	46,89	4x10=40
instrumentacija	48,5 80,8	80,8 121,3	5x1=5 5x5=25

U tabeli 7.7. dat je realni spektar napona (jedan blok), koji odgovara jednoj godini rada postrojenja.

Tabela 7.7. Realni spektar napona (jedan blok).

Nivoi napona	S_{min} (MPa)	S_{max} (MPa)	Broj ciklusa
Nivo 1	0	42,84	40515
Nivo 2	0	42,84	40515
Nivo 3	44,87	46,89	40
Nivo 4	48,5	80,8	5
Nivo 5	80,8	121,3	25

Analizirajući rezultate iz tabele 7.7, ukupan broj ciklusa za jednu godinu rada postrojenja je 81100, što za njegov period rada od 30 godina iznosi 2 433 000 ciklusa. Ovo predstavlja visokociklični zamor (VCZ), za njega važi Velerova kriva (napon - broj ciklusa) i efekti plastičnosti materijala su neznatni.

Od interesa je da se u razmatranje je uzme malociklični zamor (MCZ, tačke, 5.8 i 6.7, broj promena do 10^5) i veće vrednosti opterećenja epruveta za ispitivanje, nego na realnom postrojenju, u kojem dominira jako elasto - plastično ponašanje materijala i za koji važi primena metode gustine energije (GED) za procenu preostalog veka.

Sa navednim spektrom napona (blokom), tabela 7.7, ulazimo u program za preostali vek (GED) i dobijamo preostali vek konstrukcije tornja, koji je dat u tabelama 7.8 do 7.11.

Kriterijum za analizu širenja prsline u ovim tabelama je isti kao u tačkama 7.1 i 7.2, tj. trenutak kada vrednost dužine prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm od početne dužine prsline 3.5 mm.

U razmatranje su uzeta 2 slučaja sa različitim koeficijentima zamorne duktilnosti:

1. slučaj, koeficijent zamorne duktilnosti, $\varepsilon'_f = 0.36$ za EM i NM (usvojena vrednost na osnovu podataka iz literature za slične materijale, koja se kreće od 0.26 do 0.7163, prilog 10.3).

Broj blokova = 17 za eksploatisani materijal.

Broj blokova = 32 za novi materijal.

U tabelama 7.8 i 7.9, su dati rezultati širenja prsline odnosno procena preostalog veka za realni spektar opterećenja. Kao što se vidi, kao konačan rezultat dobija se, broj blokova = 17, odnosno 17 godina za eksploatisani materijal, odnosno broj blokova = 32, odnosno 32 godine za novii materijal, jer svaki blok sadrži broj operacija koje se javljaju u eksploataciji tokom jedne godine.

2. slučaj, koeficijent zamorne duktilnosti, $\varepsilon'_f = 0.04176$ za EM i 0.10530 za NM

Broj blokova = 3 za eksploatisani materijal.

Broj blokova = 7 za novi materijal.

U tabelama 7.10 i 7.11, su dati rezultati širenja prsline odnosno procena preostalog veka za realni spektar opterećenja odnosno napona. Kao što se vidi, kao konačan rezultat dobija se, broj blokova = 3, odnosno 3 godine za eksploatisani materijal, odnosno broj blokova = 7, odnosno 7 godina za novii materijal, jer svaki blok sadrži usvojeni broj operacija koje se javljaju u eksploataciji tokom jedne godine.

Tabela br: 7.8. Rezultati analize širenja prsline za realni spektar opterećenja za eksploatisani materijal, po metodi GED.

Proca sa rupom i jednom prskotinom EN English

Ulazni podaci za: EXPLOATISANI MATERIJAL

Korak: 100 Finoca stampe: 50000 Izaberite zakon širenja: GED Brisi: Izracunaj

Parisove konstante: nf: Cf:

Podaci o geometriji: a0: 0,0035 ac: 0,017 w: 0,05 t: 0,005 r: 0,005

Ciklične karakteristike materijala: E: 204200 SigmaF: 1290,2 EpsilonF: 0,36 n': 0,23932 ln': 3,067 Psi: 0,95152 Kth0: 5,8 Klc: 125

Podaci o opterećenjima: SigmaMax1: 42,84 Min1: 0 N1: 40515 SigmaMax2: 42,84 Min2: 0 N2: 40515 SigmaMax3: 46,89 Min3: 44,89 N3: 40 SigmaMax4: 80,8 Min4: 48,5 N4: 5 SigmaMax5: 121,3 Min5: 80,8 N5: 25

	NUkupno	a	da/dN	KI	BrojacBlokova
0	0,0035	0	0	9,662169076	0
50000	0,003726869	0,000000004	9,761232535	0	
100000	0,003972113	0,000000005	9,857097377	1	
150000	0,004232041	0,000000005	9,947973279	1	
200000	0,004510003	0,000000005	10,03494915	2	
250000	0,004803801	0,000000005	10,11738745	3	
300000	0,005111134	0,000000006	10,19505807	3	
350000	0,005435358	0,000000006	10,26928348	4	
400000	0,005772218	0,000000006	10,33965286	4	
450000	0,006125312	0,000000007	10,40754518	5	
500000	0,006492411	0,000000007	10,47313663	6	
550000	0,006871344	0,000000007	10,53672239	6	
600000	0,007266117	0,000000007	10,59960062	7	
650000	0,007674783	0,000000008	10,66202821	8	
700000	0,008095473	0,000000008	10,72428562	8	
750000	0,008532682	0,000000008	10,78754132	9	
800000	0,008982658	0,000000009	10,85170681	9	
850000	0,009450284	0,000000009	10,91789132	10	
900000	0,009934155	0,000000009	10,98626383	11	
950000	0,010432954	0,000000010	11,05696946	11	
1000000	0,010952101	0,000000010	11,13107271	12	
1050000	0,011488299	0,000000010	11,20836629	12	
1100000	0,012047421	0,000000011	11,28933238	13	
1150000	0,012628694	0,000000011	11,37587402	14	
1200000	0,013231463	0,000000012	11,46627335	14	
1250000	0,013862292	0,000000012	11,56227900	15	
1300000	0,014520930	0,000000013	11,66400436	16	
1350000	0,015207296	0,000000014	11,77155220	16	
1400000	0,015928832	0,000000014	11,88619300	17	
1450000	0,016683478	0,000000015	12,00768306	17	

*

Tabela br: 7.9. Rezultati analize širenja prsline za realni spektar opterećenja za novi materijal, po metodi GED.

Proca sa rupom i jednom prskotinom EN English

Ulazni podaci za:

Korak: Finoca stampe: Izaberite zakon širenja:

Parisove konstante
 nf: Cf:

Podaci o geometriji
 a0:
 ac:
 w:
 t:
 r:

Ciklične karakteristike materijala
 E:
 SigmaF:
 EpsilonF':
 n':
 ln':
 Psi:
 Kth0:
 Klc:

Podaci o opterećenjima

SigmaMax1	<input type="text" value="42,84"/>	Min1	<input type="text" value="0"/>	N1	<input type="text" value="40515"/>
SigmaMax2	<input type="text" value="42,84"/>	Min2	<input type="text" value="0"/>	N2	<input type="text" value="40515"/>
SigmaMax3	<input type="text" value="46,89"/>	Min3	<input type="text" value="44,89"/>	N3	<input type="text" value="40"/>
SigmaMax4	<input type="text" value="80,8"/>	Min4	<input type="text" value="48,5"/>	N4	<input type="text" value="5"/>
SigmaMax5	<input type="text" value="121,3"/>	Min5	<input type="text" value="80,8"/>	N5	<input type="text" value="25"/>

	NUkupno	a	da/dN	KI	BrojacBlokov
▶	0	0,0035	0	9,662169076	0
	100000	0,003687225	0,0000000019457	9,744690028	1
	200000	0,003892945	0,0000000021344	9,827310991	2
	300000	0,004117969	0,0000000023303	9,909331065	3
	400000	0,004362933	0,0000000025317	9,990129464	4
	500000	0,004630225	0,0000000027384	10,06975829	6
	600000	0,004916349	0,0000000029459	10,14675648	7
	700000	0,005223356	0,0000000031548	10,22156265	8
	800000	0,005551347	0,0000000033645	10,29421407	9
	900000	0,005902450	0,0000000035763	10,36531979	11
	1000000	0,006272723	0,0000000037884	10,43442599	12
	1100000	0,006664366	0,0000000040031	10,50244446	13
	1200000	0,007077719	0,0000000042220	10,56996061	14
	1300000	0,007515472	0,0000000044484	10,63796061	16
	1400000	0,007974100	0,0000000046825	10,70649097	17
	1500000	0,008456747	0,0000000049284	10,77663412	18
	1600000	0,008964748	0,0000000051892	10,84916476	19
	1700000	0,009499781	0,0000000054687	10,92488441	20
	1800000	0,010066251	0,0000000057722	11,00495468	22
	1900000	0,010662051	0,0000000061019	11,08959308	23
	2000000	0,011292471	0,0000000064644	11,18003818	24
	2100000	0,011961087	0,0000000068657	11,27726901	25
	2200000	0,012674632	0,0000000073146	11,38271740	27
	2300000	0,013433201	0,0000000078164	11,49682136	28
	2400000	0,014245146	0,0000000083824	11,62122904	29
	2500000	0,015117478	0,0000000090246	11,75739257	30
	2600000	0,016061228	0,0000000097595	11,90739435	32
	*				

Tabela br: 7.10. Rezultati analize širenja prsline za realni spektar opterećenja za eksploatisani materijal, po metodi GED.

Proca sa rupom i jednom prskotinom							EN English (United States)																																																																																																																																																																			
Ulazni podaci za:		Korak		Finoca stampe		Izaberite zakon širenja:		Brisi																																																																																																																																																																		
Exploatisani materijal		1		10000		GED		Izracunaj																																																																																																																																																																		
<p>parisove konstante</p> <p>nf <input type="text"/> Cf <input type="text"/></p>																																																																																																																																																																										
<p>Podaci o geometriji</p> <p>a0 <input type="text"/> 0,0035</p> <p>ac <input type="text"/> 0,017</p> <p>w <input type="text"/> 0,05</p> <p>t <input type="text"/> 0,005</p> <p>r <input type="text"/> 0,005</p>			<p>Ciklične karakteristike materijala</p> <p>E <input type="text"/> 204200</p> <p>SigmaF <input type="text"/> 1290,2</p> <p>EpsilonF' <input type="text"/> 0,04176</p> <p>n' <input type="text"/> 0,23932</p> <p>ln' <input type="text"/> 3,067</p> <p>Psi <input type="text"/> 0,95152</p> <p>Kth0 <input type="text"/> 5,8</p> <p>Klc <input type="text"/> 125</p>																																																																																																																																																																							
<p>Podaci o opterećenjima</p> <table border="1"> <tr> <td>SigmaMax1</td><td><input type="text"/> 42,84</td> <td>Min1</td><td><input type="text"/> 0</td> <td>N1</td><td><input type="text"/> 40515</td> </tr> <tr> <td>SigmaMax2</td><td><input type="text"/> 42,84</td> <td>Min2</td><td><input type="text"/> 0</td> <td>N2</td><td><input type="text"/> 40515</td> </tr> <tr> <td>SigmaMax3</td><td><input type="text"/> 46,89</td> <td>Min3</td><td><input type="text"/> 44,89</td> <td>N3</td><td><input type="text"/> 40</td> </tr> <tr> <td>SigmaMax4</td><td><input type="text"/> 80,8</td> <td>Min4</td><td><input type="text"/> 48,5</td> <td>N4</td><td><input type="text"/> 5</td> </tr> <tr> <td>SigmaMax5</td><td><input type="text"/> 121,3</td> <td>Min5</td><td><input type="text"/> 80,8</td> <td>N5</td><td><input type="text"/> 25</td> </tr> </table>							SigmaMax1	<input type="text"/> 42,84	Min1	<input type="text"/> 0	N1	<input type="text"/> 40515	SigmaMax2	<input type="text"/> 42,84	Min2	<input type="text"/> 0	N2	<input type="text"/> 40515	SigmaMax3	<input type="text"/> 46,89	Min3	<input type="text"/> 44,89	N3	<input type="text"/> 40	SigmaMax4	<input type="text"/> 80,8	Min4	<input type="text"/> 48,5	N4	<input type="text"/> 5	SigmaMax5	<input type="text"/> 121,3	Min5	<input type="text"/> 80,8	N5	<input type="text"/> 25																																																																																																																																						
SigmaMax1	<input type="text"/> 42,84	Min1	<input type="text"/> 0	N1	<input type="text"/> 40515																																																																																																																																																																					
SigmaMax2	<input type="text"/> 42,84	Min2	<input type="text"/> 0	N2	<input type="text"/> 40515																																																																																																																																																																					
SigmaMax3	<input type="text"/> 46,89	Min3	<input type="text"/> 44,89	N3	<input type="text"/> 40																																																																																																																																																																					
SigmaMax4	<input type="text"/> 80,8	Min4	<input type="text"/> 48,5	N4	<input type="text"/> 5																																																																																																																																																																					
SigmaMax5	<input type="text"/> 121,3	Min5	<input type="text"/> 80,8	N5	<input type="text"/> 25																																																																																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NUkupno</th> <th>a</th> <th>da/dN</th> <th>KI</th> <th>DeltaSigma</th> <th>BrojacBlokova</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0,0035</td><td>0</td><td>7,741408232</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>10000</td><td>0,003531198</td><td>0,000000003</td><td>7,771959792</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>20000</td><td>0,003564991</td><td>0,000000003</td><td>7,804898262</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>30000</td><td>0,003601699</td><td>0,000000003</td><td>7,840499612</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>40000</td><td>0,003641694</td><td>0,000000004</td><td>7,879082591</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>50000</td><td>0,003685410</td><td>0,000000004</td><td>7,921017188</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>60000</td><td>0,003733359</td><td>0,000000005</td><td>7,966735181</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>70000</td><td>0,003786149</td><td>0,000000005</td><td>8,016743403</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>80000</td><td>0,003844502</td><td>0,000000006</td><td>8,071640593</td><td>42,84</td><td>0</td></tr> <tr><td>90000</td><td>0,003911673</td><td>0,000000006</td><td>8,134358909</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>100000</td><td>0,003984222</td><td>0,000000007</td><td>8,201555135</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>110000</td><td>0,004065584</td><td>0,000000008</td><td>8,276279404</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>120000</td><td>0,004157350</td><td>0,000000009</td><td>8,359802637</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>130000</td><td>0,004261501</td><td>0,000000011</td><td>8,453695874</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>140000</td><td>0,004380531</td><td>0,000000012</td><td>8,559927348</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>150000</td><td>0,004517626</td><td>0,000000014</td><td>8,681002463</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>160000</td><td>0,004676917</td><td>0,000000017</td><td>8,820172418</td><td>42,84</td><td>1</td></tr> <tr><td>170000</td><td>0,004866448</td><td>0,000000020</td><td>8,983981755</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>180000</td><td>0,005088919</td><td>0,000000024</td><td>9,174306549</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>190000</td><td>0,005356793</td><td>0,000000029</td><td>9,401512142</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>200000</td><td>0,005684852</td><td>0,000000036</td><td>9,678279972</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>210000</td><td>0,006095404</td><td>0,000000046</td><td>10,02498828</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>220000</td><td>0,006624499</td><td>0,000000060</td><td>10,47775976</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>230000</td><td>0,007336771</td><td>0,000000083</td><td>11,11073925</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>240000</td><td>0,008370717</td><td>0,000000128</td><td>12,11828466</td><td>42,84</td><td>2</td></tr> <tr><td>250000</td><td>0,010161138</td><td>0,000000260</td><td>14,36603426</td><td>42,84</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>							NUkupno	a	da/dN	KI	DeltaSigma	BrojacBlokova	0	0,0035	0	7,741408232	42,84	0	10000	0,003531198	0,000000003	7,771959792	42,84	0	20000	0,003564991	0,000000003	7,804898262	42,84	0	30000	0,003601699	0,000000003	7,840499612	42,84	0	40000	0,003641694	0,000000004	7,879082591	42,84	0	50000	0,003685410	0,000000004	7,921017188	42,84	0	60000	0,003733359	0,000000005	7,966735181	42,84	0	70000	0,003786149	0,000000005	8,016743403	42,84	0	80000	0,003844502	0,000000006	8,071640593	42,84	0	90000	0,003911673	0,000000006	8,134358909	42,84	1	100000	0,003984222	0,000000007	8,201555135	42,84	1	110000	0,004065584	0,000000008	8,276279404	42,84	1	120000	0,004157350	0,000000009	8,359802637	42,84	1	130000	0,004261501	0,000000011	8,453695874	42,84	1	140000	0,004380531	0,000000012	8,559927348	42,84	1	150000	0,004517626	0,000000014	8,681002463	42,84	1	160000	0,004676917	0,000000017	8,820172418	42,84	1	170000	0,004866448	0,000000020	8,983981755	42,84	2	180000	0,005088919	0,000000024	9,174306549	42,84	2	190000	0,005356793	0,000000029	9,401512142	42,84	2	200000	0,005684852	0,000000036	9,678279972	42,84	2	210000	0,006095404	0,000000046	10,02498828	42,84	2	220000	0,006624499	0,000000060	10,47775976	42,84	2	230000	0,007336771	0,000000083	11,11073925	42,84	2	240000	0,008370717	0,000000128	12,11828466	42,84	2	250000	0,010161138	0,000000260	14,36603426	42,84	3		
NUkupno	a	da/dN	KI	DeltaSigma	BrojacBlokova																																																																																																																																																																					
0	0,0035	0	7,741408232	42,84	0																																																																																																																																																																					
10000	0,003531198	0,000000003	7,771959792	42,84	0																																																																																																																																																																					
20000	0,003564991	0,000000003	7,804898262	42,84	0																																																																																																																																																																					
30000	0,003601699	0,000000003	7,840499612	42,84	0																																																																																																																																																																					
40000	0,003641694	0,000000004	7,879082591	42,84	0																																																																																																																																																																					
50000	0,003685410	0,000000004	7,921017188	42,84	0																																																																																																																																																																					
60000	0,003733359	0,000000005	7,966735181	42,84	0																																																																																																																																																																					
70000	0,003786149	0,000000005	8,016743403	42,84	0																																																																																																																																																																					
80000	0,003844502	0,000000006	8,071640593	42,84	0																																																																																																																																																																					
90000	0,003911673	0,000000006	8,134358909	42,84	1																																																																																																																																																																					
100000	0,003984222	0,000000007	8,201555135	42,84	1																																																																																																																																																																					
110000	0,004065584	0,000000008	8,276279404	42,84	1																																																																																																																																																																					
120000	0,004157350	0,000000009	8,359802637	42,84	1																																																																																																																																																																					
130000	0,004261501	0,000000011	8,453695874	42,84	1																																																																																																																																																																					
140000	0,004380531	0,000000012	8,559927348	42,84	1																																																																																																																																																																					
150000	0,004517626	0,000000014	8,681002463	42,84	1																																																																																																																																																																					
160000	0,004676917	0,000000017	8,820172418	42,84	1																																																																																																																																																																					
170000	0,004866448	0,000000020	8,983981755	42,84	2																																																																																																																																																																					
180000	0,005088919	0,000000024	9,174306549	42,84	2																																																																																																																																																																					
190000	0,005356793	0,000000029	9,401512142	42,84	2																																																																																																																																																																					
200000	0,005684852	0,000000036	9,678279972	42,84	2																																																																																																																																																																					
210000	0,006095404	0,000000046	10,02498828	42,84	2																																																																																																																																																																					
220000	0,006624499	0,000000060	10,47775976	42,84	2																																																																																																																																																																					
230000	0,007336771	0,000000083	11,11073925	42,84	2																																																																																																																																																																					
240000	0,008370717	0,000000128	12,11828466	42,84	2																																																																																																																																																																					
250000	0,010161138	0,000000260	14,36603426	42,84	3																																																																																																																																																																					
*																																																																																																																																																																										

Tabela br: 7.11. Rezultati analize širenja prsline za realni spektar opterećenja za novi materijal, po metodi GED.

Proca sa rupom i jednom prskotinom EN English

Ulazni podaci za:

Korak: Finoca stampe: Izaberite zakon širenja:

parisove konstante
 nf Cf

Podaci o geometriji
 a0
 ac
 w
 t
 r

Ciklične karakteristike materijala
 E
 SigmaF
 EpsilonF'
 n'
 ln'
 Psi
 Kth0
 Klc

Podaci o opterećenjima

SigmaMax1	<input type="text" value="42,84"/>	Min1	<input type="text" value="0"/>	N1	<input type="text" value="40515"/>
SigmaMax2	<input type="text" value="42,84"/>	Min2	<input type="text" value="0"/>	N2	<input type="text" value="40515"/>
SigmaMax3	<input type="text" value="46,89"/>	Min3	<input type="text" value="44,89"/>	N3	<input type="text" value="40"/>
SigmaMax4	<input type="text" value="80,8"/>	Min4	<input type="text" value="48,5"/>	N4	<input type="text" value="5"/>
SigmaMax5	<input type="text" value="121,3"/>	Min5	<input type="text" value="80,8"/>	N5	<input type="text" value="25"/>

	NUkupno	a	da/dN	KI	BrojacBlokova
▶	0	0,0035	0	7,74140823237	0
	25000	0,003531779	0,000000001	7,77252784408	0
	50000	0,003566253	0,000000001	7,80612550114	0
	75000	0,003603761	0,000000001	7,84249341021	0
	100000	0,003645605	0,000000001	7,88284478813	1
	125000	0,003690520	0,000000001	7,92590319917	1
	150000	0,003739886	0,000000002	7,97293620320	1
	175000	0,003795276	0,000000002	8,02535579255	2
	200000	0,003855735	0,000000002	8,08216386522	2
	225000	0,003923041	0,000000002	8,14492452428	2
	250000	0,003999268	0,000000003	8,21542301665	3
	275000	0,004084096	0,000000003	8,29319133551	3
	300000	0,004180103	0,000000004	8,38039359025	3
	325000	0,004290405	0,000000004	8,47959381135	4
	350000	0,004416088	0,000000005	8,59145543283	4
	375000	0,004561553	0,000000006	8,71953305956	4
	400000	0,004731505	0,000000007	8,86753448848	4
	425000	0,004933288	0,000000008	9,04135937192	5
	450000	0,005173606	0,000000010	9,24632473889	5
	475000	0,005465515	0,000000012	9,49333804702	5
	500000	0,005827870	0,000000016	9,79886003758	6
	525000	0,006286809	0,000000020	10,1876744517	6
	550000	0,006890081	0,000000027	10,7097690737	6
	575000	0,007728524	0,000000040	11,4770782129	7
	600000	0,009023644	0,000000067	12,8413361524	7
	625000	0,011882966	0,000000230	17,9588072597	7
*					

8. ANALIZA REZULTATA

8.1. Hemijski sastav i mikrostrukturalna ispitivanja

Eksploatisani materijal tornja (ASTM A572 Grade 50) je proizveden u USA osamdesetih godina prošlog veka, a novi materijal je proizveden mnogo kasnije. Oba materijala imaju sličan hemijski sastav, jedino novi materijal sadrži manje ugljenika, pa bi trebao da ima manju čvrstoću. Međutim savremeni načini proizvodnje čelika, omogućuju dobijanje velike čvrstoće.

Mikrostruktura oba materijala je feritno - perlitna. Vidi se da je način dobijanja čelika drugačiji, jer je perlit kod novog materijala sferoidiziran i novi materijal ima mnogo sitnija zrna, kao i manje uključaka, a to sve utiče na njegove bolje mehaničke osobine.

8.2. Zatezne osobine

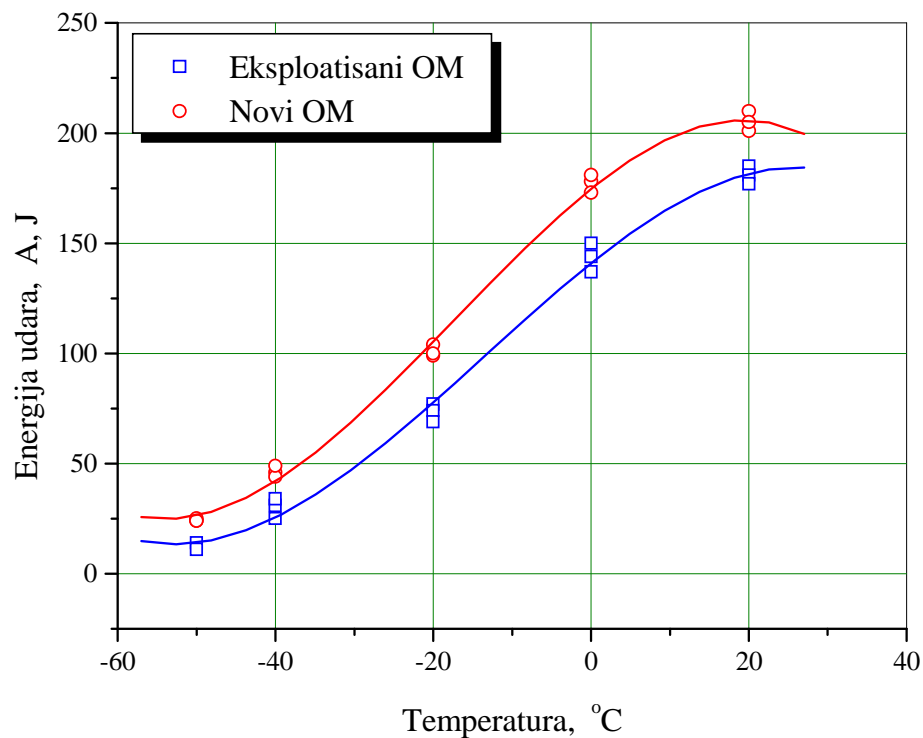
Dobijeni rezultati ispitivanja zatezanjem epruveta, uzorkovanih iz novog materijala konstrukcije tornja (zatezna čvrstoća 550 MPa, napon tečenja 404 MPa i izduženje 30.67 %) i eksploatisanog materijala konstrukcije tornja (zatezna čvrstoća 512 MPa, napon tečenja 368 MPa i izduženje 27.8 %). Zatezna čvrstoća novog materijala je za oko 7.5 % veća od zatezne čvrstoće eksploatisanog. Napon tečenja novog materijala je za oko 10 % veća od napona tečenja eksploatisanog, a izduženje novog materijala je za oko 10 % veće od izduženja eksploatisanog materijala.

Prema rezultatima ispitivanja, zatezne osobine su bolje kod novog materijala konstrukcije tornja u odnosu na eksploatisani.

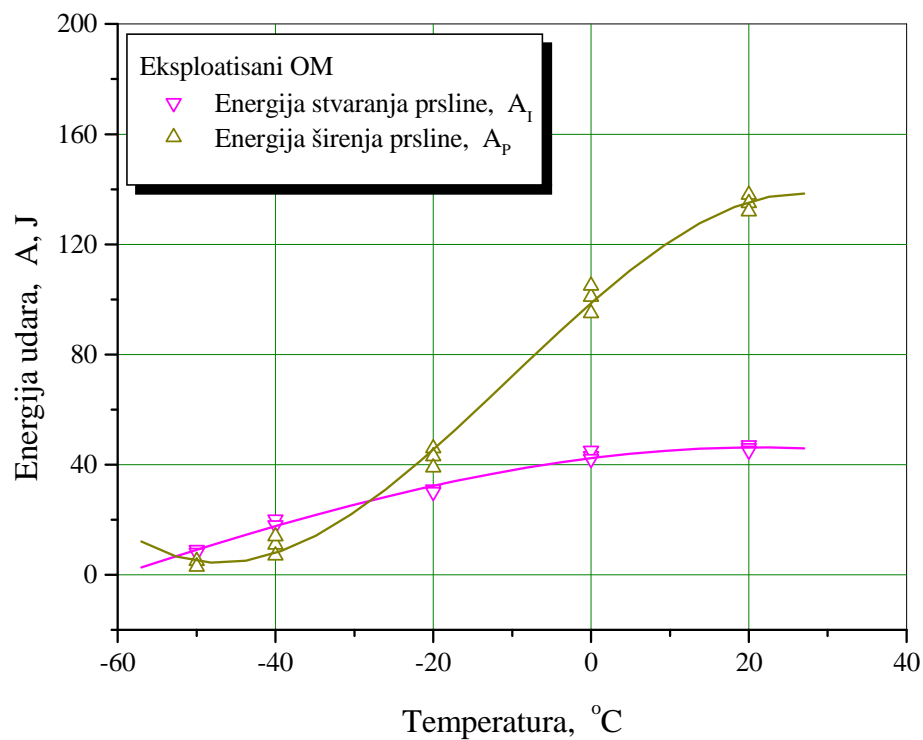
8.3. Udarne ispitivanja

Analizom rezultata udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom, u eksploatisanom i novom materijalu konstrukcije tornja, evidentan je pad udarnih osobina eksploatisanog u odnosu na novi materijal.

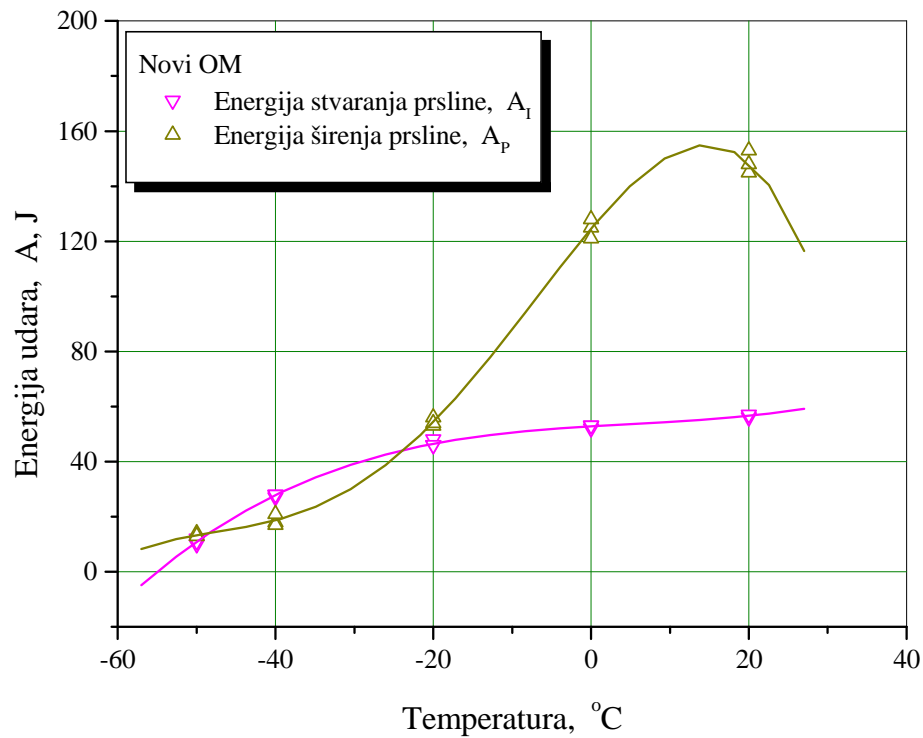
Podaci koji se dobijaju Šarpijevim instrumentiranim klatnom, omogućuju da se odredi ne samo ukupna energija udara, A_{uk} , nego i posebno energija stvaranja, A_I , i energija širenja već stvorene prsline, A_P , uzoraka od eksploatisanog i novog materijala tornja. od temperature ispitivanja je dat u dijagramu na sl. 8.1. Prikazi uticaja temperature na vrednosti ukupne energija udara, A_{uk} , energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , je dati su u dijagramima (sl. 8.1 do 8.3), za eksploatisani materijal, i novi materijal. Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti ugiba, s , kod eksploatisanog materijala i novog materijala, je dat na sl. 8.4.



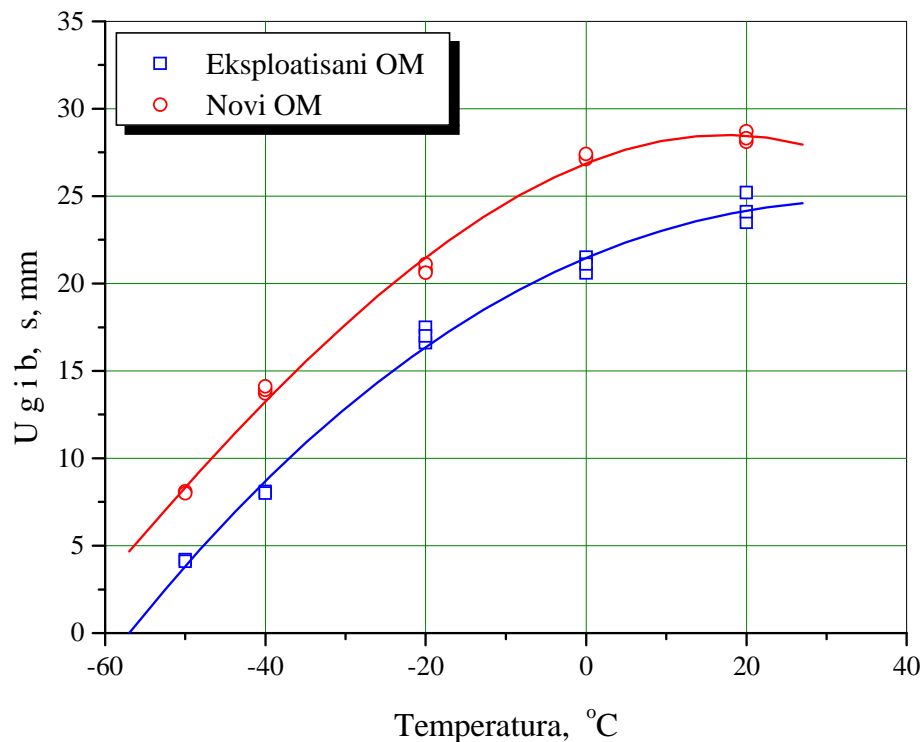
Slika 8.1. Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod eksploatisanog i novog materijala.



Slika 8.2. Promena energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P u zavisnosti od temperature kod eksploatisanog materijala.



Slika 8.3. Promena energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P u zavisnosti od temperature kod novog materijala.



Slika 8.4. Promena vrednosti ugiba u zavisnosti od temperature ispitivanja kod eksploatisanog i novog materijala.

Analizom dobijenih rezultata udarnih ispitivanja novog (NM) i eksploatisanog materijala (EM), vidi se da kod eksploatisanog dolazi do pada ukupne energije udara A_{uk} . Dobijene vrednosti ukupne energija udara, kod novog materijala, se kreću od 24 J dobijenih ispitivanjem

na -50°C do 201 J dobijenih ispitivanjem na 20°C . Kod eksploatisanog materijala, ukupna energija, A_{uk} , se kreće od 11 J dobijenih ispitivanjem na -50°C i raste do 185 J dobijenih ispitivanjem na 20°C .

Za određivanje prelazne temperature (temperature nulte plastičnosti), koristio se kriterijum da je energija udara manja od 27 J. Kod EM je ta temperatura oko -40°C (sl. 8.1), a kod NM iznosi oko -50°C , što znači da se NM može eksploatisati na nižoj temperaturi od 10°C .

Vrednosti energije stvaranja prsline, A_I kod epruveta sa zarezom u novom materijalu, se kreću od 6 J dobijenih na -50°C do 56 J dobijenih na 20°C , a kod eksploatisanog materijala je slično dobijenim vrednostima kao i kod novog materijala na -50°C i iznosi u proseku 8 J, da bi na 20°C poraslo na 47 J. Vrednosti energije stvaranja prsline dobijenih na 20°C su, za novi materijal $A_I = 56$ J, a za eksploatisani materijal $A_I = 47$ J, što je manje za oko 19% u odnosu na novi.

Vrednosti energije širenja prsline A_P kod novog materijala, se kreću od 18 J dobijenih na -50°C do 145 J dobijenih na 20°C , a kod eksploatisanog materijala dobijene vrednosti energije širenja prsline, se kreću od 3 J dobijenih na -50°C i rastu do 138 J na 20°C .

Vrednosti energije širenja prsline dobijenih na 20°C su, za novi materijal $A_P = 145$ J, a za eksploatisani materijal $A_P = 138$ J, što je manje za oko 5% u odnosu na novi.

Ukupna energija udara dobijena na temperaturi 20°C je, za novi materijal $A_{\text{uk}} = 201$ J, a za eksploatisani materijal $A_{\text{uk}} = 185$ J, što je manje za oko 9% u odnosu na novi.

Prema dobijenim rezultatima, energije stvaranja prsline A_I i širenja prsline A_P , prsline se lakše stvara u eksploatisanom materijalu, a sporije širi u novom materijalu.

Vrednosti ugiba (s) kao važne komponente plastičnosti ispitivanog materijala, se kreću kod novog materijala od 8 mm dobijenog na -50°C i rastu do 28,1 mm dobijenih na 20°C . Kod eksploatisanog materijala, vrednost ugiba s se kreću od 4,1 mm dobijenih na -50°C i rastu do 23,5 mm dobijenih na 20°C . One su manje u eksploatisanom nego u novom materijalu. Vrednosti ugiba plastičnosti ispitivanih materijala dobijenih na 20°C su, za novi 28,1 mm, a za eksploatisani 23,5 mm, što je manje za oko 19% u odnosu na novi. Veći ugib, odnosno bolju duktilnost imaju epruvete izrađene iz novog, u odnosu na epruvete izrađene iz eksploatisanog materijala. Pad ugiba kod eksploatisanog materijala daje nam informaciju o značajnom padu osobina eksploatisanog u odnosu na novi materijal.

Generalno, sve vrednosti udarnih ispitivanja (ukupna energija udara, energije stvaranja prsline, energije širenja prsline i ugib plastičnosti) za novi materijal (NM) su bolje u odnosu na eksploatisani materijal (EM) konstrukcije tornja.

8.4. Kritični faktor intenziteta napona K_{Ic}

Ispitivani materijali su veoma duktilni, sa niskim naponom tečenja, tako da se ne mogu postići uslovi ravne deformacije, što je neophodno za određivanje žilavost loma. Kritični faktor intenziteta napona K_{Ic} , je određen posredno, preko kritičnog J_{Ic} integrala (tačka 6.4).

Za kritični J_{Ic} integral (tabela 6.6), su dobijene sledeće srednje vrednosti ($J_{Ic} = 67.2$ kJ/m² za eksploatisani materijal i $J_{Ic} = 90.2$ kJ/m² za novi materijal konstrukcije tornja. Proračunom (jednačina 5.20) su dobijene srednje vrednosti faktora intenziteta napona ($K_{Ic} = 125$ MPa m^{1/2} za eksploatisani i 146 MPa m^{1/2} za novi materijal), (date u tabeli 6.6).

Razlika vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona (žilavosti) kod eksploatisanog materijala, može itekako da doprinese pojavi neželjenih situacija u radu i smanjenju veka konstrukcije tornja. Veličina kritičnog faktora intenziteta napona, to je ustvari žilavost loma, pokazuje veličinu napona pri kome će doći do loma, ako u konstrukciji postoji prslina. Prema rezultatima ispitivanja, kod eksploatisanog materijala će doći do loma pri istoj veličini prsline pri manjem naponu od oko 17 %.

8.5. Ispitivanje promenljivim opterećenjem

Ispitivanjem trajne dinamičke čvrstoće materijala, određuje se otpornost materijala na inicijaciju (stvaranje) prsline. To je maksimalna veličina napona pri kojoj ne dolazi do stvaranja prsline na glatkim epruvetama.

Dobijeni rezultati ispitivanja visokocikličnog zamora glatkih epruveta, sa ciljem konstruisanja Velerove krive i određivanja trajne dinamičke čvrstoće su: (267 MPa za eksploatisani materijal i 316 MPa za novi materijal konstrukcije tornja. Konstrukcija od novog materijala će izdržati veće opterećenje 18 % od postojeće konstrukcije.

8.6. Primena mehanike loma pri proučavanju zamora

Posmatranje ponašanja materijala konstrukcije tornja u prisustvu greški tipa prsline u uslovima delovanja promenljivog opterećenja analizirano je određivanjem sledećih parametara: prag zamora, ΔK_{th} , brzina rasta zamorne prsline, da/dN , koeficijenti Parisove jednačine (C,m). Ovi parametra se dobijaju iz linearnog dela krive $da/dN-\Delta K$, odnosno dela krive u kojem važi Parisov zakon širenja prsline.

Prag zamora za eksploatisani materijal konstrukcije tornja je $\Delta K_{th} = 5.8$ MPa m^{1/2}, a za novi materijal $\Delta K_{th} = 6.1$ MPa m^{1/2}. Rezultati ukazuju da će do rasta postojeće prsline doći pri većem naponu u novom materijalu.

Koeficijent Parisove jednačine je: $C = 6.71 \cdot 10^{-12}$ za eksploatisani materijal i $C = 1.97 \cdot 10^{-11}$ za novi materijal.

U prilogu 10.3. dat je zbirni pregled rezultata istraživanja drugih autora pronađenih u literaturi za različite materijale. Date su pre svega osnovne mehaničke karakteristike, Parisove konstante i ciklične karakteristike materijala, koje se koriste za odedivanje preostalog veka (po metodi Parisa i GED-a, koristeći razne softverske programe). Ovi podaci dati su za različite čelike i za različite konstrukcije (cevi, posude pod pritiskom, mostovi, rešetke, diskovi turbinskih kola itd.). Prema navedenom prilogu koeficijenti Parisove jednačine se kreću u granicama $C = 3.30 \cdot 10^{-13}$ do $C = 3.07 \cdot 10^{-11}$. Naši rezultati se nalaze u ovim granicama.

EkspONENT m pokazuje nagib linearnog dela krive $da/dN-\Delta K$. EkspONENT $m=4$ za eksploatisani materijal, a $m=3.31$ za novi materijal. Uobičajeno je da je koeficijent m od 2-4 za čelike. Prema prilogu 10.3 vredosti eksponenta m se kreću u granicama $m=2.8$ do 11.6. Naši rezultati se nalaze u ovim granicama. Nagib krive je manji za novi materijal, što ukazuje da je brzina rasta zamorne prsline da/dN manja u novom nego u eksploatisanom materijalu, tj. da će se prslina sporije širiti u novom materijalu.

Brzina rasta zamorne prsline da/dN (dijagrami 6.19 i 6.20), se računa za različite vrednosti opsega faktora intenziteta napona ΔK . U našoj analizi smo uzeli vrednost ΔK od $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ova vrednost opsega faktora intenziteta napona se nalazi u delu krive u kojoj važi Parisov zakon (jednačina 7.1). Brzina rasta zamorne prsline, je $da/dN = 3.40 \cdot 10^{-7} \text{ m/cikl}$, za eksploatisani materijal, $da/dN = 1.54 \cdot 10^{-7} \text{ m/cikl}$, za novi materijal. Prema rezultatima u prilogu 10.3. brzina rasta zamorne prsline da/dN kreće se u granicama $da/dN = 9.99 \cdot 10^{-9} \text{ m/cikl}$ do $4.98 \cdot 10^{-6} \text{ m/cikl}$. Dobijeni rezultati u ovom radu se nalaze u ovim granicama.

8.7. Ispitivanje otpornosti na malociklični zamor

Ciklične karakteristike eksploatisanog i novog materijala date su u tabeli.6.12. One su dobijene ispitivanjem otpornosti na malociklični zamor i koristimo ih za procenu preostalog veka koristeći metodu gustine energije deformacije (GED).

Tabela 8.1. Ciklične karakteristike eksploatisanog i novog materijala tornja i grupe čelika iz literature (prilog 10.3).

Karakteristike	ASTM Grade 50	A572	S355JR	čelik iz literature (prilog 10.3)
Koeficijent ciklične čvrstoće, K' , MPa	1575.7		1490.1	547 do 1258
EkspONENT cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.23932		0.22043	0.123 do 0.208
Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f , MPa	1290.2		1261.9	869 do 1820
EkspONENT zamorne čvrstoće, b	- 0.0987		- 0.08128	- 0.1104 do 0.08
Koeficijent zamorne duktilnosti, ε'_f	0.04176		0.10530	0.26 do 1.142
EkspONENT zamorne duktilnost, c	- 0.43965		- 0.53275	- 0.67 do 0.76

Ciklične karakteristike materijala ne odstupaju mnogo za eksploatisani materijal i novi materijal konstrukcije tornja u odnosu na grupu čelika iz priloga 10.3. Ovo se tumači da nije došlo do velikih promena u strukturi materijala.

Osobine malocikličnog zamora - ciklične karakteristike (tabela 8.1) su slične, osim koeficijenta zamorne duktilnosti, koji dosta odstupa ($\varepsilon'_f = 0.04176$ za eksploatisani i 0.10530 za novi materijal). Ova razlika ima veliki uticaj na preostali vek konstrukcije tornja.

8.8. Rezultati metoda za procenu preostalog veka konstrukcije tornja

Mehanika loma je uvela osnovnu promenu u inženjersku praksu, a to je prihvatanje neminovnosti postojanja prslina i sličnih grešaka u konstrukcijama i neophodnosti analize njihovog uticaja na preostali vek konstrukcija.

Procena ukupnog veka konstrukcija se može podeliti u dva dela: (1) do pojave stvaranja inicijalnog oštećenja (inicijacija) prslina i (2) širenje (propagacija, preostali vek) prslina. Ovo su u osnovi dve naučne oblasti, koje se po pravilu proučavaju posebno. Zbog obimnosti i posebnosti rada, predmet ovog istraživanja je usmeren na procenu preostalog veka elemenata konstrukcija u prisustvu prslina (za vreme širenja) pod dejstvom cikličnih opterećenja.

Potrebni podaci za procenu preostalog veka konstrukcije tornja, dobijeni su mehaničko eksploatacionim ispitivanjima materijala. Ispitivanja materijala su urađena u uslovima delovanja statičkog opterećenja (zatezna ispitivanja, udarna ispitivanja, i određivanje kritičnog faktora intenziteta napona), i u uslovima delovanja promenljivog opterećenja (određivanje trajne dinamičke čvrstoće, parametara rasta zamorne prslina i praga zamora). Svi ovi podaci su nam potrebni za procenu preostalog veka konstrukcije tornja.

Analiza naponskog stanja konstrukcije tornja bez prslina, najčešće metodom konačnih elemenata (MKE) omogućava nam da se utvrde "kritična" mesta u konstrukciji tornja, čak i pre pojave prslina. Ovo je dato u magistarskom radu kandidata [3.1], i vrednosti napona koristimo pri definisanju realnog spektra napona, koji se javljaju u konstrukciji tornja, za realni spektar opterećenja. Realni spektar napona koristimo pri proceni preostalog veka konstrukcije tornja (tačka 8.6).

Faktor intenziteta napona (K) koji s jedne strane predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući oblik i veličinu prslina, a s druge strane, njegova kritična vrednost, nazvana žilavost loma, K_{Ic} , predstavlja svojstvo materijala. Ukoliko je faktor intenziteta napona veća od žilavosti loma, vek konstrukcije je ugrožen, jer postoji mogućnost pojave krtog loma.

Cilj ovih ispitivanja je da se na osnovu dobijenih rezultata, izvrši procena preostalog veka tornja sa aspekta delovanja promenljivog opterećenja. Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza dali su praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na ponašanje materijala tornja, a sve u cilju procene preostalog veka, revitalizacije i produženja radnog veka konstrukcije tornja.

Preostali vek tornja u eksploataciji, odnosno broj ciklusa, N , do postizanja kritične dužine prsline, a_c , zavisi od pretpostavljene dužine prsline, a_0 , opsega dozvoljenog naprežanja, $\Delta\sigma$, i mesta inicijacije prsline. Ukoliko je pretpostavljena dužina prsline i opseg dozvoljenog naprežanja veći, broj ciklusa do eventualne havarije i nekontrolisanog loma je manji.

Za procena preostalog veka konstrukcije tornja, u radu se koriste dva pristupa: primenom konvencionalnih zakona širenja prsline (Parisov zakon) i koristeći metod gustine energije deformacije (GED).

8.8.1. Procena preostalog veka elemenata konstrukcije tornja primenom konvencionalnih zakona širenja prsline

Prvi pristup za model koristi Parisov zakon širenja prsline (jednačina 7.1). Za primenu ovog zakona su eksperimentalno određene dinamičke karakteristike materijala neophodne za modeliranje širenja prsline, minimalni i maksimalni napon i žilavost loma materijala.

Za primer prikaza primene Parisovog zakona širenja prsline izabran je strukturalni element sa otvorom i inicijalnom prslinom na jednoj strani otvora u zoni koncentracije napona (sl. 7.6), koji je opterećen aksijalnim opterećenjem. On je reprezent za ilustraciju i uspostavljanje metodologije za analizu širenja i procene preostalog veka tornja.

U softverski paket „PP_VEK“, za naš slučaj uneti su sledeći podaci: Parisove konstante (C, m), dimenzije epruvete (širina $w=50$ mm, poluprečnik otvora $r=10$ mm), dužina prsline (početna 3,5 mm i kritična 17 mm, koja je dobijena konstruktivno, sl.7.6), priraštaj prsline 0,5 mm, maksimalni napon $S_{max}= 80$ MPa (koji je uzet iz ranijih istraživanja [3.1]), minimalni napon $S_{min}= 8$ MPa (koji je izračunat pomoću odnosa napona $R=0,1$) i oni su isti za oba pristupa, (razlika napona i odnos napona), prag zamora, faktor intenziteta napona (FIN), žilavost loma i modul elastičnosti materijala.

Rezultati proračunske analize širenja prsline koristeći Parisov zakon za eksploatisani i novi materijal. Zavisnost $a - N$ (sl. 7.9 i 7.10), se koristi za verifikaciju primenjenih pristupa odnosno metoda za analizu širenja prsline. Kriterijum za analizu širenja prsline je trenutak kada vrednost dužina prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm (tj. trenutak loma epruvete).

8.8.2. Procena preostalog veka elemenata konstrukcija koristeći metod gustine energije deformacije (GED)

Metoda procene preostalog veka elemenata konstrukcija koristeći metodu gustine energije (Model primene metode GED je dat sa jednačinom 7.33), je takođe data na istom primeru elemenata konstrukcije tipa ploče sa otvorom i jednom inicijalnom prslinom (sl.7.7).

Rezultati proračunske analize širenja prsline na bazi gustine energije deformacije primenom softverskog paketa „PP_VEK“ za EM i NM dati su u tabelama 7.4. i 7.5, gde su prikazani svi neophodni ulazni podaci koji uključuju: geometrijske karakteristike razmatranog strukturalnog elementa sa inicijalnom prslinom, neophodne ciklične

karakteristike materijala, prag zamora, faktor intenziteta napona, žilavost loma i modul elastičnosti materijala, kao i tip promjenljivog opterećenja.

Iz navedenih tabela se dobija zavisnost između dužine prsline u zavisnosti od broja ciklusa, odnosno dobija se zavisnost $a - N$ (sl. 7.9 i 7.10), koju koristimo za verifikaciju primenjenih pristupa, odnosno metoda za analizu širenja prsline. Kriterijum za analizu širenja prsline je trenutak kada vrednost dužina prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm (tj. trenutak loma epruvete).

8.8.3. *Verifikacija metoda za određivanja preostalog veka konstrukcije tornja*

Za verifikaciju metoda za određivanja preostalog veka, potreban uslov je približno slaganje rezultata za različite metode. Širenje prsline primenom konvencionalnog Parisovog zakona širenja prsline i metode Gustine Energije Deformacije (GED) (sl. 7.9 i 7.10), pokazuje dobro slaganje rezultata.

8.8.4. *Određivanje preostalog veka konstrukcije tornja za realni spektar opterećenja*

Nakon verifikacije metoda za određivanja preostalog veka konstrukcije tornja, na osnovu proseka rudarskih operacija za jednu godinu rada, koje izvršava izabrano remontno postrojenje (tačka 3.5.1), njihovih dijagrama opterećenja, u postojeći softverski program „PP_VEK“ se unosi realni spektar opterećenja i napona tornja i dobija se preostali vek tornja (tačka 7.5).

Na osnovu ovoga u tački 7.5. dat je preostali vek tornja za realni spektar opterećenja, za novi i eksploatisani materijal tornja (po metodi GED tabele 7.8 do 7.11).

Kriterijum za analizu širenja prsline u ovim tabelama je trenutak kada vrednost dužina prsline dostigne kritičnu vrednost 17 mm, od početne 3.5 mm. Ove vrednosti su konstruktivno usvojene prema sl. 7.7. Pored ovog kriterijuma za određivanje preostalog veka konstrukcije tornja, može biti razmatran i trenutak dostizanja žilavosti loma materijala K_{Ic} , odnosno loma kritičnog elementa konstrukcije tornja.

Dati su rezultati za 2 slučaja sa različitim koeficijentima zamorne duktilnosti (ε'_f):

1. slučaj, koeficijent zamorne duktilnosti, $\varepsilon'_f = 0.36$ za EM i NM (usvojena vrednost na osnovu podataka iz literature za slične materijale, koja se kreće od 0.26 do 0.7163, prilog 10.3).
2. slučaj, koeficijent zamorne duktilnosti, $\varepsilon'_f = 0.04176$ za EM i 0.10530 za NM (dobijeni u radu, tačka 6.7.).

Dobijene vrednosti su: (17 godine za EM i 32 godine za NM za 1. slučaj), a (3 godine za EM i 7 godina za NM za 2. slučaj) i one su date u tabelama 7.8 do 7.11.

9. ZAKLJUČAK

Istraživanja u doktorskoj disertaciji dovela su do rezultata, koji potvrđuju opravdanost izbora proučavane problematike. Naučno zasnovane metode, koje su korišćene u rešavanju predmeta doktorske disertacije, omogućile su u teorijskom smislu, da se analiziraju metode i postupci eksploatacionih ispitivanja, koji su potrebni za procenu preostalog veka konstrukcija tornja

Iz dobijenih rezultata istraživanja, datih u ovom radu proilaze sledeći zaključci:

I. Osnovni cilj istraživanja u okviru disertacije je da se uspostavi celovita metodologija - procedura, za procenu preostalog veka konstrukcija tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa. Za tu svrhu su korišćene eksperimentalne metode za utvrđivanje neophodnih mehaničkih karakteristika materijala, s jedne i proračunske procedure za procenu preostalog veka s druge strane.

Kada se radi o eksperimentalnim istraživanjima, primarna pažnja bila je usmerena na određivanje malocikličnih zamornih karakteristika ponašanja materijala, koje su neophodne za procenu veka tornja. Kompletne malociklične zamorne karakteristike (MCZ) su eksperimentalno određene za dva materijala tornja (eksploatisani materijal EM i novi materijal NM).

Pored MCZ za ova dva materijala, koje su neophodne za proračunsku procenu preostalog veka elemenata konstrukcija na bazi metode Gustine Energije Deformacije (GED) eksperimentalno su određene i dinamičke karakteristike ponašanja (C,m), koje se koriste kod konvencionalnih zakona širenja prsline poput Parisa, Formana i drugih. Eksperimentalno su određene dinamičke karakteristike ovih materijala kao i žilavost loma materijala.

Za proračunske procene preostalog veka elemenata konstrukcija u radu su korišćena dva pristupa:

- Primenom konvencionalnih zakona širenja prsline (Paris) i
- Na bazi gustine energije deformacije (GED).

Oba gore navedena pristupa proračunske procene preostalog veka su međusobno poređena na problemu reprezentativnog elementa konstrukcije, tipa ploče sa otvorom i jednom prsline u zoni koncentracije napona opterećene cikličnim opterećenjima konstantne amplitude. Kod oba proračunska pristupa, kao bitan parametar u analizi širenja prsline je Faktor Intenziteta Napona (FIN). Za tu svrhu je izabran analitički izraz za FIN, čija tačnost je verifikovana kroz poređenja sa rezultatima konačnih elemenata. Korišćeni su veoma tačni specijalni singularni konačni elementi oko vrha prsline za određivanje FIN.

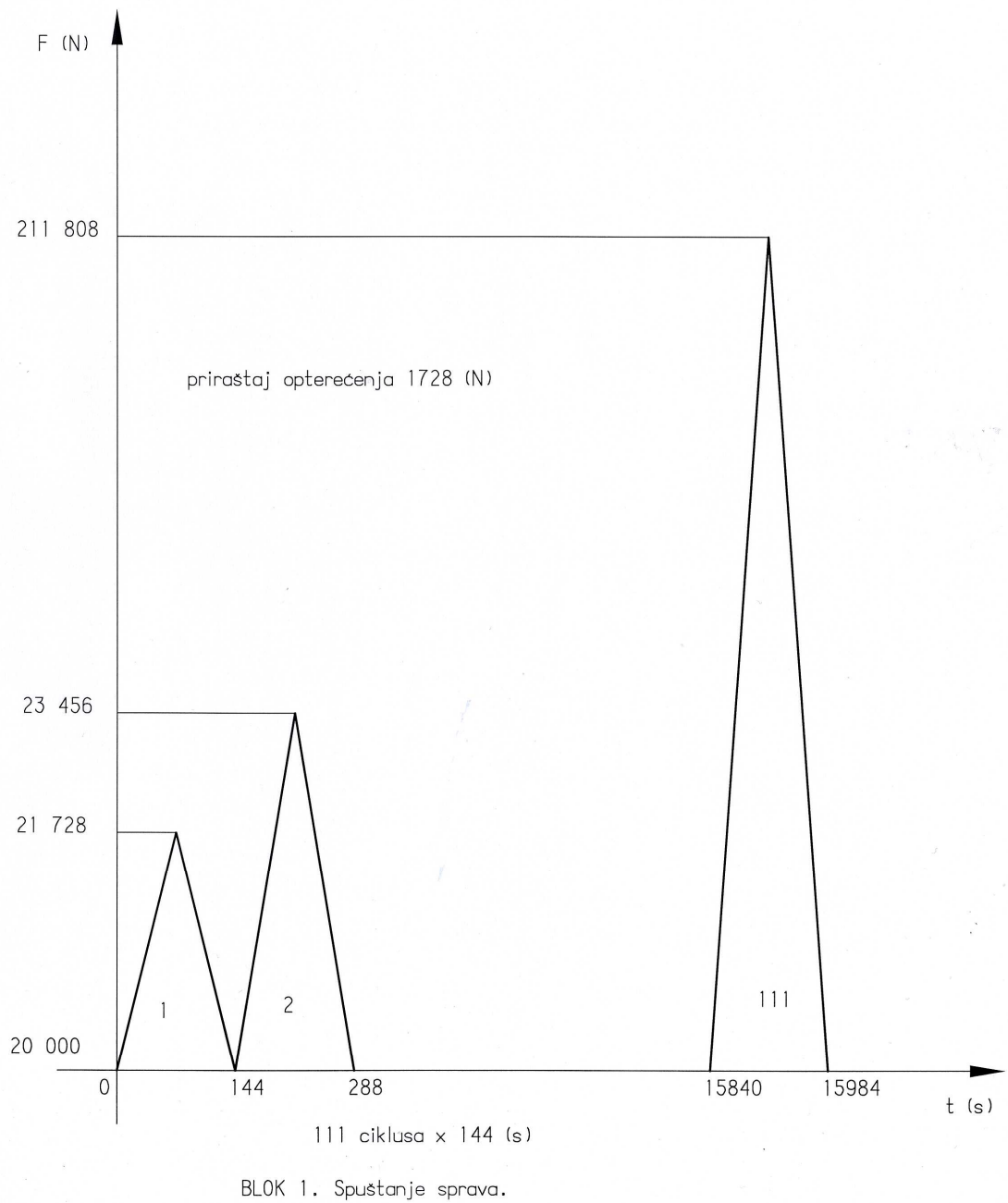
Konačno, kroz sprovedena eksperimentalna istraživanja malocikličnih zamornih karakteristika materijala s jedne, i korišćenja proračunske procedure za analizu širenja prsline na bazi MCZ materijala (metod GED) sa druge strane, u okviru ove doktorske disertacije uspostavljena je kompletna opšta metodologija - procedura za procenu preostalog veka složenih konstrukcija poput tipa tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa.

Ona se sastoji iz sledećih faza:

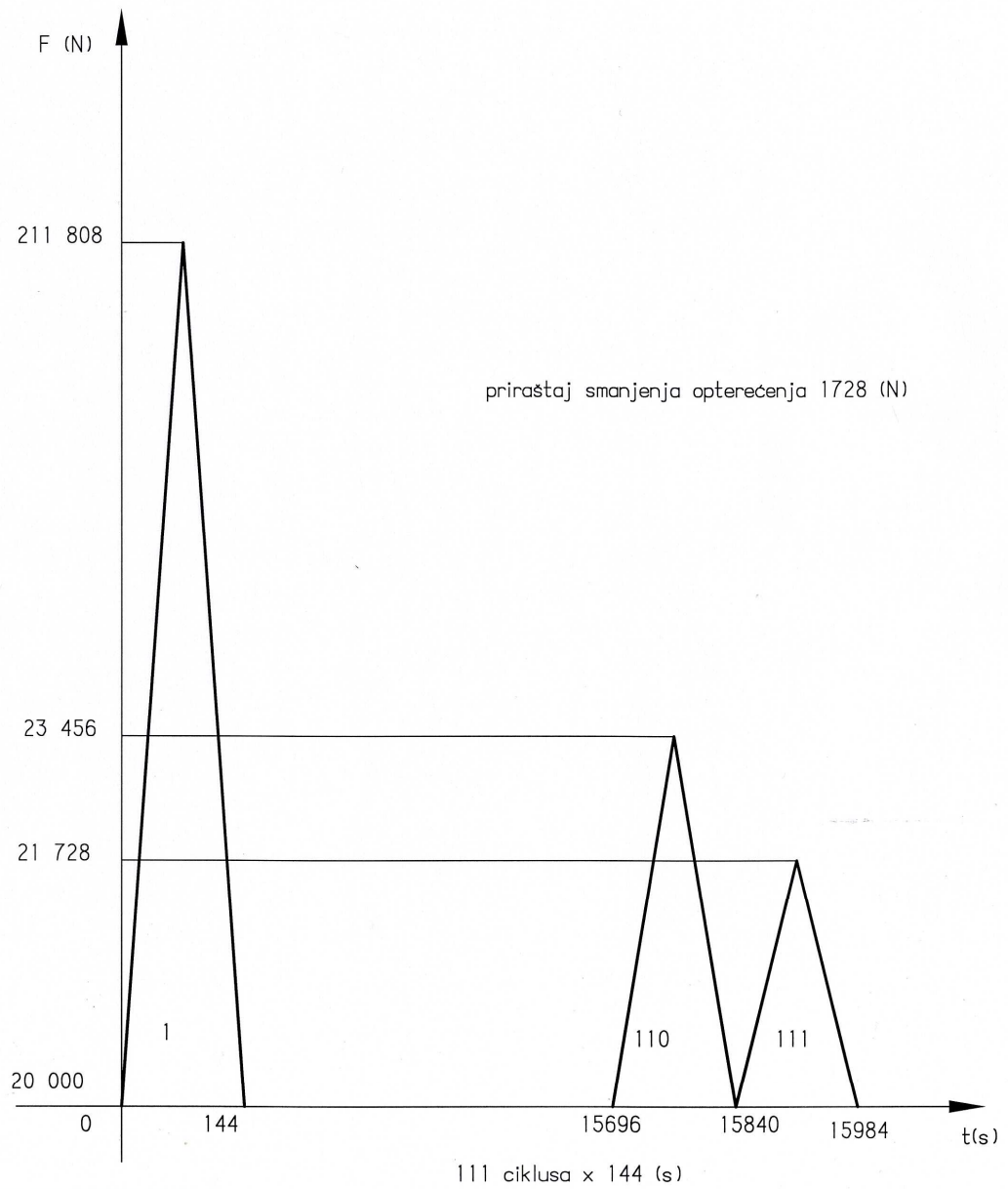
- Ispitivanja mehaničkih osobina materijala tornja.
- Određivanje kritičnih mesta u eksploataciji primenom metode konačnih elemenata (MKE), odnosno proračun statičkog i dinamičkog ponašanja tornja.
- Određivanje naponsko deformacijskog stanja tornja (spektar napona) u toku eksploatacije.
- Određivanje cikličnih karakteristika malocikličnog zamora materijala.
- Određivanje Parisovih konstanti i žilavosti loma materijala.
- Određivanje parametara rasta pesline.
- Poređenje (verifikacija) primenjene metodologije (Paris, GED) za određivanje preostalog veka tornja (slaganje dijagrama $a - N$ za navedene metode).
- Određivanje preostalog veka tornja za realni spektar opterećenja (primena metode gustine energije deformacije GED, ugrađene u softver „PP_VEK“).
- Analiza rezultata procene preostalog veka konstrukcije tornja.

II. Na osnovu izvršenih eksperimentalnih ispitivanja materijala tornja, dobijenih rezultata istraživanja i analize rezultata, opšti zaključak je da novi materijal ima bolje mehaničke osobine od eksploatisanog. Međutim, prema rezultatima određivanja veka konstrukcije, dobijen je odgovor na pitanje dato u hipotezi ove disertacije, a to je da strukturni integritet i preostali vek tornja od eksploatisanog materijala, i pored značajnog smanjenja mehaničkih osobina u odnosu na novi, nije ugrožen.

III. Predložene metode za procenu preostalog veka konstrukcije tornja su realne i doprinose racionalizaciji primene procedure u praćenju stanja i održavanja, kako sa aspekta tehničkih performansi, tako i na planu optimizacije, preventivnog održavanja i redukcije troškova uopšte. Univerzalna procedurea za procene preostalog veka konstrukcije tornja postrojenja za istraživanje nafte i gasa se može primeniti i za druge konstrukcije.

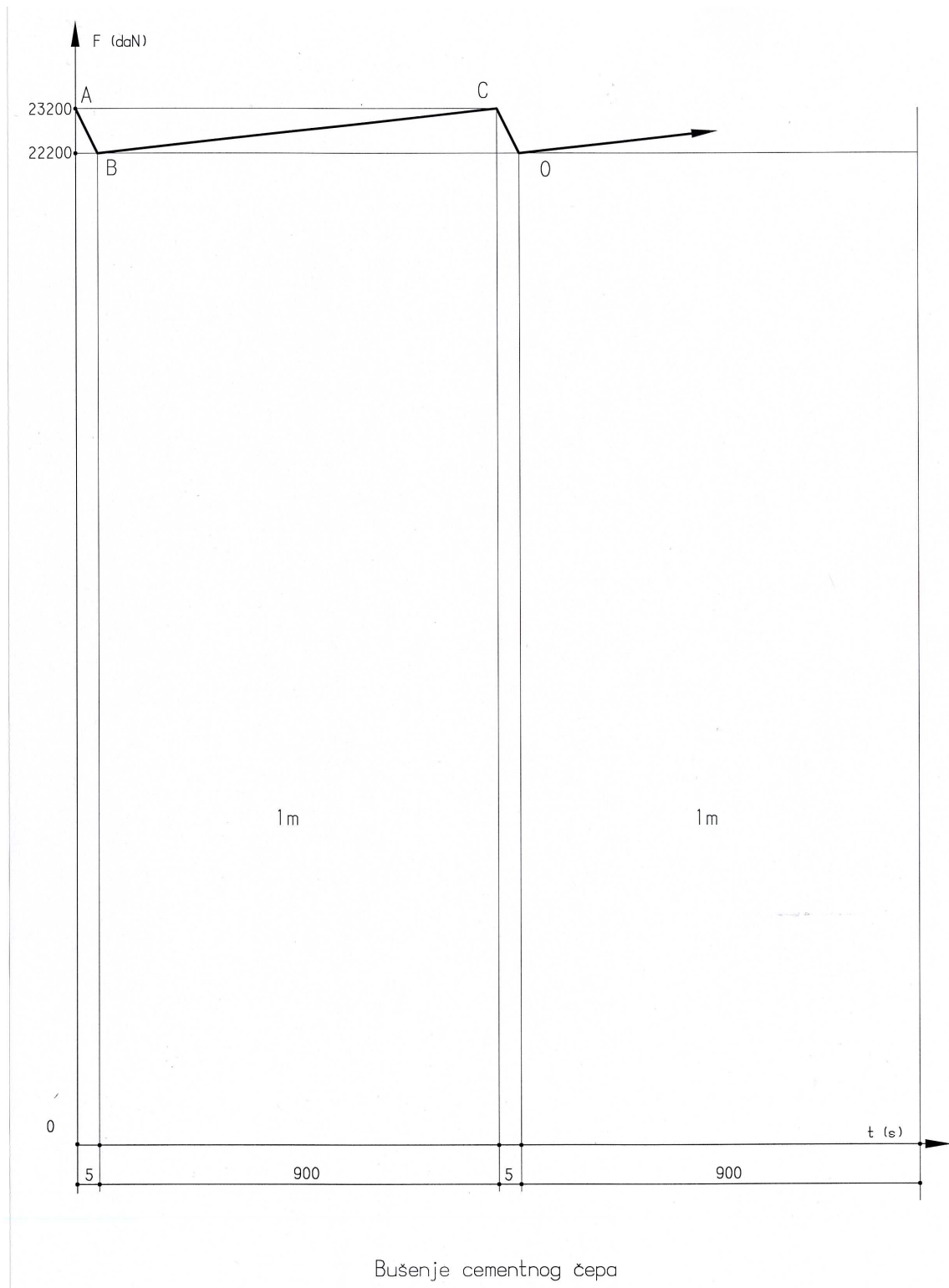
10. PRILOZI**10.1. Dijagrami rudarskih operacija**

Slika 10.1. Spuštanje sprava.

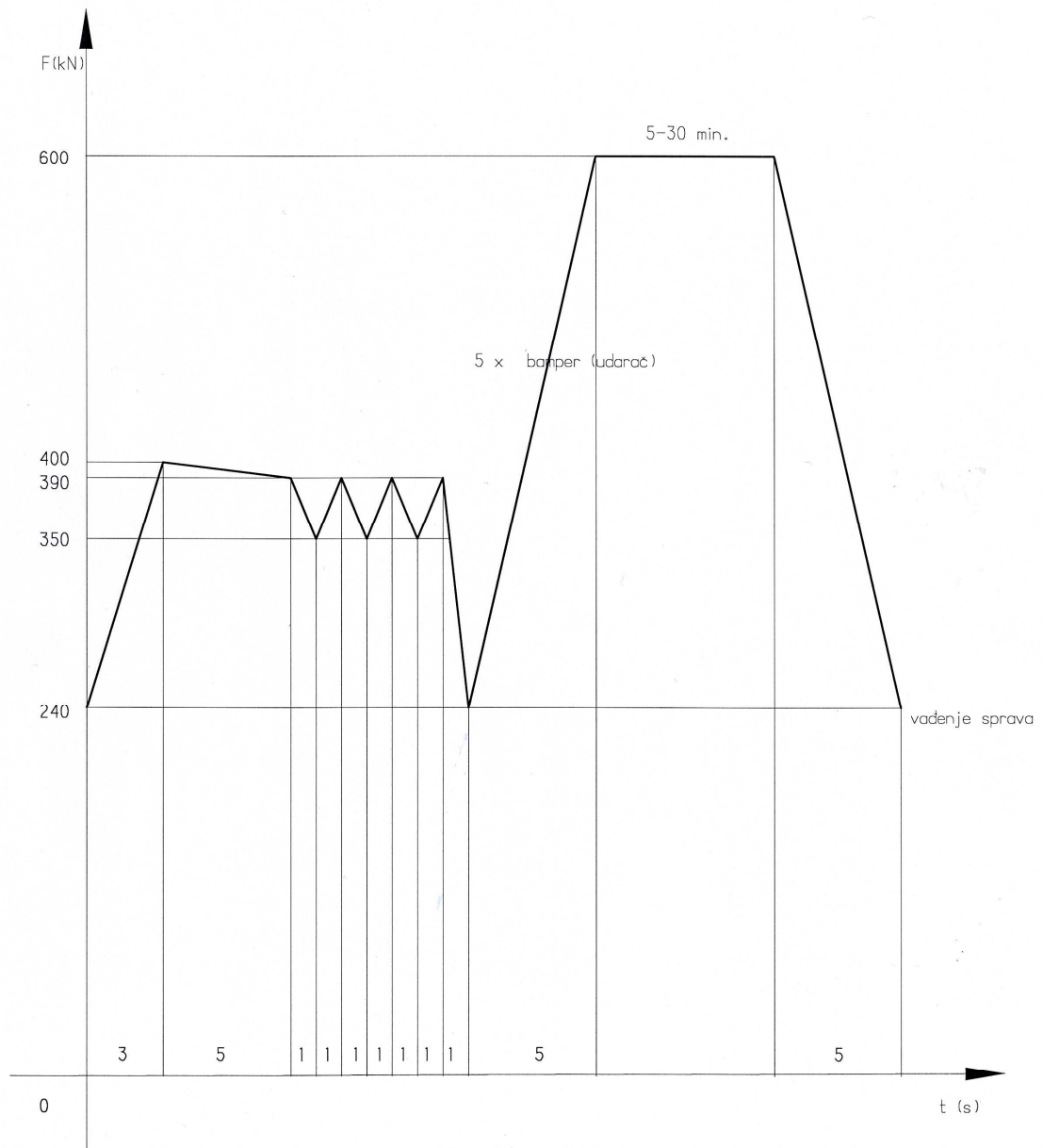


BLOK 2. Vadenje sprava.

Slika 10.2. Vadenje sprava.



Slika 10.3. Bušenje cementnog čepa.



Instrumentacija.

Slika 10.4. Instrumentacija.

10.2. Slike havarija naftaških postrojenja



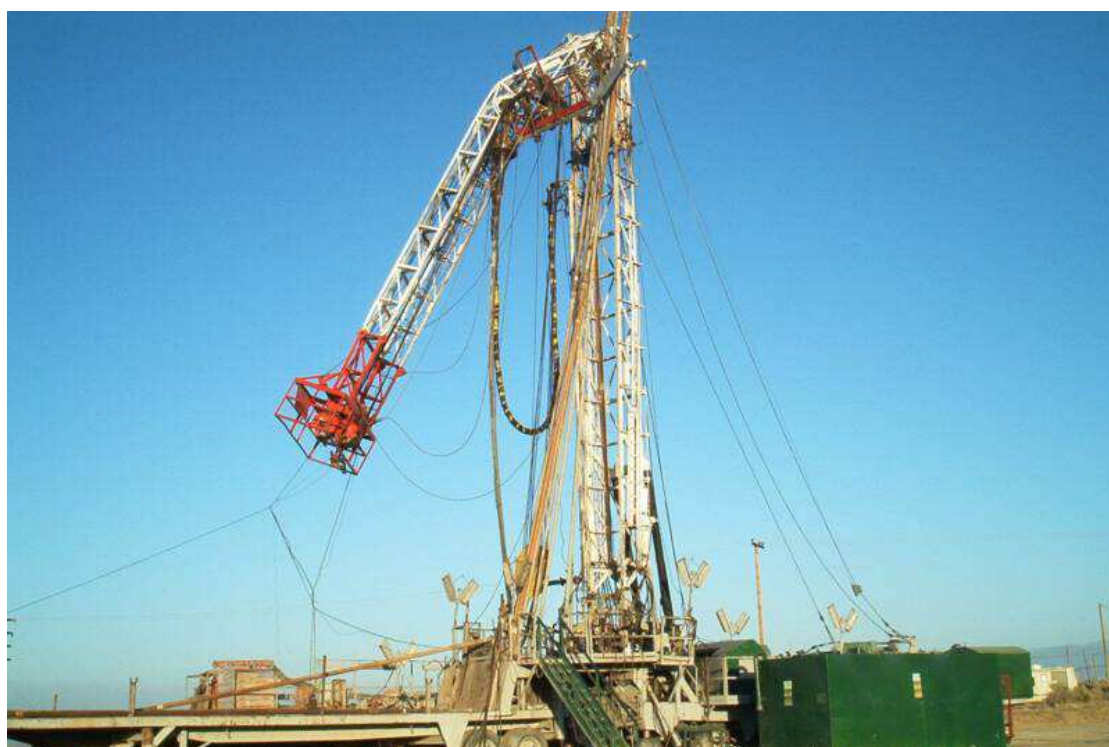
Slika 10.5. Srušeno remonto postrojenje.



Slika 10.6. Srušeni toranj.



Slika 10.7. Havarija naftnih platformi.



Slika 10.8. Prepolovljeni naftaški toranj.

Prilog 10.3. Zbirni pregled rezultata ispitivanja

Rbr.	Naziv	ASTM A572 Grade 50 čelik EM [autor]	S355 JR čelik NM [autor]	13H11N2V2MF [5.19]	SAE 1020 čelik [10.1]
1.	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	512	535		491
2.	Napon tečenja $R_{p0.2}$, Mpa	368	405		285
3.	Izduženje A , %	27.8	30		
4.	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	181	201		
5.	Energija stvaranja prsline, A_I , J	46	57		
6.	Energija širenja prsline, A_P , J	135	148		
7.	Ugib s , mm	25.2	28.5		
8.	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	67.8	90.7		
9.	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , Pa m ^{1/2}	125.1	144.7		
10.	Dinamička čvrstoća S_f , Mpa	267	316		
11.	Koeficijent C	$6.71 \cdot 10^{-12}$	$2.06 \cdot 10^{-11}$		$4,5 \cdot 10^{-10}$
12.	Eksponent m	4	3.31		2.1
13.	Brzina rasta prsline da/dN , m/cikl, pri $\Delta K=15$ Mpa m ^{1/2}	$3.40 \cdot 10^{-7}$	$1.61 \cdot 10^{-7}$		
14.	Prag zamora ΔK_{th} , Mpa m ^{1/2}	5.8	6.1		11.6
15.	Modul elastičnosti, E , Mpa	204200	208200		205000
16.	Koeficijent ciklične čvrstoće, K' , Mpa	1575.7	1490.1	1245.1	
17.	Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.23932	0.22043	0.1924	
18.	Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f , Mpa	1290.2	1261.9	1217.4	
19.	Eksponent zamorne čvrstoće, b	- 0.0987	- 0.08128	- 0.1104	
20.	Koeficijent zamorne duktilnosti, ε'_f	0.04176	0.10530	0.6347	
21.	Eksponent zamorne duktilnosti, c	-0.43965	- 0.53275	- 0.5521	

R.br.	naziv	čelik S 335 [10.4]	6061-T62 Ti-2.5Cu-STA [8.6]	6061-T62 Inconel 706 [2.3]	SAE 1045 [2.6] čelik
1.	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	431			621
2.	Napon tečenja $R_{p0,2}$, Mpa	322			380
3.	Izduženje A, %	31.7			17
4.	Ukupna energija udara, A_{uk} , J				
5.	Energija stvaranja prsline, A_I , J				
6.	Energija širenja prsline, A_P , J				
7.	Ugib s, mm				
8.	Kritični J-integral, J_{IC} , kJ/m ²	44.3			
9.	Kritični faktor intenziteta napona, K_{IC} , Pa m ^{1/2}	99.9	43	77,5	
10.	Dinamička čvrstoća S_f , Mpa				
11.	Koeficijent C	$3.30 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-8}$ do $1.1 \cdot 10^{-7}$	$4.6 \cdot 10^{-11}$ do $1.5 \cdot 10^{-7}$	
12.	Eksponent m	3.81	3.1 - 4.1	2.8 - 4.5	
13.	Brzina rasta prsline da/dN, m/cikl, pri $\Delta K=15$ Mpa m ^{1/2}	$9.99 \cdot 10^{-9}$			
14.	Prag zamora ΔK_{th} , Mpa m ^{1/2}		2.7 - 4.8	3.0 - 11.0	
15.	Modul elastičnosti, E, Mpa				202000
16.	Koeficijent ciklične čvrstoće, K', Mpa				1258
17.	Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'				0.208
18.	Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f , Mpa				948
19.	Eksponent zamorne čvrstoće, b				-0.092
20.	Koeficijent zamorne duktilnosti, ϵ'_f				0.260
21.	Eksponent zamorne duktilnosti, c				-0.445

R.br.	naziv	L290GA [2.6] čelik za cevi	AA2024-T3 [8.10] legura	SS316L čelik [10.2]	čelik A - 387 [10.5]
1.	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	550	460		495
2.	Napon tečenja $R_{p0.2}$, Mpa	290	316	235	325
3.	Izduženje A , %	21			35
4.	Ukupna energija udara, A_{uk} , J				164
5.	Energija stvaranja prsline, A_I , J				54
6.	Energija širenja prsline, A_P , J				110
7.	Ugib s , mm				22.7
8.	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²				63.5
9.	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}				121.1
10.	Dinamička čvrstoća S_f , Mpa				220
11.	Koeficijent C		$6.08 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$3.07 \cdot 10^{-10}$
12.	Eksponent m		2.6	3.3	3.58
13.	Brzina rasta prsline da/dN , m/cikl, pri $\Delta K=15$ Mpa m ^{1/2}				$4.98 \cdot 10^{-6}$
14.	Prag zamora ΔK_{th} , Mpa m ^{1/2}				6.8
15.	Modul elastičnosti, E , Mpa	210000			
16.	Koeficijent ciklične čvrstoće, K' , Mpa	547			
17.	Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.137			
18.	Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f , Mpa	948			
19.	Eksponent zamorne čvrstoće, b	-0.092			
20.	Koeficijent zamorne duktilnosti, ε'_f	0.7163			
21.	Eksponent zamorne duktilnosti, c	-0.6391			

R.br.	naziv	SAE 1045 čelik [10.3]	A 533 – B1 čelik [7.12]	42CrMo4 čelik [2.12]	42CrMo4V čelik [2.11]
1.	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	550			
2.	Napon tečenja $R_{p0,2}$, Mpa	290			
3.	Izduženje A, %	21			
4.	Ukupna energija udara, A_{uk} , J				
5.	Energija stvaranja prsline, A_I , J				
6.	Energija širenja prsline, A_P , J				
7.	Ugib s, mm				
8.	Kritični J-integral, J_{IC} , kJ/m ²				
9.	Kritični faktor intenziteta napona, K_{IC} , MPa m ^{1/2}				
10.	Dinamička čvrstoća S_f , Mpa				198,3
11.	Koeficijent C				$8,64 \cdot 10^{-10}$
12.	Eksponent m				3,224
13.	Brzina rasta prsline da/dN, m/cikl, pri $\Delta K=15$ Mpa m ^{1/2}				
14.	Prag zamora ΔK_{th} , Mpa m ^{1/2}		7.7		
15.	Modul elastičnosti, E, Mpa	206900	200000	210000	
16.	Koeficijent ciklične čvrstoće, K', Mpa	1062.1			
17.	Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja, n'	0.123	0.165		
18.	Koeficijent zamorne čvrstoće, σ'_f , Mpa	1165.6	869	1820	
19.	Eksponent zamorne čvrstoće, b	- 0.081	- 0.085	0,08	
20.	Koeficijent zamorne duktilnosti, ε'_f	1.142	0.32	0.65	
21.	Eksponent zamorne duktilnosti, c	-0.67	- 0.52	0,76	

11. LITERATURA

Literatura 1

- [1.1] C. E. Inglis, Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Proc. Inst. Naval Arch. 55: 219-241, 1913.
- [1.2] A. A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A, 221: 163-198, 1920.
- [1.3] G. R. Irwin, J. A. Kies, Fracturing and fracture dynamics. Welding Journal. Res. Sup. 31(2): 95-100. 1952.
- [1.4] G. R. Irwin, J. A. Kies, Critical energy rate analysis of fracture strength. Welding Journal, Res. Sup. 33(4): 193-198, 1954.
- [1.5] G. R. Irwin, J. A. Kies, Plastic zone near a crack and fracture toughness. Proc. 7th Sagamore Research Conf. On Mechanics and metals Behavior of Sheet Material. Vol. 4, 463-478. Racquette Lake, NY, 1960.
- [1.6] D. S. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits. J. Mech. Phys. Solids. 8: 100-104, 1960.
- [1.7] A. A. Wells, Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. British Welding Journal 11: 563-570, 1963.
- [1.8] J. R. Rice, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. J. Appl. Mech. 35, 379-386, 1968.
- [1.9] P. C. Paris, R. E. Anderson, A rational analytic theory of fatigue. The Trend in Engineering, 13(1), 9-14. University of Washington, 1961.
- [1.10] D. Landes, J. A. Begley, A fracture mechanics approach to creep crack growth. ASTM STP 590, 128-148. Philadelphia, ASTM, 1976.
- [1.11] M. O. Speidel, Theory of stress corrosion cracking in alloys. In J. C. Scully (ed), NATO Scientific Affairs Division. Brussels, 345-354, 1970.
- [1.12] Sedmak, A., "Primena mehanike loma na integritet konstrukcije", Monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 2003.
- [1.13] T. Maneski, Kompjutersko modeliranje i proračun struktura - KOMIPS, Monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
- [1.14] Miodrag Sekulović, Metod konačnih elemenata, Beograd, 1988.
- [1.15] Programski paket Ansys 5.4. uputstvo za rad.
- [1.16] Nikolić - Stanojević V., Maksimović K., Efficient Computation Method in Fatigue Life Estimation of Damaged Structural Components, FACTA UNIVERSITATIS, Vol. 4, NO. 16, pp. 101-114, 2004.
- [1.17] Boljanović S., Fatigue Life Analysis of Damaged Structural Components Using Strain Energy Density Method, 17th European Conference on Fracture – Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures, Brno, Czech Republic, September 3 - 5, 2008.

Literatura 2

- [2.1] Xiulin Zheng, Zhen Li, Fatigue performance of old bridge steel and the procedures for life prediction with given survivability, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 53, No. 2, pp. 251-262, 1996.
- [2.2] M. Burlat, D. Julien, M. Le´vesque, T. Bui-Quoc, M. Bernard, Effect of local cold working on the fatigue life of 7475-T7351 aluminium alloy hole specimens, *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) 2042-2061.
- [2.3] Predicting fracture and fatigue crack growth properties using tensile properties,
Bahram Farahmand a,* , Kamran Nikbin b
a Boeing Company, Huntington Beach, CA, USA
b Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London SW7 2AZ, United Kingdom
Engineering Fracture Mechanics 75 (2008) 2144-2155.
- [2.4] Papadopoulos IV. Long life fatigue under multiaxial loading. *Int J Fatigue* 2001(23);839-849.
- [2.5] Shang Hong-Xue, Ding Hao-Jiang. Low cycle fatigue stress–strain relation model of cyclic hardening or cyclic softening materials. *Engng Fract Mech* 1996; 54(1):1-9.
- [2.6] Seweryn A, Buczyn´ski A, Szusta J. Damage accumulation model for low cycle fatigue. *Int J Fatigue* 2008;1(30):756–65.
- [2.7] Fatigue crack initiation and growth on a steel in the very high cycle regime with sea water corrosion
Thierry Palin-Luc a,* , Rubén Pérez-Mora a,b, Claude Bathias c, Gonzalo Domínguez d,
Paul C. Paris a, Jose Luis Arana e
Engineering Fracture Mechanics 77 (2010) 1953-1962.
- [2.8] Marines I, Paris PC, Tada H, Bathias C. Fatigue crack growth from small to long cracks in VHCF with surface initiations. *Int J Fatigue* 2007;29:2072-8.
- [2.9] Low-cycle fatigue model of damage accumulation - The strain approach J. Szusta *, A. Seweryn Faculty of Mechanical Engineering, Bialystok University of Technology, 45C Wiejska Str., 15-351 Bialystok, Poland *Engineering Fracture Mechanics* 77 (2010) 1604-1616.
- [2.10] Fatigue life predictions using fracture mechanics methods
T. Ghidini a,* , C. Dalle Donne b
a ESA, European Space Agency, Product Assurance and Safety Department, Materials and Processes Division, P.O. Box 299, NL-2200AG Noordwijk, The Netherlands
b EADS Deutschland GmbH, Innovation Works, Munich, Germany

- Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) 134-148.
- [2.11] Budimir MIJOVIĆ, Ismet PAŠALIĆ i Ante AGIĆ, Analiza širenja pukotine u strojarским konstrukcijama, *Strojarstvo* 51 (1) 79-86 (2009).
- [2.12] G. Fajdiga, M. Sraml, Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading, *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009) 1320-1335.
- [2.13] H.A. Richard, M. Sander, M. Fulland, G. Kullmer, Development of fatigue crack growth in real structures, *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) 331-340.
- [2.14] T. Lucht, Finite element analysis of three dimensional crack growth by the use of a boundary element sub model, *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009) 2148-2162.
- [2.15] Maksimović, S., Fatigue Strength Analysis of Structural Components up to Crack Initiation (Proračun čvrstoće elemenata konstrukcija na zamor do pojave inicijalnog oštećenja), *Tehnička dijagnostika* 2005, vol. 4, br. 1, str. 40-46.
- [2.16] Maksimović, S., Mladenović J., "LOM-3"- Softverski paket za procenu veka konstrukcija do pojave i u prisustvu prskotina, VTI, Žarkovo-Beograd.
- [2.17] Boljanović, S., Maksimović, S., Janković, M., Fatigue Life Prediction of Damaged Structural Elements, Issue 2, Volume 8, pp. 3-7, 2009.

Literatura 3

- [3.1] M. Stašević, Analiza naponsko deformacijskog stanja tornja remontnog postrojenja Cardwell II KB 210 A, magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002.
- [3.2] Tehničko uputstvo i dokumentacija, Remontno postrojenje Cardwell II KB 210 A, AD NIS Naftagas, pogon Specijalni radovi, 1978.
- [3.3] Katalog rezervnih delova Remontno postrojenje Cardwell KB 210 A, AD NIS Naftagas, pogon Specijalni radovi, 1978.
- [3.4] Normativ rudarskih operacija, AD NIS Naftagas, pogon Specijalni radovi.
- [3.5] Dnevni izveštaji o radu remontnog postrojenja, AD NIS Naftagas, pogon Specijalni radovi.
- [3.6] S. Malogajski, Optimizacija radova u naftnim i gasnim bušotinama, magistarski rad, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 1996.
- [3.7] R. Bizjak, Tehnologija bušenja sa projektovanjem, Društvo inženjera i tehničara NIS Naftagas, Novi Sad, 2004.

Literatura 4

- [4.1] S. Stojadinović, "Poznavanje materijala", Univerzitet u Novom Sadu, TF Mihajlo Pupin, Zrenjanin, 2011.
- [4.2] Vizuelno ispitivanje materijala I i II, Institut za nuklearne nauke Vinča, Centar za permanentno obrazovanje, 2012.
- [4.3] grupa standarda SRPS za valjane proizvode.
- [4.4] Čulafić, V. B., "Uvod u mehaniku loma", Mašinski fakultet Podgorica, 1999.
- [4.5] Anderson, T. L., "Fracture Mechanics-Fundamentals and applications", CRC Press, USA, 1994.
- [4.6] J.A.Harris Jr, "Engine component retirement for cause, Vol. 1, Executive Summary", AFWAL-TR-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1987.
- [4.7] S. Sedmak, "Uticaj zarez a i prslina na pojavu loma pri elastičnoj i plastičnoj deformaciji", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
- [4.8] A. A. Griffith, "The Phenomena of Rapture and Flow in Solids", Trans R. Soc, London, Vol. A221, p. 163, 1920.
- [4.9] H. M. Westergard, "Bearing Pressures and Crack", Journal of Applied Mechanics, Vol. 6, p. 49-53, 1939.
- [4.10] ASTM E 399-89, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", 1989.
- [4.11] BS 5762 - DD 19, "Standard Test Method for Crack Opening Displacement", London, 1976.
- [4.12] ASTM E 813-89, "Standard Test Method for J_{Ic}, A Measure of Fracture Toughness", 1989.
- [4.13] ASTM E 1152-91, "Standard Test Method for Determining J-R Curve" 1991.
- [4.14] ASTM E 1290-89, "Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement", 1989.
- [4.15] ASTM E 1737-96, "Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness", 1996.
- [4.16] ASTM E 1820-99a, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", 1999.
- [4.17] BS 7448 - Part 1, "Fracture mechanics toughness tests - Method for determination of K_{Ic} critical CTOD and critical J values of metallic materials", BSI, 1991.

- [4.18] BS 7448 - Part 2, "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials" BBI, 1997.
- [4.19] SRPS C.A4.083, "Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanici loma", 1995.
- [4.20] SRPS EN ISO 12737, "Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{Ic})", 2011.
- [4.21] K. J. Miller, W. J. O'Donnell, "The fatigue limit and its elimination", Fatigue Fracture Engineering Materials Structures, Vol. 22, p. 545-557, 1999.
- [4.22] P. C. Paris, and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [4.23] P. C. Paris, and G. C. Sih, "Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and its Application", STP 381, p. 30-83.
- [4.24] J. C. Radon, "Determination of Threshold Stress Intensities, Fatigue of Low Alloy Steel BS4360-50D", Int. J. Fatigue, p. 225, 1982.
- [4.25] E. K. Walker, "An Effective Strain Concept for Crack Propagation and Fatigue With Specific Application to Biaxial Stress Fatigue", AFFDL-TR-70-144, p. 225-233, 1970.
- [4.26] R. G. Forman, V. E. Kearney, R. M. Engle, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol.89, No.3, p. 459, 1997.
- [4.27] M. Klesnil, P. Lukas, "Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, p. 77-92, 1972.
- [4.28] "Welding Handbook", 9th Edition, Vol. 1, AWS, 2001.

Literatura 5

- [5.1] SRPS EN 10002-1, Metalni materijali - Ispitivanje zatezanjem - Deo 1: Metoda (ispitivanja na sobnoj temperaturi), 1996.
- [5.2] G. Charpy, "Note sur l'essai des metaux a la flexion par choc de barreaux entaillés", Association internationale pour l'essai des materiaux - Budapest, 1901.
- [5.3] SRPS EN 10045-1, "Mehanička ispitivanja metala; Ispitivanje udarom po Šarpiju; Deo 1 i 2" Termini i definicije, Metoda ispitivanja, 1993.
- [5.4] J. C. Radon, C. E. Turner, "Fracture Toughness Measurements by Instrumented

- Impact Test", *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 1, No. 3, p. 411-428, 1989.
- [5.5] H. W. Viehring, K. Popp, R. Rintamaa, "Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters Using Various Methods", 10th Congress on Material Testing, Budapest, p. 201-210, 1991.
- [5.6] SEP 1315, 1. Ausgabe, Kerbschlagbiegversuch mit Ermittlung von Kraft und Weg, 1987.
- [5.7] "ESIS Procedure for Determining the Fracture Behavior of Materials", European Structural Integrity Society ESIS P2-92, 1992.
- [5.8] ASTM E466-89, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, p. 571, 1989.
- [5.9] ASTM E647-95, "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle", Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01, p. 714, 1995.
- [5.10] Đ. Dobi, "Žilavosna proba i mehanika loma", Četvrta letnja škola mehanike loma, Perspektive razvoja mehanike loma Dubrovnik, str. 367-374, 1986.
- [5.11] C. P. Paris, and B. R. Hayden, "A New System for Fatigue Crack Growth Measurement and Control", ASTM Symposium on Fatigue Crack Growth, Pittsburg, 1989.
- [5.12] Plavšić N., Dinamika loma zategnutih štapova sa kružnim zarezom, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Beograd 1979.
- [5.13] Roberts M. L., Engine Life, Usage, and Cycle Selection, *Journal of Aircraft* 1978, Vol. 15, No 4, pp 240 - 245.
- [5.14] Bannantine J. A., Comer J., Handrock J., *Fundamentals of Material Fatigue Analysis*, PrenticeHall, Englewood Cliffs, New Jersey 1990.
- [5.15] Коллинз Дж., Повреждение материалов в конструкциях – Анализ, Предсказание, Предотвращение, Перевод с английского, "МИР", Москва 1984.
- [5.16] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П., Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность, Справочник, Машиностроение, Москва 1985.
- [5.17] Janković D. M., Eksperimentalno određivanje tokova zamaranja materijala pri ciklično promenljivim elastoplastičnim deformacijama, Doktorska disertacija,

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 1988.

- [5.18] Janković D. M., Malociklusni zamor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2001.
- [5.19] Posavljak S., Maksimović K., Initial Fatigue Life Estimations in Aero Engine Discs, Scientific Technical Review, Vol. 61, No. 1, 2011. pp. 25-30 .
- [5.20] Landgraf R.W., The Resistance of Metals to Cyclic Deformation, Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, ASTM STP 467, American Societi for Testing and Materials, 1970, pp. 336.
- [5.21] Kostaes D., Fatigue Behaviour and Analysis, Talat Lecture 2401, Technishe Universität München, EAA – European Aluminium Association, 1994.
- [5.22] Klysz S., Load Sequence Influence on Low Cycle Fatigue Life, Technical Sciences, No.8, 2005.
(http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/ts8/14_18_2005.pdf).
- [5.23] Morrow J., Fatigue Design Handbook, Advances in Engineering, Vol. 4, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1968, Sec. 3.2, pp. 2129.
- [5.24] TsoLiang Teng, PebgHsiang Chang, Fatigue Crack Initiation Life Prediction for a Flat Plate with a Central Hole, Journal of C.C.I.T. Vol. 32, No 1, Nov. 2003.
- [5.25] Chamis C. C., Probabilistic Structural Analysis Methods (PSAM) for Select Space Propulsion System Components – II (6th Annual Report), NASA Contractor Report 187200, Southwest Research Institute, Texas, Novembar 1991.
- [5.26] Manson S.S., Halford G. R., Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve approach for Treating Cumulative Fatigue Damage, International Journal of Fracture, Vol. 17, No. 2, 1981, pp. 169-172, RS-R42.
- [5.27] Smith K. N., Watson P., Topper T. H., A StressStrain Function for the Fatigue of Metals, Journal of Materials, JMLSA, Vol. 5, No. 4, Dec. 1970, pp. 767778.
- [5.28] Manson S. S., Halford G. R., Practical Implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage, International Journal of Fracture, Vol. 17, No. 2, 1981, pp. 169-172, R35-R42.

- [5.29] Coffin, I. F., A study of effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 76, pp. 931 - 950, 1954.
- [5.30] ASTM E606 - 2004, "Standard recommended practice for constant - amplitude low cycle fatigue testing" ASTM, West Conshohocken, Pa.

Literatura 6

- [6.1] SRPS EN 10025 - 2, Toplovaljani proizvodi od konstrukcionih čelika - Opšti tehnički zahtevi za isporuku, 2011.

Literatura 7

- [7.1] Perović, Z., "Zamor mašinskih djelova i konstrukcija", Univerzitet Crne Gore, Podgorica, 2006.
- [7.2] Paris, P. and Erdogan, F., A critical of crack propagation laws, J. of Basic Engineering, ASME, 1963,
- [7.3] Walker, The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Alumunum, in Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462, ASTM Philadelphia, 1970, p.1.
- [7.4] Forman, R.G., V.E. Kearney and R. M. Engle, Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures. J. Bas. Engng. Trans. ASME 89, 459 (1967.)
- [7.5] Wheeler, O.C, Spectrum loading and crack growth, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 94, 1972, p. 181.
- [7.6] Willenborg, J., Engle, R.M and Wood, H. A., A Crack Growth Retardation Model Using Effective Stress Concept, AFDL-TR-71-1, Air Force Flight Laboratory, Wright-Paterson AFB, Ohio, 1971.
- [7.7] Elber, W, in Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, ASTM, 1971, 230-242.
- [7.8] Vroman, G.A, Analytic prediction of crack growth retardation using a residual stress concept, Briefing Charts, Rockwel Int., B-1 Division, Los Angeles, 1971.
- [7.9] Chang, J.B., Stolpested, J.H, Sinozuka, M and Vaicaitis, R., Improved methods for predicting spectrum loading effects-Phase I Report, Vol. I –Results and Discussions, AFDL-TR-79-3036, Ohio, 1979.
- [7.10] Boljanović, S., Maksimović, S., Belić, I., Fatigue Life Prediction of Structural Components Based on Local Strain and an Energy Crack Growth Models, WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS Issue 2, Volume 1, pp. 196-203, December 2006.
- [7.11] J.Z. Zuo, Al.Th. Kermanidis, Sp.G. Pantelakis, Strain energy density prediction of fatigue crack growth from hole of aging aircraft structures, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 38, 37–51, 2002.

- [7.12] D. M. LI W. J. NAM, C. S. LEE, AN IMPROVEMENT ON PREDICTION OF FATIGUE CRACK GROWTH FROM LOW CYCLE FATIGUE PROPERTIES, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, No. 4, pp. 397-406, 1998.
- [7.13] Kujawski, D. And Ellyn, F., A fatigue crack growth model with load ratio effects. *Eng Fract. Mech*, 28, pp. 367-378, 1987.
- [7.14] Maksimovic, S., Fatigue Life Analysis of Aircraft Structural Components, *Scientific Technical Review*, Vol. LV, No.1, 2005.
- [7.15] Jovičić, G., Živković, M., Maksimović K., Đorđević, N., The crack growth analysis on the real structure using the X-FEM and EFG methods, *Scientific Technical Review*, No. 2, 2008.
- [7.16] Weertman, J., Theory of fatigue crack growth based on a BCS theory with work hardening, *Int. J Fracture*, Vol. 9, pp. 125-130, 1973.
- [7.17] Burck, L.H., J.N., Weertman, J., Fatigue crack propagation in iron and Mo solid alloys (77-296 K), *Metall Trans. Vol. 7A*, pp. 257-264), 1976.
- [7.18] Liu, Y.Y., Lin, F.S., A mathematical equation relating low cycle fatigue data to fatigue crack propagation rates. *Int. J. Fatigue*, Vol. 6, pp.31-36, 1984.
- [7.19] Chand, S., Gaarg, S.B.L., Crack propagation under constant amplitude loading, *Eng. Fract. Mech.*, Vol.21(1), pp. 1-30, 1985.
- [7.20] Oh, Y.J., Nam, S.W, Low-cycle fatigue crack advance and life prediction. *J. Mater. Sci. Vol. 27*, pp. 2019-2025, 1992.
- [7.21] Rice, J.R., Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue, In: *Fatigue Crack Propagation*, ASTM STP 415, Philadelphia, PA: American Society for testing and Materials, pp. 247-311, 1967.
- [7.22] Maksimović, S., Proračun čvrstoće strukture aviona sa aspekta zamora i mehanike loma, 2. Naučno-stručni skup iz oblasti odbrambenih tehnologija, OTEH 2007, Beograd.
- [7.23] Boljanović, S., Maksimović, S., Djurić, M., Analysis of crack propagation using Local Strain Density Method, *Scientific Technical Review*, Volume LVIX, No. 2, 2009, pp. 12-17.
- [7.24] Glinka, G., A notch stress-strain analysis approach to fatigue crack propagation, *Eng Fract. Mech*, 21 (2); pp. 245-261, 1985.
- [7.25] Beevers C.J, Fatigue crack propagation characteristics at low stress intensities of metals and alloys, *Metal Sci.*, 1977 August/September, 362-367.
- [7.26] Ritchie R.O., Near threshold fatigue in ultra-high strength steel, *Trans ASME , J Eng Mater Tech*, 1977, 99; 195-204.

Literatura 10.

- [10.1] Jianxu Shi, David Chopp, Jim Lua, N. Sukumar, Ted Belytschko, Abaqus implementation of extended finite element method using a level set representation for three-dimensional fatigue crack growth and life predictions, *Engineering Fracture Mechanics* 77 (2010) 2840–2863.

- [10.2] P. Nagapadmaja, V. Kalyanaraman, S.R. Satish Kumar, B.N. Rao, Fatigue crack propagation analysis of surface cracks in pipe elbows, *International Journal of Fatigue* 30 (2008) 734–744.
- [10.3] Maksimović, S., Fatigue Life Analysis of Aircraft Structural Components, *Scientific Technical Review*, Vol. LV, No.1, 2005.
- [10.4] Z. Burzić, Naučno - stručni skup: Seminar o sanaciji mosta gazela, Beograd 2011.
- [10.5] M. Burzić, Uticaj eksplotacionih uslova na integritet i preostali vek posuda pod pritiskom, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, 2008.